

République Algérienne Démocratique et Populaire
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

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

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

Mémoire

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

Ecole doctorale : Science du sol

THÈME

ÉVOLUTION D'UN SOL SABLEUX SOUMIS À L'IRRIGATION EN MILIEU SAHARIEN

Présenté par : LARBI Brahim

Jury :

Président :	Mr DAOUD Y.	Professeur
Directeur de thèse :	Mr DJILI K.	Professeur
Examineurs:	Mr SEMAR A.	Maître de conférences A
	Mr OULD FERROUKH M. H.	Maître de conférences A

Année Universitaire 2013-2014

Résumé

Le travail réalisé a porté sur deux principaux volets. Le premier volet est une caractérisation morphologique et analytique des sols de trois parcelles mises en culture depuis trois ans, sept ans et quatorze ans situées dans la région d'Adrar. A ce niveau, la même caractérisation a été effectuée pour les sols témoins (temps zéro, autrement jamais mis en culture) de chacune des trois parcelles suscitées. Le deuxième volet constitue le cœur même de cette recherche et a porté sur l'étude de l'évolution temporelle de quelques propriétés physico-chimiques de ces sols après trois, sept et quatorze ans de cultures céréalières en irrigué.

Les résultats relatifs aux caractéristiques chimiques et physiques du sol montrent que d'une façon globale, les quatre sols étudiés sont morphologiquement analogues. Ce sont des sols peu évolués régolosiques de type A/C peu profonds. Ils sont particulièrement sableux (Sable total % > 75) et très peu organiques, et leur CEC est particulièrement faible. Tous ces sols sont diversement pourvus en calcaire ($15 < \text{CaCO}_3 \text{ \%} < 61$), peu gypseux mais, en revanche, ils sont relativement salés ($0,22 < \text{CE}_{1/5} \text{ dS/m} < 1,96$). La solution du sol est généralement chlorurée sodique.

L'étude de la variation des propriétés en fonction du temps révèle que l'âge des parcelles n'a pas beaucoup d'influence sur la modification de la salinité. Cependant, la distribution et les taux du calcaire et la fraction granulométrique ont été profondément modifiées. Les résultats montrent aussi, que le sol a subi une compaction des couches de sub-surface qui se traduit par l'augmentation de la densité apparente dans les parcelles 2 et 3 obtenue par la mesure de densité apparente sur cylindre. Ainsi, un durcissement dans les mêmes couches se traduit par une augmentation de la résistance à la traction dans les parcelles 2 et 3. les résultats de la perméabilité montrent aussi que le sol étudié est filtrant. cependant, la vitesse d'infiltration est affectée par les changements des autres propriétés.

Mots Clés : sableux, Adrar, salinité, densité apparente, résistance la traction, perméabilité.

Abstract

The main aim of this work consists in studying the evolution of a irrigated sandy soils in the area of Adrar. In order to answer the objectives of our study, we initially characterized and classified the soils of the area. In the second place we studied their evolution according to the duration of their setting in culture. This study was based on a comparison between three sits 1,2, and 3 three, seven and fourteen years of their use respectively and compared to the witnesses not used.

The results relating to the chemical and physical soil characteristics show that in a total way, the four studied soils are morphologically identical. They are (sols peu évolués régosiques) of type A/C they are not very deep soils. They are particularly sandy (total Sand % > 75) and low organic matter and CEC is particularly weak. All these soils are rich en limestone ($15 < \text{CaCO}_3\% < 61$), not very gypseous but, on the other hand, they are relatively salted ($0,22 < \text{CE1/5 dS/m} < 1,96$).

The study of the variation of the properties according to time reveals that the age of the parcels does not have much influence on the modification of salinity. however, the distribution of limestone and the particle sizes varied much in sites 2 and 3. The results as shows, as the studied soils underwent a compaction of the layers of sub-surface which results in a increase of bulk density in the sites 2 and 3 obtained by measurement of bulk density on cylinder. Thus, a hardening in the same layers results in an increase in the tensile strength in sites 2 and the 3. results of the permeability as shows, as the studied soil is filter. however, the speed of infiltration is affected much by the changes of the other properties.

Key words: sandy, Adrar, salinity, bulk density, tensile strength, permeability.

ملخص

الهدف الرئيسي من هذ العمل هو دراسة خصائص التربة بمنطقة ادرار واثر مدة استخدامها على تغير هذه الخصائص.

ولذلك تم اختيار ثلاث مواقع متقاربة مزروعة ومسقية تعود إلى نفس نوع التربة كما اختير شاهد بالقرب من كل موقع .

الموقع الأول مزروع ومسقي مند ثلاث سنوات والموقع الثاني مزروع ومسقي مند سبع سنوات, أما الموقع الثالث مند أربعة عشر سنة. ثم تمت المقارنة بين هذه المواقع والشواهد بعد دراسة التربة في الميدان والتحليل المخبرية تبين أن هذه التربة تعود إلى نفس الصنف في التصنيف الفرنسي متوسطة العمق والملوحة, قاعدية قليلا, جد كلسيه, قليلة الجبس.

بعد المقارنة بين المواقع الثلاثة أثبتت النتائج أن استعمال التربة بالسقي ليس لها تأثير ظاهر على درجة الملوحة ولكن التأثير كان قويا في نسبة الكلس في الموقعين الثاني والثالث.

كما أثبتت النتائج في هذه المقارنة ان التربة المدروسة الرملية يحدث لها ارتصاص وتصلب بعد مدة زمنية من استغلالها الزراعي

بحيث تظهر النتائج أن الموقعين الثاني والثالث حدث فيهما الارتصاص وتصلب في الطبقات الوسطى أكثر من الموقع الأول والشاهد.

حيث الارتصاص يترجم بزيادة في كثافة التربة الظاهرة ونقص ملحوظ في النفاذية, أما التصلب فيترجم في الزيادة في مقاومة الشد .

كما أظهرت النتائج أيضا أن هذه التربة نفوذه جدا ولكن هذه النفاذية تأثرت بتأثر الخصائص الأخرى.

الكلمات الأساسية:

ادرار, رملية, ملوحة, سقي, كثافة الظاهرية, قوة الشد, النفاذية.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : LES SOLS SABLEUX.	3
1. Généralités sur les propriétés des sols sableux	3
2. Propriétés physiques des sols sableux.....	6
2.1. Structure des sols sableux	6
2.2. Rétention en eau des sols sableux	7
2.3. Perméabilité hydraulique	8
3. Evolution des sols sableux	11
3.1. Evolution physique	12
3.1.1. Durcissement des sols	13
3.1.2. Compaction des sols	15
3.1.3. Croute de battance	18
3.2. Evolution chimique	19
3.2.1. Salinisation	19
3.2.2. Lixiviation des sels dans les sols sableux.....	24
4. Effet du travail du sol.....	26
4.1. Itinéraires techniques adoptés dans la région d'Adrar	26
4.2. Travail des sols sableux	26
4.2.1. Travail du sol sans retournement avec outils à dents	28
4.2.2. Travail du sol conventionnel avec retournement	29
5. Irrigation des sols sableux	32
5.1. Irrigation par aspersion (pivot)	33
5.2. Salinisation causée par l'irrigation.....	37
5.3. Qualité de l'eau d'irrigation	37
CHAPITRE II. PRESENTATION DE LA REGION D'ETUDE	39
1. Situation géographique	39
2. Le climat.....	40
2.1. Les précipitations	40

2.2.	La température	41
2.3.	L'évapotranspiration potentielle.....	41
2.4.	Les vents.....	41
2.5.	L'humidité relative	41
2.6.	L'insolation	42
3.	Géologie et géomorphologie	42
3.1.	Les terrasses d'érosions.....	42
3.2.	Les terrasses d'apports	42
3.3.	Les plateaux	42
3.4.	Les Ergs	43
3.5.	Les plaines	43
3.6.	Les Sebkhass	43
4.	Hydrogéologie.....	44
5.	Les sols	44
6.	L'agriculture dans la wilaya d'Adrar	45

CHAPITRE III. MATERIEL ET METHODES

1.	Matériel d'étude	47
2.	Méthodes d'étude	49
2.1.	Choix des profils et échantillonnage	49
2.2.	Les méthodes de mesure sur le terrain	52
2.2.1.	Mesure de la perméabilité hydraulique	52
2.2.2.	Mesure de la résistance à la traction.....	53
2.2.3.	Détermination de la densité apparente	56
2.3.	Méthodes d'analyses des sols au laboratoire	56

CHAPITRE IV. RESULTATS ET DISCUSSION

1. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES ET ANALYTIQUES DES SOLS DE LA ZONE D'ETUDE

1.1.	Sol du témoin	58
1.2.	Sol de la parcelle 1	60
1.3.	Sol de la parcelle 2	63
1.4.	Sol de la parcelle 3	65

2.	Qualité de l'eau d'irrigation	68
3.	VARIATION DES PROPRIETES CHIMIQUES ET PHYSIQUES DES SOLS EN FONCTION DE L'ESPACE ET LA PROFONDEUR	
3.1.	La salinité	39
3.1.1.	Variations verticales et temporelles	39
3.1.2.	Synthèse et discussion	72
3.2.	Le calcaire	73
3.2.1.	Variations verticales et temporelles	73
3.2.2.	Synthèse et discussion	76
3.3.	La texture du sol	77
3.3.1.	Variations verticales et temporelles	77
3.3.2.	Synthèse et discussion	82
3.4.	La densité apparente	83
3.4.1.	Variations verticales et temporelles	83
3.4.2.	Synthèse et discussion	88
3.5.	La résistance à la traction	88
3.5.1.	Variations verticales et temporelles	88
3.5.2.	Synthèse et discussion	92
3.6.	La perméabilité hydraulique.....	93
3.6.1.	Variations verticales et temporelles	93
3.6.2.	Synthèse et discussion	96
4.	Discussion générale	97
	CONCLUSION GENERALE	101
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	103

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU I. Modes d'irrigation par région en Algérie.....	32
TABLEAU II. Besoins en eau du blé sous pivot dans les régions sahariennes.....	32
TABLEAU III. Données climatiques de la station d'Adrar	40
TABLEAU IV. Pratiques culturales suivies dans chaque exploitation.....	48
TABLEAU V. Résultats des analyses du profil témoin.....	59
TABLEAU VI. Résultats des analyses de P1de parcelle 1	62
TABLEAU VII. Résultats des analyses de P1de parcelle 2.	64
TABLEAU VIII. Résultats des analyses de P1de parcelle 3.	66
TABLEAU IX. Résultats des analyses de l'eau d'irrigation.	68
TABLEAU X. Variabilité de la salinité des échantillons étudiés	69
TABLEAU XI. Analyse de la variance de la variation verticale entre couches présentée en colonnes et la variation spatiale entre parcelles présentée en lignes des données de la CE en dS/m.....	71
TABLEAU XII . Statistiques descriptives des taux de calcaire total.....	73
TABLEAU XIII. Analyse de la variance verticale entre couches présentées en colonnes et la variation spatiale entre parcelles présentées en lignes des données du calcaire total	74
TABLEAU XIV. Groupes homogènes obtenus pour la variation spatiale entre parcelles du calcaire.	75
TABLEAU XV. Statistiques descriptives des taux des fractions granulométriques des échantillons étudiés	77
TABLEAU XVI. Analyse de la variance de la variation verticale entre couches présentée en lignes et la variabilité spatiale entre parcelles présentée en colonnes de la distribution de la fraction granulométrique.....	81

TABLEAU XVII. Groupes homogènes de la variation du sable grossier dans le profil.....	82
TABLEAU XVIII. Statistiques descriptives relatives aux densités apparentes	83
TABLEAU XIX. Analyse de la variance de la densité apparente dans le profil et dans l'espace.	86
TABLEAU XX. Groupes homogènes de la densité apparente	86
TABLEAU XXI. Statistiques descriptives de la résistance à la traction des sols étudiés.	89
TABLEAU XXII. Analyse de la variance de résistance à la traction dans le profil et entre parcelles.....	92
TABLEAU XXIII. Groupes homogènes de la résistance à la traction entre parcelle.....	92
TABLEAU XXIV. Groupes homogènes de la résistance à la traction dans le profil.....	92
TABLEAU XXV. Statistiques descriptives de la perméabilité hydraulique à saturation..	93
TABLEAU XXVI. Analyse de la variance de variation de la perméabilité hydraulique des différentes parcelles étudiées.	95
TABLEAU XXVII. Groupes homogènes de la perméabilité hydraulique.	95
ANNEXES	116

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Représentation visuelle comparative des tailles de sable, de limon, et de particules d'argile.	3
Figure 2. Microtextures du grain de quartz.	4
Figure 3. Charte d'estimation de rondeur et l'indice de rondeur des grains de quartz.	5
Figure 4. Réserve d'eau utile (%) des différents mélanges sable-argile.	8
Figure 5. Valeurs typiques de la perméabilité hydraulique.	9
Figure 6. La relation entre la porosité et la perméabilité hydraulique	9
Figure 7. Infiltromètre de Müntz.	10
Figure 8. Infiltromètre de Guelph3	10
Figure 9. Infiltromètre à double anneau	10
Figure 10. Types et processus de dégradation des sols	11
Figure 11. Evolution de la superficie et la production des céréales sous pivots (Wilaya d'Adrar).	12
Figure 12. Interactions des mécanismes et conséquences de la dégradation physique.	13
Figure 13. Distributions de fréquence de la résistance à la traction et la densité apparente des horizons durcis et non durcis.	14
Figure 14. Sections de l'arrangement structural des particules pour des horizons non durcis (a) et durcis (b)	15
Figure 15. Les effets de la compaction et du travail sur la densité apparente et la rétention en eau en fonction de la profondeur d'un sol sableux.	16
Figure 16. Le tassement selon l'homogénéité de la taille des particules	17
Figure 17. La résistance à la pénétration à gauche et la densité apparente à droite d'un horizon compact sous différents traitements.	18
Figure 18. Liaison entre dispersion et teneur relative du complexe adsorbant en sodium	20

Figure 19. Évolution du rendement moyen en grains en fonction du temps dans la région de Gassi Touil	21
Figure 20. Les différents types de profils salins	23
Figure 21. Quantités d'azote nitrique lixiviées proportionnellement relatives aux niveaux de l'irrigation et la fertilisation.....	24
Figure 22. Concentrations mensuelles de lixiviation de NO_3^- dans un sol sableux par rapport d'autres textures limoneuse et argileuse	25
Figure 23. Variation du volume des macropores ($>60 \mu\text{m}$) et mésopores ($60-0.2 \mu\text{m}$) de sol entre le semis direct et le travail dans un sol sableux grossier après 6 ans de mise en culture en orge	27
Figure 24. Effets du système de travail du sol sur la densité apparente (a) et la résistance à la pénétration (b) à différentes profondeurs du sol.....	28
Figure 25. Comparaison de la taille des pores entre le travail minimum et le travail du sol conventionnelle.....	29
Figure 26. Résistance à la pénétration sous système de travail du sol sans retournement et travail du sol conventionnel	30
Figure 27. Profils de résistance de pénétration juste avant la plantation de la pomme de terre dans un sol sableux sous labour avec charrue à soc et chisel	31
Figure 28. Variation de résistance à la pénétration entre le travail profond et superficiel et en fonction de l'outil de travail du sol.....	32
Figure 29. Impact du mode d'irrigation sur la structure du sol.....	34
Figure 30. Effet du type de la hauteur des asperseurs sur l'uniformité de l'irrigation.....	35
Figure 31. Variation de la perméabilité et la densité apparente en fonction du mode d'arrosage.....	36
Figure 32. Variabilité spatiale des caractéristiques du sol affectées par l'hétérogénéité de l'irrigation.....	36
Figure 33. Localisation de la zone d'étude	39
Figure 34. Carte géomorphologique d'Adrar	43

Figure 35. Extension des formations du système aquifère du Sahara septentrionale	44
Figure 36. Carte de répartition de l'agriculture oasienne au niveau de la wilaya d'Adrar.....	46
Figure 37. Localisation des profils réalisés à l'intérieure des parcelles.....	49
Figure 38. Localisation des profils réalisés	51
Figure 39. Dispositif du test de résistance à la traction	54
Figure 40. Dispositif du test de la résistance à la traction de (Guérif, 1988).....	55
Figure 41. Profils salins des parcelles étudiées	70
Figure 42. Profils salins des trois parcelles étudiées.....	71
Figure 43. La distribution du calcaire dans les profils du témoin moyen et des trois parcelles.....	73
Figure 44. Profils de distribution des taux de calcaire dans les parcelles et dans les témoins	76
Figure 45. Distribution de la fraction granulométrique dans le témoin et les trois parcelles étudiées	78
Figure 46. Profils argileux du sol témoin et des sols des trois parcelles.....	79
Figure 47. Profils argileux et profils sableux des trois parcelles et de leurs témoins respectifs	80
Figure 48. Evolution de la densité apparente pour le témoin moyen et des trois parcelles.....	84
Figure 49. Comparaison de la densité apparente de chaque parcelle avec son propre témoin.....	85
Figure 50. Effet de la compaction sur le développement du système racinaire.....	87
Figure 51. Profils de distribution de la résistance à la traction dans le témoin et dans les parcelles	89
Figure 52. Comparaison de la résistance à la traction dans chaque site cultivé avec son témoin	92

Figure 53. Perméabilité hydraulique à saturation au niveau du témoin et des trois parcelles.....	94
Figure 54. Perméabilité hydraulique des parcelles cultivées et de leurs témoins	95

LISTE DES PHOTOS

Photos 1 et 2. L'effet de la mise en valeur sur des sols sableux de la région d'Adrar.....	6
Photo 3. La compaction d'un sol sableux	17
Photo 4. Salinisation des sols causée par l'irrigation par pivot.....	37
Photos 5 et 6. Préparation des profils à l'échantillonnage et aux différentes mesures	50
Photos 7 et 8. Déroulement de l'essai de la perméabilité hydraulique	53
Photos 9, 10 et 11. Préparations des échantillons à la mesure de la résistance à la traction.....	53
Photos 12 et 13. Les mesures de la densité apparente sur terrain	56
Photo 14. Profil Témoin.....	58
Photo 15. Profil 11	60
Photo 16. Profil 21	63
Photo 17. Profil 31	65

INTRODUCTION

La croissance démographique a entraîné une pression importante sur les ressources en terre. La diminution des surfaces agricoles et le manque d'eau d'irrigation ont conduit à la mise en culture de sols marginaux et fragiles. Les sols sableux, longtemps considérés comme peu productifs, recouvrent des surfaces immenses au Sahara. En Algérie, les zones arides représentent près de 95% du territoire national dont 80% se situent dans le domaine hyperaride (Koull, 2007) et donc en zone saharienne. Ces sols sont généralement peu fertiles du fait de leurs faibles teneurs en argile et en matière organique, et de leurs carences en phosphore et en azote et parfois en potassium et oligo-éléments (Vinas et Joukove, 1974). Ces sols qui se caractérisent par une faible réserve hydrique due à leurs faibles teneurs en argile et en limon sont souvent soumis à une forte évaporation et fournissent donc très peu d'eau aux plantes (Laaboudi, 2001). De même, ces sols se caractérisent aussi par des propriétés pédologiques défavorables (faible stabilité structurale) qui accentuent les risques de dégradation des terres. Malgré leurs mauvaises qualités et leurs faibles rendements, ces sols sont de plus en plus cultivés en raison de la disponibilité de l'eau d'irrigation de la nappe continentale intercalaire (Vinas et Joukove, 1974). Cette nappe s'étend sur une superficie de l'ordre de 780 000 km². La réserve totale de cette nappe a été estimée à 6.10^{13} m³ (Chabaca, 2007).

La mise en culture en irrigué de ces sols sableux dans les régions sahariennes a engendré une dégradation de leurs qualités pédologiques et agronomiques dans certains périmètres de mise en valeur. Ainsi, la salinisation secondaire et la diminution des teneurs en matière organique des sols (Djili et al., 2003 ; Ziza, 2006), la compaction des horizons de subsurface (Lesturgez, 2005) et la pollution des nappes (Badraoui et al., 2000) sont parmi les effets les plus visibles. Ceci est dû au fait que les sols sableux sont très susceptibles à la dégradation physique et chimique de leurs propriétés (Lesturgez, 2005). En effet, ces sols se tassent et se massifient facilement et deviennent donc difficiles à travailler d'où une réduction de la vitesse d'infiltration de l'eau et une limitation du développement du système racinaire (Hongtao, 2010). L'hétérogénéité de l'arrosage par pivot (Dejonge et al., 2007), l'apport des sels solubles par l'eau d'irrigation (Ziza, 2006 ; Chabaca, 2007) et les pratiques culturales mal adaptées sont

responsables de la dégradation des propriétés physiques et chimiques de ces sols et menacent même la durabilité de l'agriculture dans ces régions (Kheyar, *et al.*, 2007).

Les phénomènes de compaction et de durcissement de ces sols sont connus depuis longtemps. En effet, Vinas et Joukove (1974), en étudiant quelques sols dans la région d'Adrar, après leur mise en valeur, concluent que ces sols présentent des contraintes sur le plan physique par l'apparition de couches compactes et cimentées pouvant limiter la croissance des racines. L'irrigation excessive, le mauvais choix de l'outil de travail, les conditions d'humidité de travail du sol et le nombre de passages de l'outillage au champ seraient les facteurs principaux de ces phénomènes de compaction et de durcissement. Ces phénomènes sont décrits dans les grands périmètres de mise en valeur, surtout ceux qui sont relativement anciens.

La dégradation physique des sols sableux est souvent évoquée dans la région d'Adrar (Vinas et Joukove, 1974). Compte tenu de l'importance de ce phénomène et du déficit d'études qui lui sont consacrées dans la région d'Adrar, nous nous proposons à travers cette recherche de contribuer à une meilleure connaissance des processus qui le régissent. Aussi, le présent travail a pour objectif d'étudier l'évolution temporelle de quelques propriétés des sols sableux de trois périmètres de mise en valeur en irrigué et cultivés en céréales de la région d'Adrar. Ces périmètres sont mis en culture depuis respectivement 3, 7 et 14 années. Ils sont situés sur les terrasses de Teberghamine à une distance de 120 Km au nord de la ville d'Adrar.

Le présent document est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique relative aux propriétés physico-chimiques des sols sableux, à l'effet de l'irrigation et au travail du sol sableux sur les propriétés pédologiques. Le deuxième chapitre est une présentation de la région d'étude. Le troisième chapitre porte sur la méthodologie adoptée et le matériel utilisé pour réaliser cette recherche. Le quatrième chapitre porte sur la discussion des résultats obtenus. Ce document se termine par une conclusion dans laquelle nous reprenons les principaux résultats et les perspectives de cette recherche.

CHAPITRE I. LES SOLS SABLEUX

1. Généralités sur les propriétés des sols sableux

Les sols sableux sont composés de fractions relativement inertes plus ou moins grossières. Ils correspondent à des matériaux donnant au toucher une impression rugueuse souvent appelés sols squelettiques (figure 1) (Hénin, 1976). L'expression commune « sol léger » est utilisée pour décrire le comportement physique de ce type de sol, parce qu'il tend à être lâche, bien drainé, bien-aéré, et facile à cultiver (Hartmann et *al.*, 1999 ; Al-Darby, 1996 ; Vinas et Joukov, 1974).

Le sable est généralement le groupe de particules le plus identifié comme matériel de sol. Il correspond aux particules du sol dont le diamètre varie de 2000 μm (2 mm) à 50 μm (classification USDA) ou à 20 μm (classification ISSS). La fraction de sable est souvent subdivisée en sous fractions telles que le sable grossier, moyen, fin et très fin (figure 1) (Lal et Shukla, 2004).

Les grains de sable se composent généralement de quartz, mais peuvent également être des fragments de feldspath, mica et occasionnellement, de minéraux lourds tels que le zircon, la tourmaline et la hornblende, cependant le dernier est plutôt rare (Hillel, 1998).

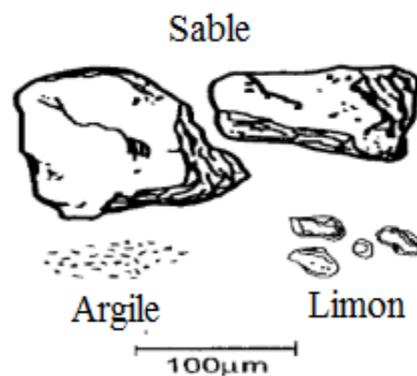


Figure 1. Représentation visuelle comparative des tailles de sable, de limon, et de particules d'argile (Hillel, 1998).

Dans la plupart des cas, les grains de sable ont des dimensions plus ou moins uniformes et peuvent être représentés comme sphériques. Cependant, ils ne sont pas nécessairement lisses et peuvent avoir des surfaces tout à fait découpées. Cette variation de taille et de forme commande la variation de la porosité et sa distribution (Hillel, 1998). Des traits observés sur les grains de quartz dans les travaux de Lesturgez (2005) sont illustrés par la figure 2 qui présente l'impact mécanique du milieu sur le grain de sable, diverses tailles et formes souvent imbriquées et chevauchées sur la surface du grain.

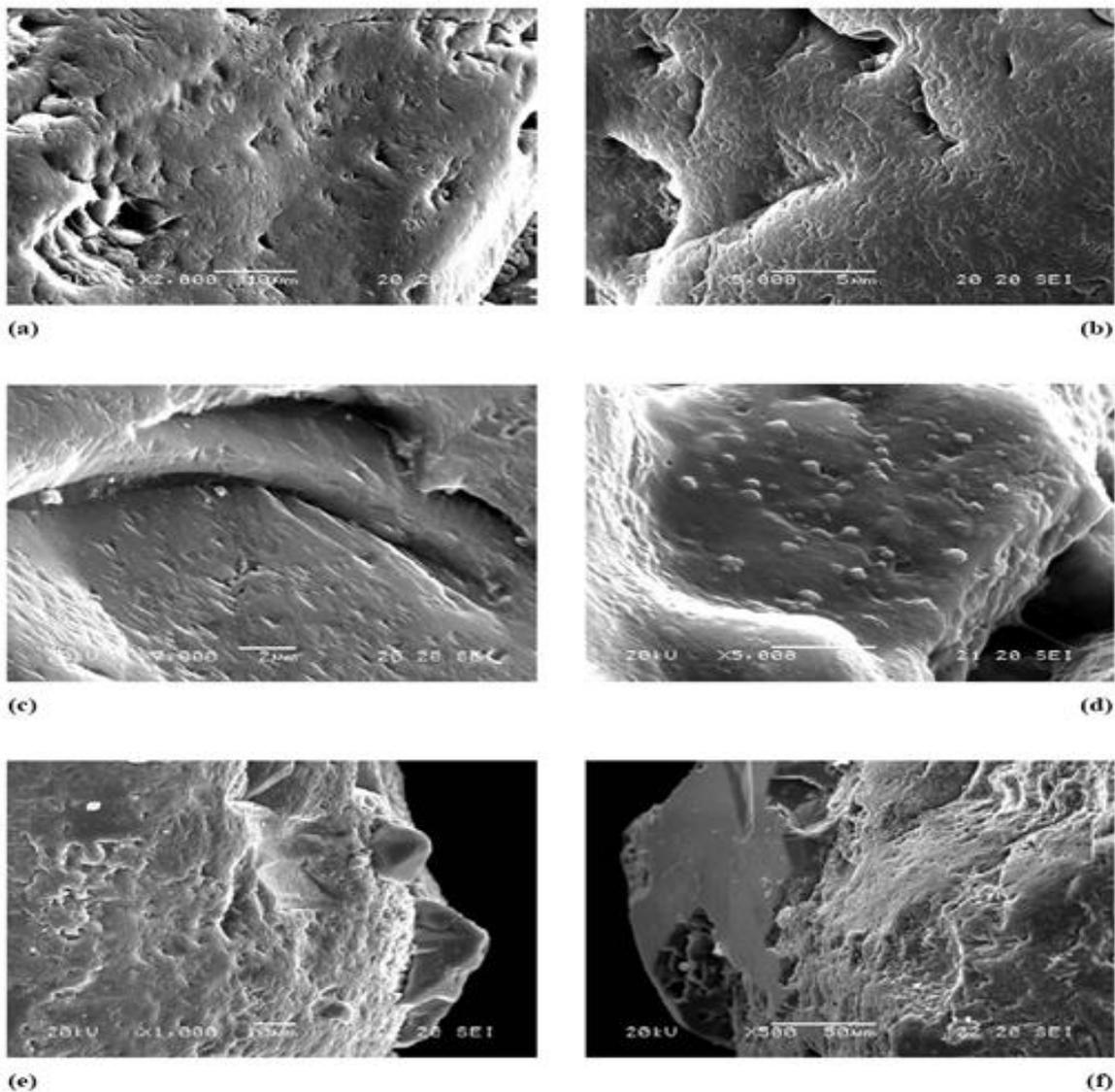


Figure 2. Microtextures du grain de quartz. (a) les marques-V, des bords d'abrasion, des fentes et usure ; (b) les impacts mécaniques éoliens avec un rapport optique ($\times 5,000$) ;(c) dissolution orientée ; (d) globules frais de silice ; (e) néogènes de quartz ; (f) surface de contact.

Le grain de sable peut être alors noté en fonction de deux indices (figure 3). L'un dit de sphéricité du grain qui est mesuré par le rapport de la largeur à la longueur du grain. L'autre l'indice de rondeur de KRUMBEIN, est établi en comparant le grain à étudier avec une première série de figures géométriques caractérisées par le rapport:

$$\text{Rapport} = \frac{\text{Moyenne des rayons de courbures des convexités du grain}}{\text{Rayon du plus grand cercle inscrit dans le grain}}$$

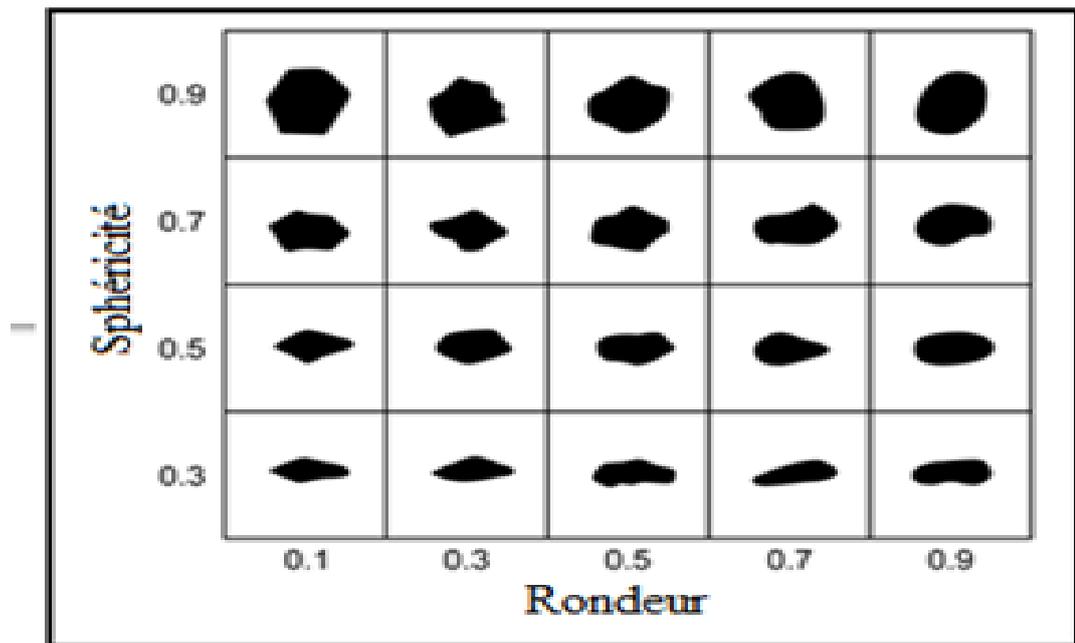


Figure 3. Charte d'estimation de rondeur et l'indice de rondeur des grains de quartz (Krumbein et Sloss, 1963 ; in Robert, 2012)

Les sols sableux, du fait de leur squelette rigide et de leur texture grossière se caractérisent par une structure très aérée à l'état naturel, ils sont filtrants, pauvres en matière organique et présentent une faible rétention en eau et en éléments fertilisants (Zhong *et al.*, 2004 ; Ruelle *et al.*, 2003).

Selon Bruand *et al.* (2005), les sols sableux contenant moins de 18% d'argile et plus de 65% de sable, sont souvent considérés comme des milieux inertes qui se caractérisent par une forte porosité, une bonne perméabilité, et un enracinement profond. Ils sont les plus sensibles à la battance des pluies, cependant leur dégradation est plus variable en fonction de la structure, de la matière organique, de leur état de surface et du drainage (Roose et Sarrailh, 1990).

Ce type de sol n'échappe pas de la dégradation physique, cependant le comportement au champ de tels matériaux est encore mal connu (Lesturgez, 2005). La mise en valeur de ces sols provoque de nombreuses formes de dégradation physique (Hartmann, 2002). Selon Hongtao (2010) et Hongtao *et al.*, (2011) les sols sableux contenant plus de 80% de sables se tassent naturellement après le travail du sol avec des conséquences en terme de réduction de la vitesse d'infiltration des eaux d'irrigation et de limitation du développement du système racinaire des plantes cultivées.

2. Propriétés physiques des sols sableux

2.1. Structure des sols sableux

La structure est une propriété fondamentale du sol car elle conditionne sa qualité physique, chimique et biologique. L'importance de la structure est liée à sa conséquence directe consistant en un ensemble d'espaces lacunaires ou porosité (Chamayou et Legros 1989). Cependant, la faible teneur d'argile et de limon limite la formation des agrégats des sols sableux (Degens *et al.*, 1996).

Les sols sableux, initialement organisés dans une structure particulière fortement aérée présentent des agrégats fragiles et friables (Photos 1et 2). La présence d'une abondante macroporosité interconnectée les rendent faiblement résistants à la pénétration et facilement travaillés au début (Lesturgez, 2005). Cependant, ces sols contenant de faibles teneurs en argile sont susceptibles à l'effondrement sous de faibles pressions et à des faibles humidités dès lors qu'ils sont travaillés (Lesturgez, 2005).



(1)



(2)

Photos 1et 2. L'effet de la mise en valeur sur des sols sableux de la région d'Adrar.

(1) L'état initial ; (2) l'état du sol après deux campagnes du blé à droite.

L'effondrement de la structure sous le tassement conduit à une structure massive par la disparition simultanée des agrégats et des macropores. Le processus de tassement et le changement de la structure particulaire aérée s'explique par le remplissage, où le limon et l'argile viennent combler les espaces entre les grains de sables formant une structure quasi-continue (Bruand *et al.*, 2004).

L'effondrement de la structure est soit provoqué sous une pression mécanique faible ou sous le propre poids du sol, il correspond à la disparition de la majeure partie de la macroporosité de l'arrangement d'agrégats, c'est à dire au passage d'une structure granulaire métastable (constituée d'agrégats et de sables libres) à une structure massive. (Lesturgez, 2005).

2.2. Rétention en eau des sols sableux

La capacité du sol à absorber de l'eau dépend de son affinité à l'eau. Elle est en fonction de sa teneur en argile, de la surface spécifique, de la nature des cations fixés sur le complexe d'échange et de la taille de pores déterminée par le mode d'arrangement des particules (Lal et Shukla, 2004). Divers auteurs ont montré qu'il existe des relations linéaires étroites entre le taux d'humidité à un pF donné et la texture du sol. Par ailleurs, Bruand *et al.* (2002), Gras (1962), Dancette et Maertens (1974) cités par Cornet (1980) ont montré que le pF correspondant à la capacité au champ pour un type de sol déterminé peut être relié à la composition texturale du sol. En effet, la rétention en eau est plus élevée dans les sols à texture fine, soit des sols contenant des taux d'argile et de constituants finement divisés plus forts que dans les sols à texture grossière. Cela est dû à la présence d'une porosité texturale responsable de la quasi-totalité de l'eau retenue dans le sol aux bas potentiels (Bigorre, 2000).

Le sol sableux a une porosité très forte mais sa capacité de stockage en eau est très faible, ceci s'explique par l'arrangement inadéquat des grains de sables (Bertrand, 1997). Le sable perd le maximum de son eau à partir de - 3,2 kPa (Halilat et Tessier, 2006). Ce phénomène s'explique par la présence d'une macroporosité qui se vide de l'essentiel de son contenu en eau entre - 3,2 et - 10 kPa. Ces derniers points de pF correspondent aux pores de 50 à 15 µm environ en appliquant la loi de Jurin-Laplace.

Les sols sableux des milieux sahariens sont pauvres en argile et l'effet de son ajout aux sols sableux a attiré l'attention de plusieurs auteurs. Par ailleurs, Halilat et Tessier (2000) ; Halilat et Tessier (2006) ont montré que le sable pur (0 % d'argile) possède une

capacité de rétention très faible due essentiellement aux faibles propriétés de gonflement-retrait, le volume du matériau varie très peu en fonction de la teneur en eau. La même observation enregistrée pour les sols qui ont des teneurs en argile moins de 6 % (figure 4).

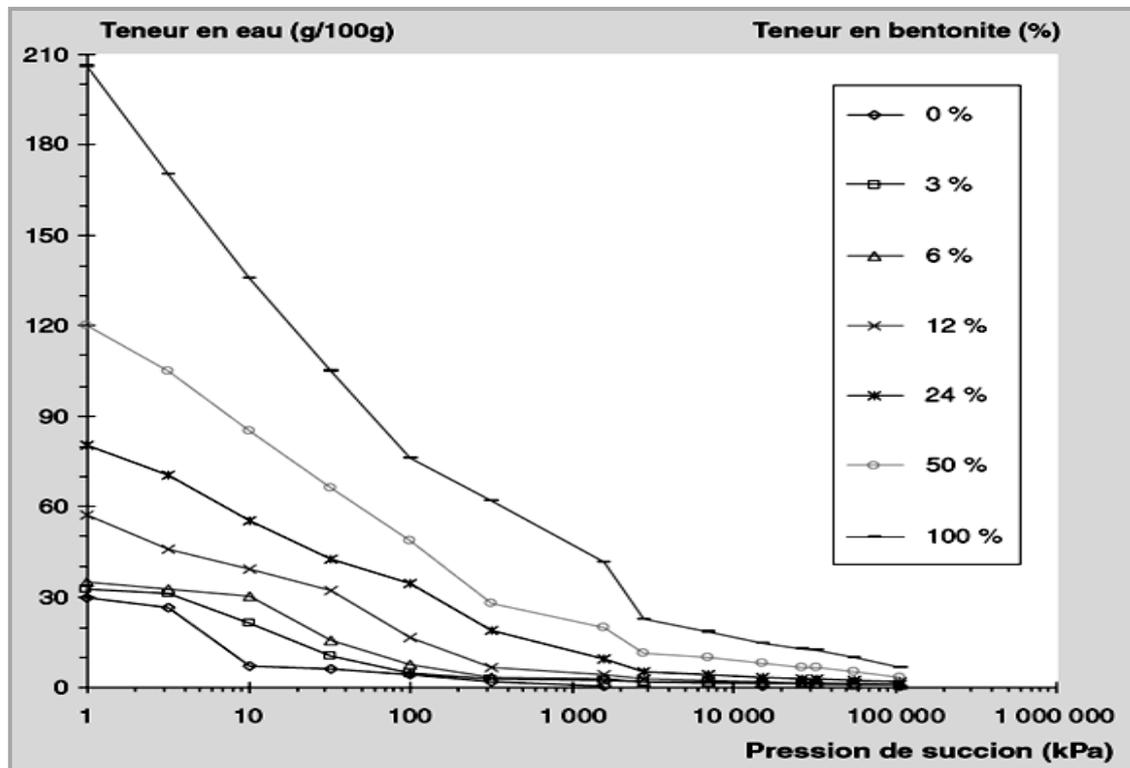
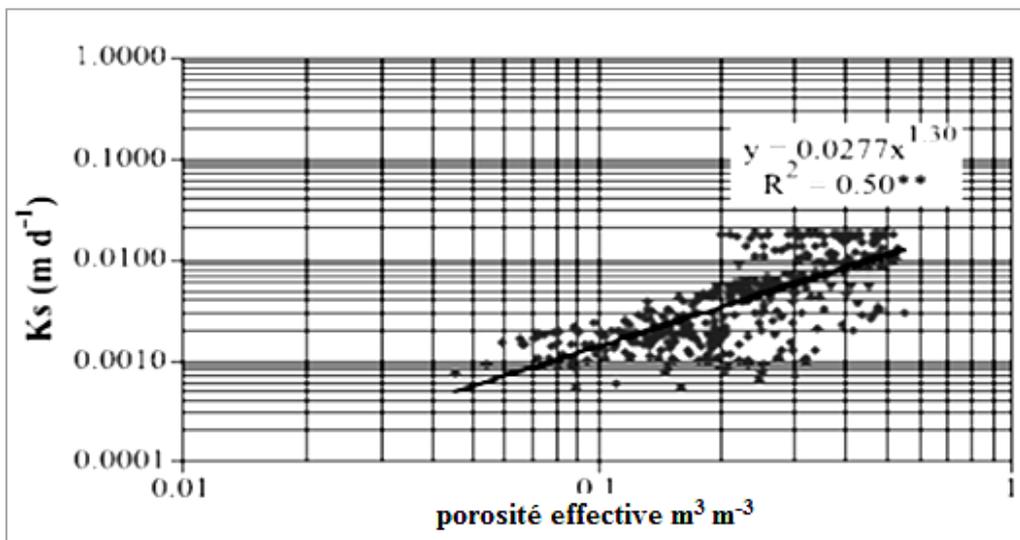
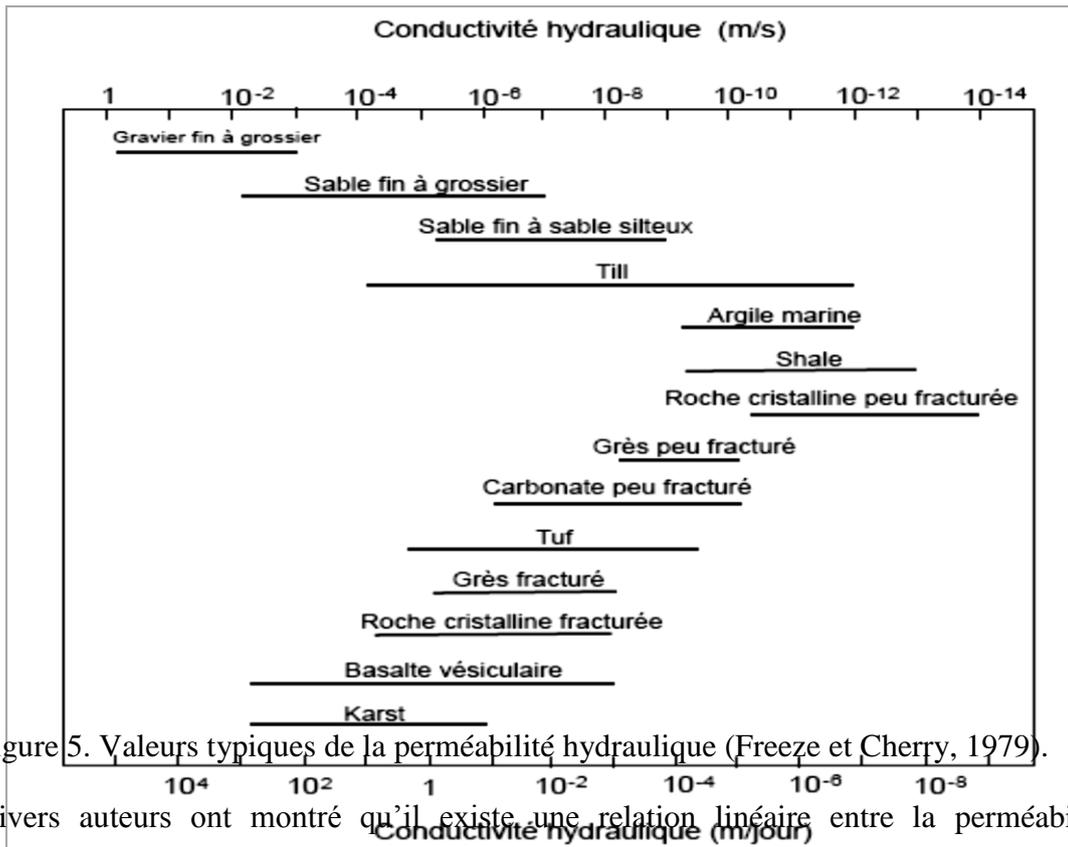


Figure 4. Réserve d'eau utile (%) des différents mélanges sable-argile (Halilat et Tessier, 2006).

2.3. Perméabilité hydraulique

La perméabilité hydraulique (K_s) est une propriété physique importante du sol, particulièrement pour la détermination de la vitesse d'infiltration, les pratiques d'irrigation, le drainage, le ruissellement et la simulation de la lixiviation surtout les recharges des eaux souterraines et d'autres processus agricoles et hydrologiques. Il existe plusieurs méthodes au laboratoire et sur le terrain pour la mesure directe des propriétés hydrauliques du sol (Aimrun *et al.*, 2004). Les caractéristiques des sols qui influencent la perméabilité hydraulique K_s sont la porosité totale, la distribution de la taille de particules et la tortuosité, soit, la géométrie des pores (Lal et Shukla, 2004) (figure 5).



2.3.1. Mesure de la perméabilité hydraulique à saturation sur terrain (Ks)

Cette méthode peut s'effectuer au laboratoire sur des échantillons de sol remaniés mais elle est déconseillée car elle exclut l'effet de la structure du sol. Les mesures de terrain, intéressant des volumes d'eau plus importants qu'au laboratoire, généralement plus intégratrices, mais aussi plus lourdes à mettre en œuvre. Le principe est d'appliquer une lame d'eau sur une partie du sol délimitée par un cylindre et d'observer, par exemple, le débit nécessaire au maintien d'un niveau constant. Ce débit, s'il se stabilise, correspond à la valeur du K_s .

Les différents appareils couramment utilisés dans les mesures sur terrain de la perméabilité à saturation sont : l'infiltromètre de Müntz (figure 7), l'infiltromètre de Guelph (figure 8) et l'infiltromètre à double anneau (figure 9).

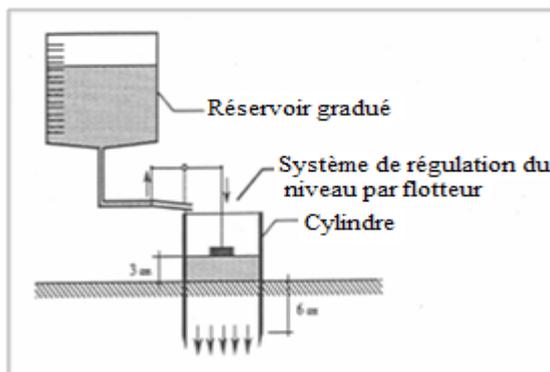


Figure 7. Infiltromètre de Müntz, (Musy et Soutter, 1991).

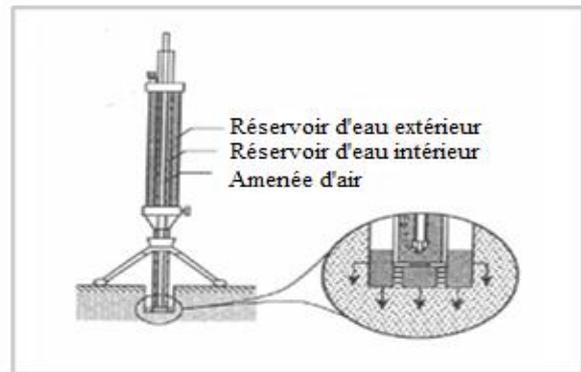
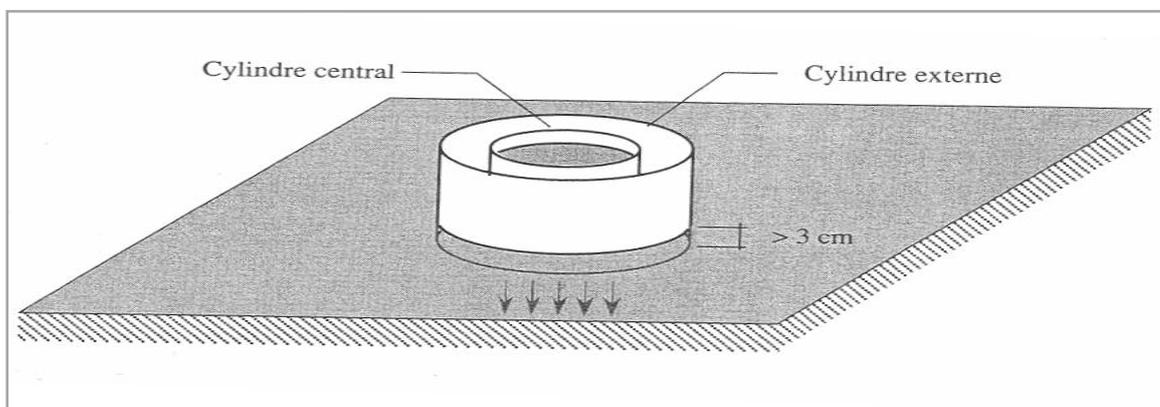


Figure 8. Infiltromètre de Guelph (Musy et Soutter, 1991).

Figure 9. Infiltromètre à double anneau, d'après (Musy et Soutter, 1991).



3. Évolution des sols sableux

Les sols de la région d'Adrar se caractérisent par une texture grossière et une teneur en matière organique quasiment nulle, même son apport sous forme d'amendement est rapidement épuisable à cause de la minéralisation directe. Ces caractéristiques confèrent aux sols de la région des propriétés physico-chimiques très modérées. La mise en valeur des ces sols conduit à la dégradation physique, chimique et biologique (figure 10).

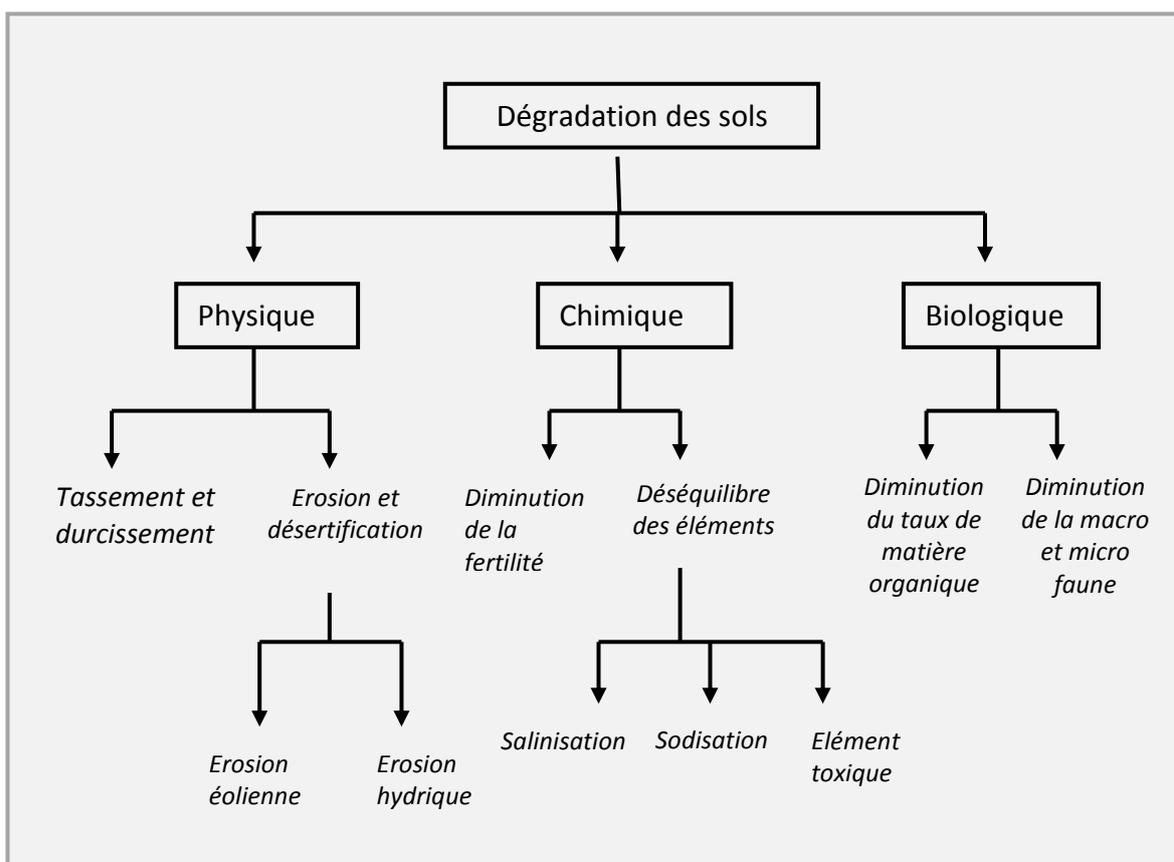


Figure 10. Types et processus de dégradation des sols (Lal et Stewart, 1990).

En plus de ces contraintes, d'autres contraintes sont apparues suite à la mauvaise gestion de ces sols et l'irrationalité dans l'utilisation des eaux d'irrigation, ce sont la salinité secondaire, la sodicité et les carences en éléments nutritifs (Laaboudi et Chabouni, 2011).

Le seuil de rentabilité de la production de blé sous pivot est fixé à un rendement de 35 q/ha. C'est la raison pour laquelle de nombreux agriculteurs ont abandonné leurs terres.

Il en résulte donc, une régression des superficies emblavées de production de céréales correspondante (figure 11).

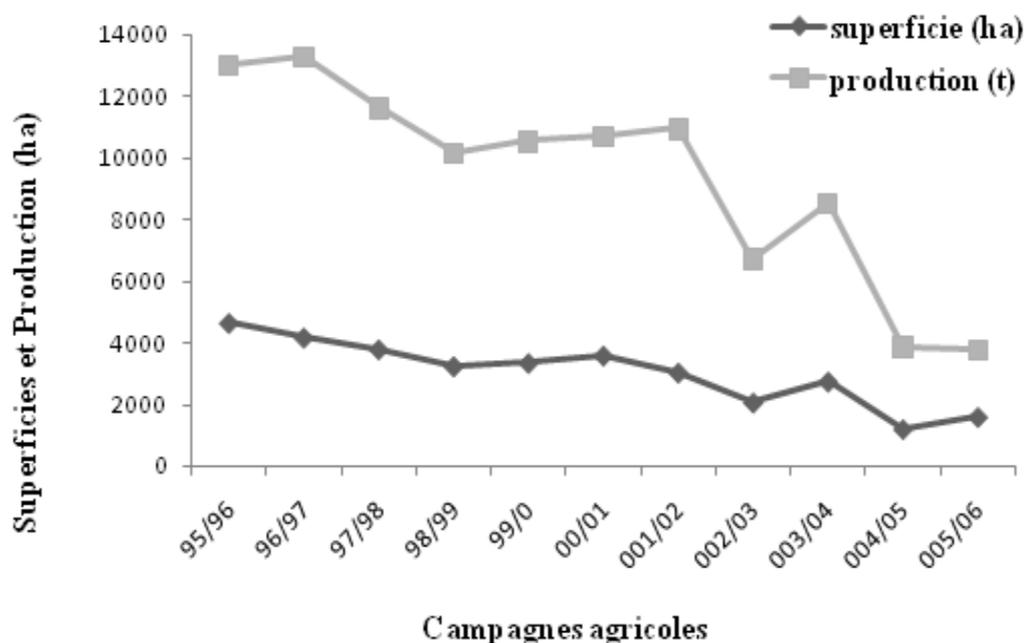


Figure 11. Evolution de la superficie et la production des céréales sous pivots (Wilaya d'Adrar) (Laaboudi et Chabouni, 2011).

3. 1. Evolution physique

Il est évident que l'aménagement agricole inapproprié des terres conduit à la dégradation des propriétés physiques de sols sableux dans plusieurs régions arides et semi-arides dans le monde (Wei et *al.*, 2006 ; Alvaro-Fuentes et *al.*, 2007). Le durcissement, les croûtes de battance et la compaction sont les formes de dégradation des terres, associées à une faible agrégation et une faible stabilité structurale, qui causent une diminution de la macroporosité et par conséquent diminution de la rétention en eau et de la perméabilité ainsi une limitation de la croissance racinaire (Materchera, 2009). Le travail du sol et les techniques d'irrigation peuvent également contribuer à la dégradation des sols (figure 12).

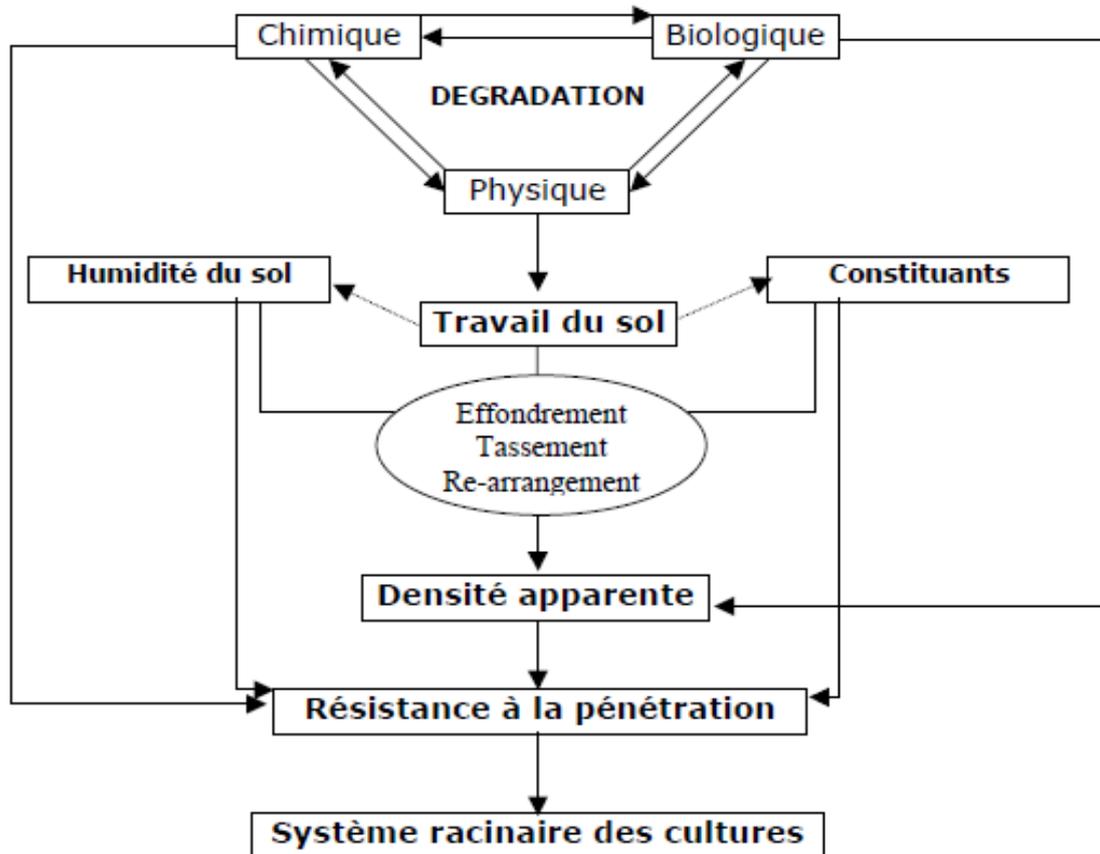


Figure 12. Interactions des mécanismes et conséquences de la dégradation physique (Lesturgez, 2005).

Les sols sableux, initialement organisés dans une structure particulière fortement aérée présentent des densités apparentes moyennes et une abondante porosité structurale et texturale. Cette porosité rend ces sols faiblement résistants à la pénétration à l'état naturel. Cependant, leur mise en valeur engendre une évolution qui se manifeste par des contraintes physico-chimiques qui peuvent affecter les rendements des cultures et la durabilité de l'utilisation de ces terres (Lesturgez, 2005).

3. 1. 1. Durcissement des sols (Hardsetting)

Le durcissement se réfère au processus par lequel le sol se durcit et passe à un état déstructuré après une ultra dessiccation de ce sol qui a subi une saturation rapide par une irrigation excessive ou de fortes précipitations (Mullins et al., 1990). Lorsque, le sol se dessèche et se durcit, il présente une densité apparente élevée, une grande résistance à la pénétration et une grande résistance à la traction (figure 13) (Lal et Chukla, 2004).

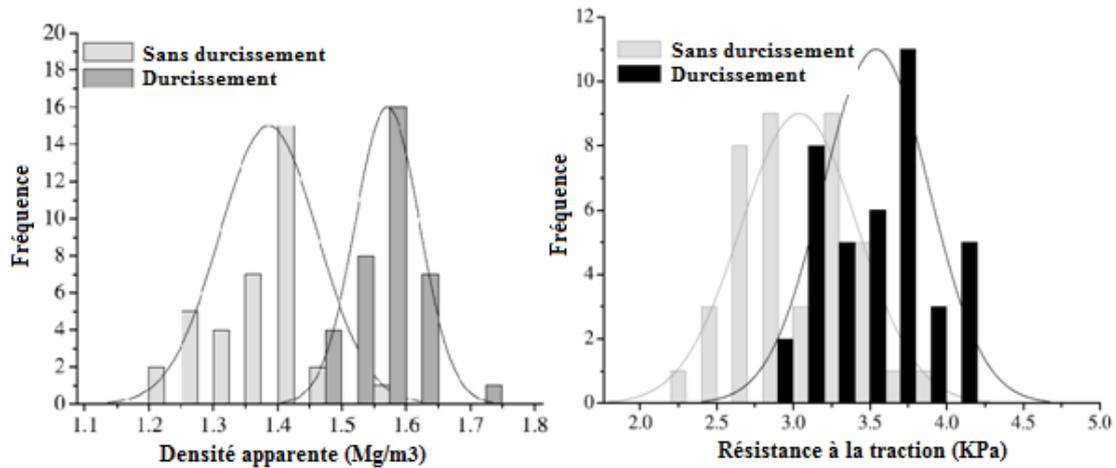


Figure 13. Distributions de fréquence pour la résistance à la traction et la densité apparente des horizons durcis et non durcis (Fabiola et *al.*, 2003).

Ces sols durs mal structurés sont très répandus en Australie. Par ailleurs, il a été montré par Chan (1995), que ce critère de durcissement est utilisé par Northcote, (1979) comme paramètre de diagnostic de la classification des sols en Australie.

Selon Northcote (1979) cité par Chan (1995), le durcissement rend le sol compact, dur et présente de grosses mottes massives en conditions sèches. Mullins et *al.* (1990) ont examiné le comportement, l'apparition et l'aménagement des sols affectés par le durcissement et ont conclu que ces sols n'existent pas seulement en Australie mais sont également fréquents dans d'autres parties du monde notamment en Afrique (Nigeria) (Ley et *al.*, 1993).

À cause de l'instabilité de l'humectation, les sols cultivés deviennent des masses homogènes dures en conditions sèches (Lal et Shukla, 2005). Le sol peut être assimilé à du béton et présente des contraintes physiques telles que la diminution de l'infiltration et la battance (Chan et Sivapragasam, 1996). Par ailleurs, il a été montré par Materechera (2009), que le durcissement traduit une importante augmentation de la résistance à la pénétration, une diminution de la perméabilité et l'aération en condition sèche, ajouté à cela la diminution de capacité de rétention en eau (Chan, 1995).

Lesturgez (2005) a montré que le processus de durcissement passe dans un premier temps par l'effondrement de la structure puis le durcissement. Ceci peut être dû au fait que les itinéraires techniques adoptés tels que l'irrigation, le travail du sol et l'incinération des résidus de cultures (cas de la région d'Adrar), conduisent à la

diminution du taux de matière organique, la stabilité des agrégats, l'augmentation de la densité apparente et par conséquent la diminution de la porosité et l'augmentation de la résistance à la traction (Mullins et al., 1990).

Les observations des lames minces par Fabiola et al.,(2003) sur le phénomène de durcissement (figure 14) montrent des variations de proportions entre les grains, le plasma et les pores dans un horizon non durcis et un horizon durcis. De Grandes variations observées de la porosité totale obtenue par l'analyse de l'image des lames minces. Une réduction remarquable de la porosité pour l'horizon durcis (31%) comparé à l'horizon non durcis (38%). En outre, la taille des pores est plus petite dans l'horizon durci.

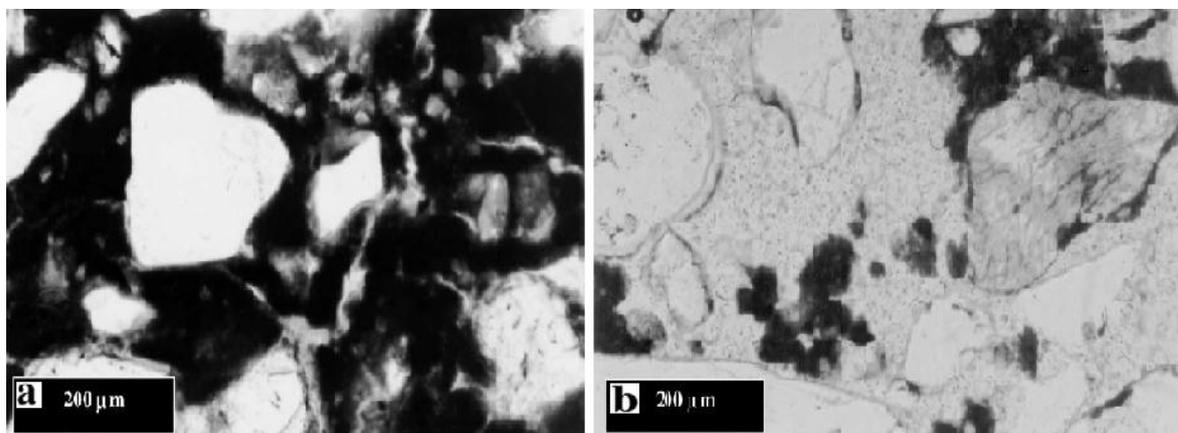


Figure 14. Sections de l'arrangement structural des particules pour des horizons non durcis (a) et durcis (b) (Fabiola et al., 2003).

3.1.2. Compaction des sols

La compaction du sol est un processus par lequel les particules du sol se réarrangent, se resserrent l'une à l'autre et réduisent les vides, ce qui favorise l'augmentation de la densité apparente et la résistance à la pénétration (Hamza et Anderson, 2002). Cette déformation qui résulte de la compaction est dû à la diminution de la macroporosité, de la circulation de l'eau et des échanges gazeux. Le degré de sévérité de la compaction du sol est exprimé en termes de densité apparente, de porosité totale et d'indice des vides. Cela peut induire par conséquent une augmentation de la résistance à la pénétration et la diminution de la rétention en eau du sol (figure 15) (Mouazen et al., 2003).

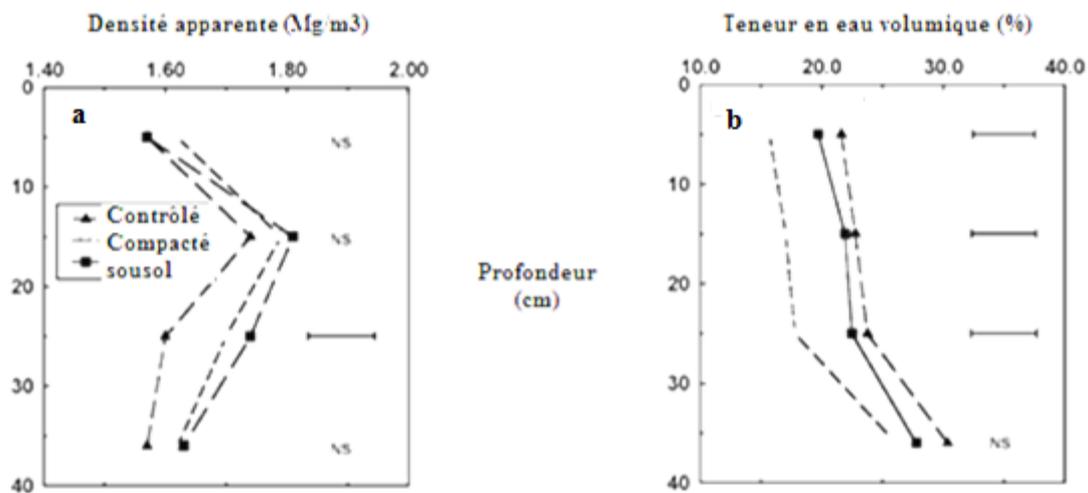


Figure 15. Les effets de la compaction et du travail sur la densité apparente (a) et la rétention en eau (b) en fonction de la profondeur d'un sol sableux (Motavalli *et al.*, 2003).

L'ampleur de compaction des sols dans le monde est d'environ 68 millions d'hectares des terres agricoles à cause de la mécanisation (Florws *et al.*, 1998 in Hamza et Anderson, 2005). Toutes les textures sont sensibles à la compaction. Il existe une nuance en fonction de l'homogénéité de la taille des particules. Un sol composé de particules de tailles différentes a tendance à se compacter plus qu'un sol de particules similaires. Les petites particules ont tendance à se positionner entre les plus grandes (figure 16), C'est ainsi que les petites particules remplissent les vides laissés par les plus grandes. Le degré de compaction d'un sol est lié aussi à son état d'agrégation car la compaction altère l'arrangement spatial de la taille et la forme de mottes et d'agrégats et par conséquent les pores inter et entre ces unités (Hamza et Anderson, 2005).

Les sols sableux en particulier sont sensibles aux tassements, en raison leur faible activité structurale qui limite la régénération de la structure par les phénomènes naturels de retrait-gonflement (Motavalli *et al.*, 2003). Le tassement des sols et les fortes densités qui en résultent sont le plus souvent attribués à l'utilisation de matériaux lourds, en particulier à leurs passages répétés à une humidité au champ favorable à la déformation du matériau (Flower et Lal, 1998) (photo 3).

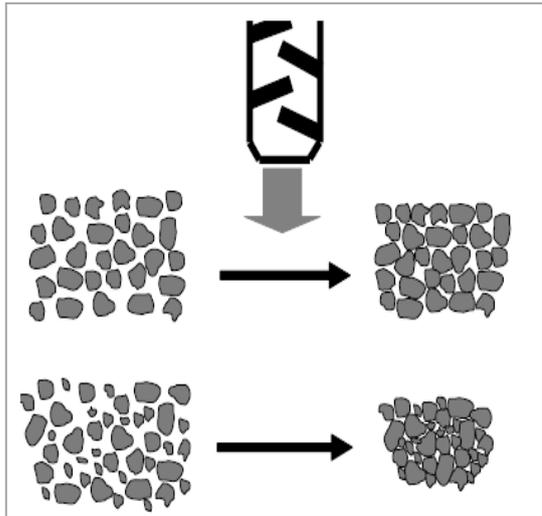
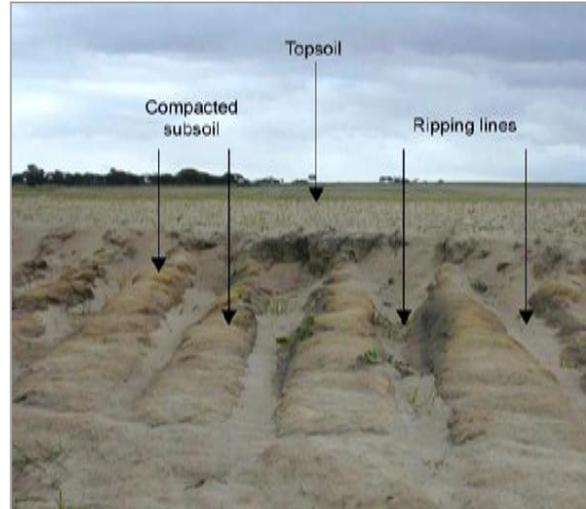


Figure 16. Le tassement selon l'homogénéité de la taille des particules.



Photos 3. La compaction d'un sol sableux (Hamza et Anderson, 2005).

Les sols sableux sont très sensibles à la dégradation physique. Ils sont sujets à une densification intense et quasi-inévitable dès lors qu'ils sont mis en culture. Les conséquences de cette densification sont exprimées en terme de résistance à la pénétration du fait des propriétés de leurs constituants (assemblage serré, durcissement).

L'eau d'irrigation excessive, le choix de l'outil de travail du sol et le nombre de passages des engins au champ semblent être les facteurs principaux de ces phénomènes de tassement. Lorsque la stabilité du sol est très faible au moment des travaux des sols (notamment si la teneur en eau est forte), la structure du sol peut être fortement affectée (Lesturgez, 2005).

La compaction se résume par la formation d'une structure massive avec très peu de macropores. L'absence de biopores et la continuité de la phase pleine ont comme conséquence une augmentation significative de résistance à la pénétration, de l'augmentation de la densité apparente (figure 17) en limitant la croissance des racines de la plupart des cultures (Amptorter et *al.*, 2007).

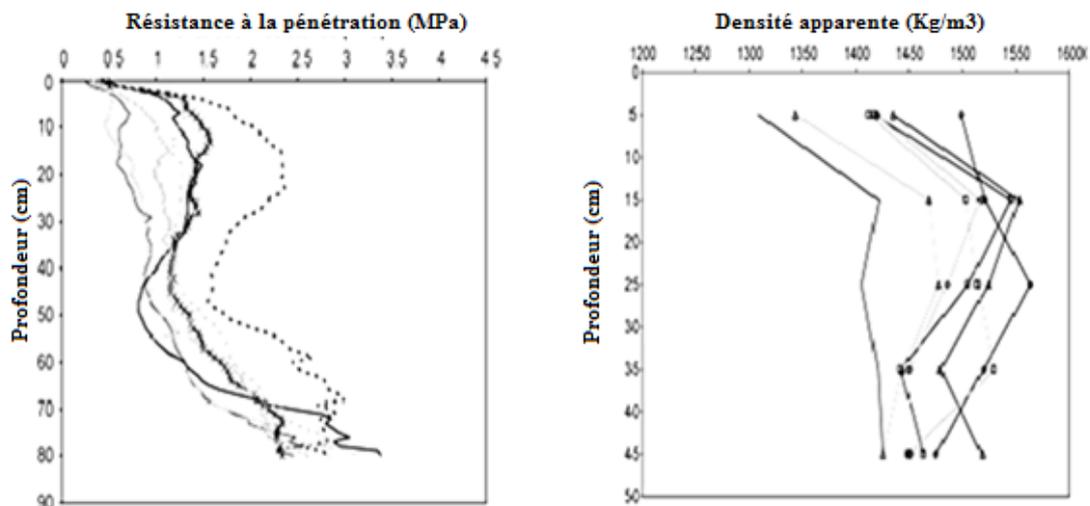


Figure 17. La résistance à la pénétration (a) et la densité apparente (b) d'un horizon compact sous différents traitements (Ampoorter et *al.*, 2007).

Le degré de compaction du sol est souvent déterminé par la mesure de résistance à la pénétration, qui est la mesure de la résistance à la traction du sol ou la résistance à la déformation. Soil Survey Division Staff (1993) in Lal et chukla (2004) ont défini la résistance à la pénétration comme la capacité du sol dans son état confiné à résister à la pénétration d'un objet rigide. En addition à la résistance à la traction du sol, la résistance à la pénétration aussi dépend de la forme, la taille et l'orientation de l'axe de l'objet de mesure.

3.1.3. Croûte de battance

Il a été prouvé par Yair et *al.*, (2011) que les sols sableux sous les conditions de pluies orageuses et le mode d'irrigation par aspersion, développent une épaisse croûte de battance, cette croûte peut absorber et retenir une grande quantité d'eau et limite la profondeur que l'eau peut atteindre et sa disponibilité aux plantes.

Pour Le Bissonnais et *al.*, (2005), la battance traduit la sensibilité des sols à la fermeture de la porosité, formant une croûte superficielle qui colmate la surface du sol et réduit l'infiltration de l'eau. Il a par ailleurs été démontré que sous l'effet de la pluie et de l'irrigation, la battance se traduit par une augmentation de la densité apparente de la couche superficielle du sol, due à une réorganisation des particules qui ont tendance à se déposer parallèlement à la surface (Escadafal, 1981; Boifin, 1976). En effet, la disponibilité de l'eau aux plantes a une grande dépendance de la relation entre l'eau d'irrigation et les propriétés physique de la surface du sol (Yair et *al.*, 2011).

La croûte de battance est riche en particules fines et en microorganismes de toutes variétés. Certains auteurs comme Verrechia et *al.* (1995) et Yair et *al.*, (2011) considèrent que les fines particules et les microorganismes de types cyanobactéries qui ont la propriété de se gonfler rapidement après leur contact avec l'eau. Le gonflement de ce type de microorganismes peut bloquer la porosité du sol et limiter l'infiltration de l'eau. Ces auteurs ont montré que plus de 40 % des micropores peuvent être bloqués par le gonflement de cyanobactéries.

La distribution de la taille des particules d'après les travaux de Verrechia et *al.*, (1995) dans les sols sableux montre qu'il y a une concentration plus importante de limon et d'argile dans la croûte de battance que dans le reste du profil.

Plus de 70 % de sols sont affectés par la croûte de battance dans les régions arides et semi arides. Certains auteurs comme Belnap (2002) et Zhao et *al.*, (2010) considèrent que ce phénomène joue un rôle important dans plusieurs écosystèmes désertiques lorsqu'il protège le sol contre l'érosion éolienne ; en gardant le sol avec des particules fines riches en éléments nutritifs et en carbone organique.

3.2. Evolution chimique

3.2.1. Salinisation

La salinisation est l'accumulation excessive des sels solubles (chlorures, sulfates, carbonates, de calcium, de sodium, de potassium ou de magnésium) dans la partie superficielle des sols (Forges, 1972). Lorsqu'elle est liée à la nature géologique du terrain, on parle de salinisation primaire par opposition à la salinisation secondaire, liée aux pratiques anthropiques telles que l'irrigation.

Les facteurs de la formation des sols salés sont nombreux. Ils peuvent être purement climatiques et naturels (température, niveau des précipitations, absence du drainage, composition de la roche mère) ou induits par l'homme (utilisation de l'eau saline dans l'irrigation, amendements excessifs) (Salim et Tessier, 1998).

3.2.1.1. Effet de la salinité sur le sol

Les cations sodium tendent à provoquer la destruction de la structure en favorisant la dispersion des colloïdes minéraux. D'une façon générale, la dispersion dépend de la quantité de cations Na^+ adsorbés par rapport aux autres cations échangeables en particulier le Ca^{++} . Donc cette augmentation favorise la dispersion (figure 18).

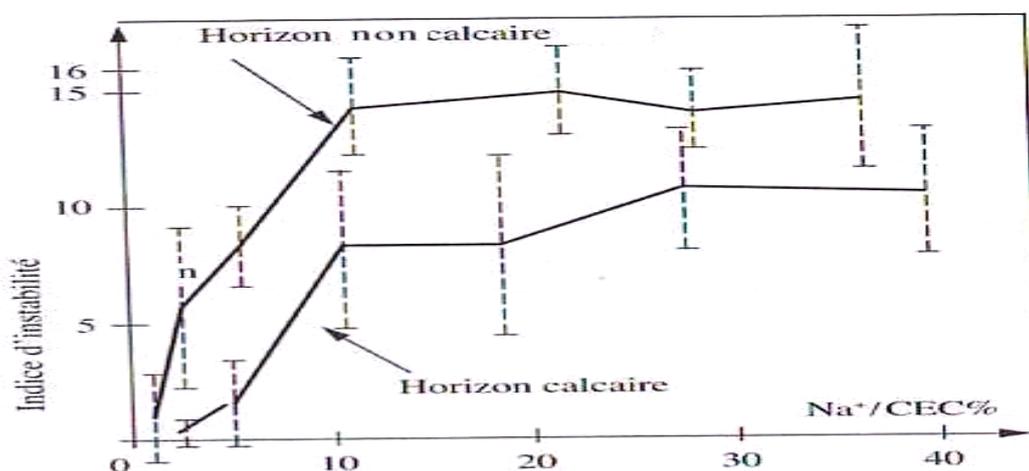


Figure 18. Liaison entre dispersion et teneur relative du complexe adsorbant en sodium (Pons et Gerbaud, 2005 ; in Hadj miloud, 2010).

3.2.1.2. Effet sur les plantes

Les grandes concentrations en sels dissous dans la solution du sol ont des effets indirects sur les végétaux par leur action sur la structure du sol et la circulation des fluides et de l'oxygène. Elles ont des effets directs sur la croissance et le développement des plantes. Les effets néfastes des sels sur les végétaux ont plusieurs causes dont aucune ne semble être dominante :

- ❖ La pression osmotique élevée de la solution du sol qui limite la biodisponibilité de l'eau.
- ❖ La pression osmotique intracellulaire élevée due à l'absorption des sels et qui aurait des effets inhibiteurs sur la croissance.
- ❖ La toxicité propre de certains éléments chimiques liée à leur quantité excessive, comme le bore et surtout l'anion chlore (Rouahna, 2007).

Les sols affectés par les sels sont souvent pauvres en éléments nutritifs essentiels. La croissance et le rendement des cultures (figure 19) sont plus faibles lorsque la nutrition

minérale est insuffisante ou déséquilibrée. Par exemple, l'assimilation des éléments minéraux par le blé, qui est une culture modérément tolérante aux sels, peut être inhibée en présence de fortes teneurs en sels accumulées en fonction du temps.

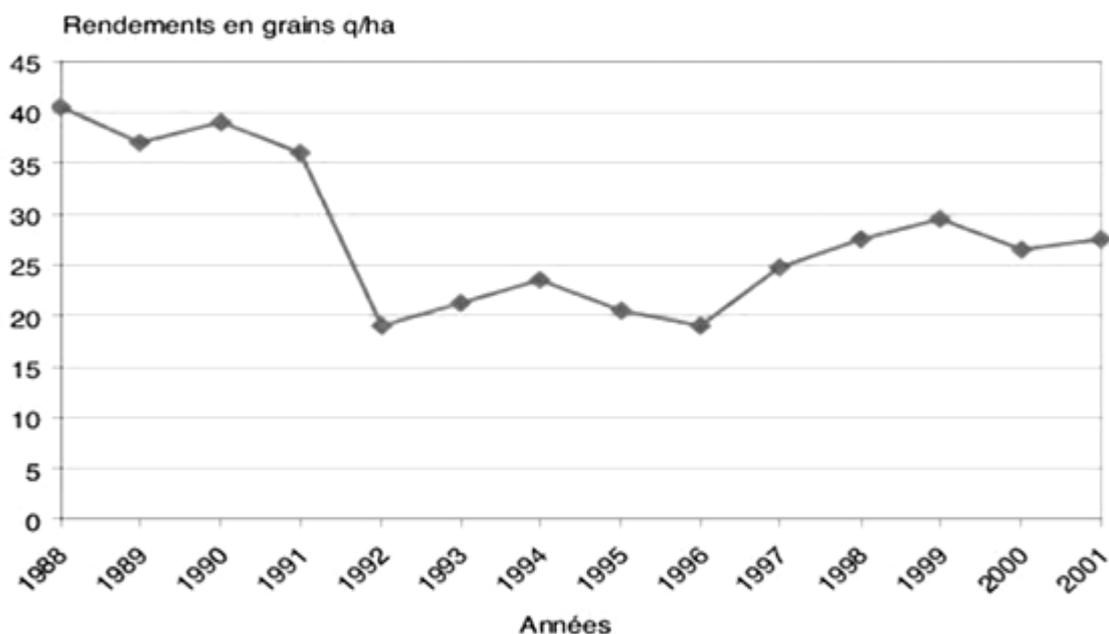


Figure 19. Évolution du rendement moyen en grains en fonction du temps dans la région de GassiTouil (Djili et *al.*, 2003).

3.2.1.3. Salinisation secondaire

C'est un processus d'enrichissement d'un sol en sels solubles causé par l'approvisionnement en eau par l'irrigation et qui aboutit à la formation d'un sol salin. Les paramètres de caractérisation de la salinité de l'eau d'irrigation et du sol sont la conductivité électrique à 25 ° C et /ou la quantité totale de sels dissous (Durand, 1961)

Les pratique de l'irrigation dans les régions sahariennes est totalement empirique ; elle provoque un gaspillage de l'eau et engendre une salinisation secondaire intense des terres. Il a par ailleurs été montré par Djili et *al.* (2003) que le niveau de salinité atteint après 5 campagnes d'irrigation à l'eau de la nappe de l'Albien dépasse le seuil de tolérance des cultivars de blé dur habituellement utilisés dans ces régions. La région d'Adrar est plus touchée par la salinisation secondaire et l'accumulation des sels solubles en raison de forte demande évaporative et l'irrigation excessive (Laaboudi, 2001).

D'après les résultats de Ziza (2006) dans la région d'Adrar, l'eau d'irrigation de la nappe albienne est relativement moins salée, sa conductivité électrique est inférieure à 2dS /m. La salinisation peut aussi être causée par la remontée capillaire des eaux souterraines salines ou résulter d'une irrigation réalisée avec une eau saline.

3.2.1.4. Sodisation ou Alcalinisation

La sodisation ou l'alcalinisation est caractérisée par une fixation abondante du sodium échangeable sur le complexe absorbant du sol. On détermine la sodisation par le pourcentage de sodium échangeable ESP (Exchangeable Sodium Percentage) par rapport à la capacité d'échange des cations ((IPTRID, 2006).

3.2.1.5. Dynamique des sels

Les sels solubles dans le sol sont en perpétuelle évolution, leur évolution dépend de plusieurs facteurs à savoir les saisons, le climat et la présence d'une nappe salée (Hadj miloud, 2010). D'après Halitim (1988), il existe trois types de profils salins en zone aride de l'Algérie semblables aux profils salins décrits par Servant (1975), les profils descendant, ascendant, convexe.

- **Profil descendant**

Le maximum de salinité se situe dans la partie inférieure du profil. Il indique qu'en général, le profil a subi une phase de lixiviation des sels solubles (figure 20 a).

Dans le cas des terrains irrigués le mouvement descendant des sels entraînés par les eaux d'irrigation fréquentes et plus important, ce qui donne un profil de salinité croissant de la surface aux couches profondes (figure 20 a).

- **Profil ascendant**

En absence d'irrigation et d'une pluviométrie faible, les sels dans les sols non irrigués se comportent inversement au profil descendant. Le mouvement ascendant des sels est dominant, il est stimulé par la forte demande climatique et les remontées capillaires d'une nappe phréatique permanente proche de la surface (figure 20 c).

- **Profil convexe**

La partie médiane du profil correspond à un maximum de salinité. Les profils concernés par ce mode de distribution des sels sont en général des sols dont la dynamique saline est caractérisée par une remontée capillaire et une lixiviation des sels (figure 20 b).

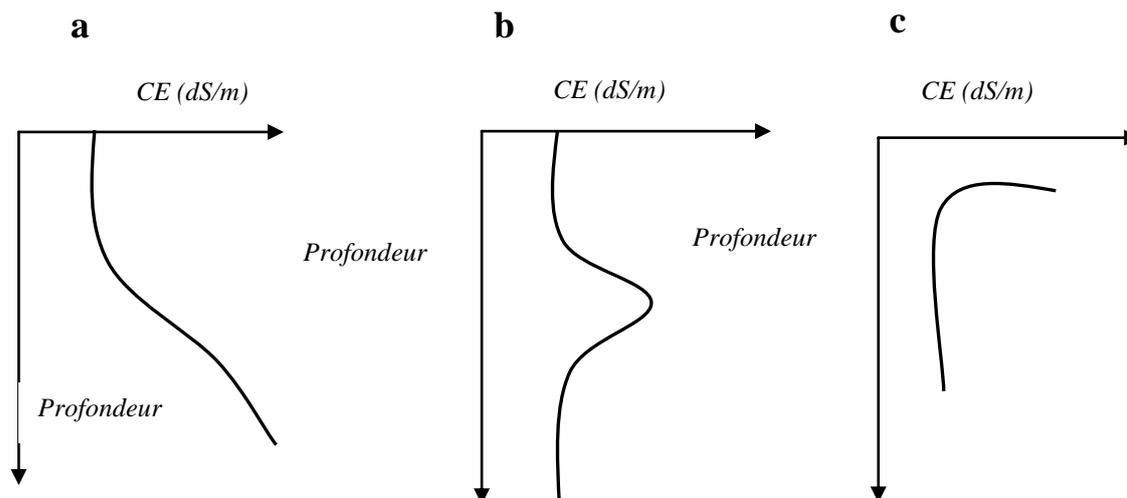


Figure 20. Les différents types de profils salins : (a) profil salin (descendant) ; (b) profil salin (Convexe) ; (c) profil salin (Ascendant) (Servant, 1975).

3.2.1.6. Salinité des sols dans la région d'Adrar

D'après l'étude de classification des sols faite par Boucenna et Berrachedi (2004), on a pu distinguer la classe des sols halomorphes dans les différents périmètres oasiens : Tsabit ,Bekkou , OuledAissa, Ksar Kaddour, Inguellou ,Ben zita1, Ben zita, Palmeraie d'Ofraine, Palmeraie de Ouled Rached, Palmeraie de Ouled Mahmoud.

Ces sols se caractérisent par une forte salinité qui peut atteindre 57dS/m. Cette salinité a pour origine le matériau parental et l'accumulation de sels produite pendant des anciennes périodes. Le degré de salinité n'est pas en relation avec la texture ou la profondeur des horizons. La salinité est de type chloruré-sodique (Na Cl).

Les teneurs en calcaire total varient entre 4 et 32 % pour le calcaire actif il est de 3 à 14 %, le gypse s'observe dans la plupart des sols en quantités variables de 5 à 19 % sous formes de cristaux ou des tâches blanchâtres. La solution du sol est moyennement alcaline, le pH oscille entre 7.9 et 8.

Selon Ziza (2006), le risque de sodicité est faible dans le plateau de Baamar qui s'éloigne de la région d'étude de 160 km environ. Cependant, les teneurs en chlorures et en sodium restent excessives en mode d'irrigation par aspersion. Par ailleurs la salinité est plus accentuée dans les dépressions et les anciennes palmeraies.

3.2.2. Lixiviation des sels dans les sols sableux

Les sols sableux de la région d'Adrar sont caractérisés par une fertilité réduite et une capacité de rétention en éléments minéraux très faible (Laaboudi et Chabouni, 2011). Cette faible fertilité constitue une des contraintes de la production agricole dans cette région, elle est due essentiellement à l'entraînement des éléments minéraux en solution par les eaux de drainage. L'irrigation des sols sableux contribue à l'entraînement et à l'accumulation de l'azote nitrique et autres éléments en solution des couches supérieures vers les couches profondes, l'augmentation de la lixiviation est directement liée aux épisodes d'irrigation et aux taux de fertilisation (Silva, 2006) (figure 21).

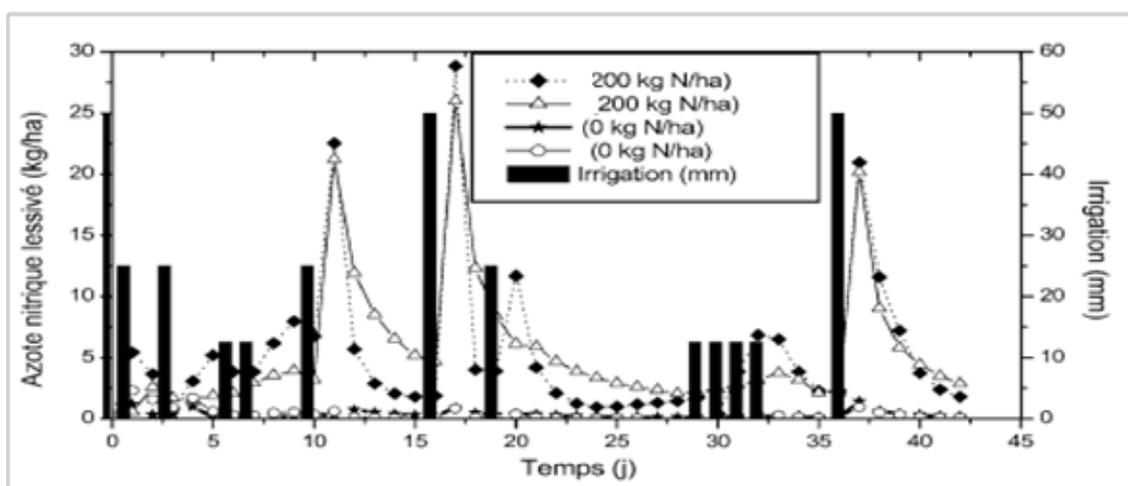


Figure 21. Quantités d'azote nitrique lixiviées proportionnellement relatives aux niveaux de l'irrigation et la fertilisation (Ibnoussina et *al.*, 2006).

Les résultats de Ibnoussina et *al.*, (2006) montrent que l'effet de la dose et la fréquence d'irrigation sur le transport de l'azote nitrique en profondeur se traduit par une perte appréciable des nitrates au niveau des couches supérieures et leur accumulation dans les couches profondes pour se retrouver finalement dans les eaux de drainage (soit 191 kg N/ha) lixivié pour une dose d'épandage d'engrais de 200 kg N/ha. Ainsi les pertes de NO_3^- par lixiviation est en grande partie associées à la texture (figure 22) et aux propriétés hydriques de sol (Silva, 2006).

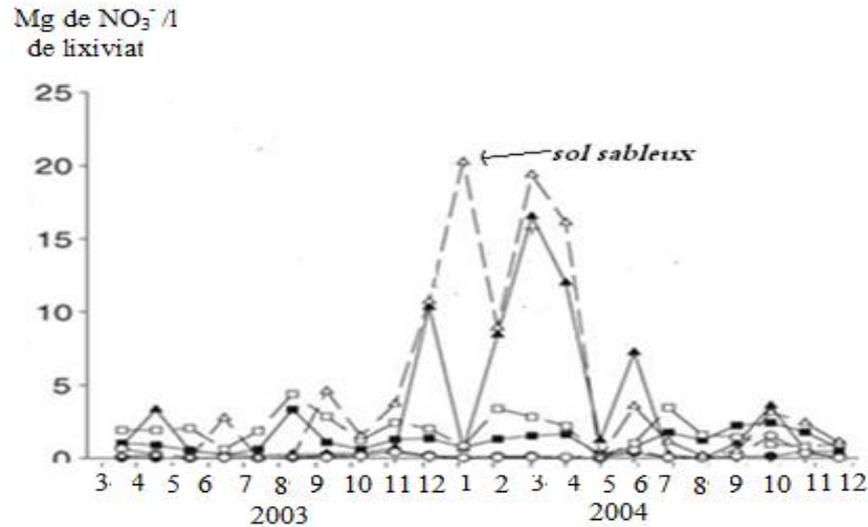


Figure 22. Concentrations mensuelles de lixiviation de NO_3^- dans un sol sableux par rapport d'autres textures limoneuse et argileuse (Silva, 2006).

Les pertes de potassium par lixiviation estimées par Kolahchi et Jalali (2006) sont de l'ordre de 2 mg/l. La concentration de potassium dans les lixiviats reste aussi proportionnelle à la dose d'engrais, la dose d'irrigation et la texture, elle peut atteindre 12.5 mg/l dans les sols sableux.

Le phosphore peut aussi subir une lixiviation importante par un excès d'irrigation dans un sol sableux, Les pertes de phosphore par drainage représentent donc plus de 34 % de la quantité d'engrais apporté (Kang *et al.*, 2011).

Selon Reguig (2007) la lixiviation de magnésium est importante dans les substrats sableux où il enregistre de fortes teneurs (de 0,044 à 0,045 meq/l). Par contre dans la solution drainée des substrats sableux bentonisés à 7 et 10 %, la lixiviation est très faible pour tous les sols cultivés en monoculture blé ou pois chiche avec des valeurs variant de 0,018 à 0,016 meq/l. Pour le calcium selon le même auteur le lixiviat du substrat sans apport de bentonite le calcium lixivié est de 0.027 à 0.042 meq/l. Cependant, les substrats bentonisés à 7 et 10 % de la teneur du calcium lessivé de la solution drainée est de (0.014 à 0.017 meq/l).

Pour les sulfates, Cu et Zn, leurs pertes ne sont pas négligeables, selon Eriksen *et al.* (2002) dans les sols sableux danois. La lixiviation de sulfates atteint 5 kg /ha soit 60 % de la dose appliquée. Chen *et al.* (2006) ont prouvé que la lixiviation des métaux lourds du Cu et du Zn s'étendant de 0.7 à 37.1 $\mu\text{g/l}$ et 5.1 à 205.6 $\mu\text{g/l}$ respectivement.

4. Effet du travail du sol

4.1. Itinéraires techniques adoptés dans la région d'Adrar

Généralement les itinéraires techniques adoptés dans la région d'Adrar diffèrent selon les cultures. Pour la céréaliculture, la préparation du lit de semence commence au mois de septembre et peut s'étaler jusqu'au début du mois de janvier. Les pratiques de préparation du sol passent dans un premier temps par un brûlis des chaumes du précédent cultural, il est d'usage de procéder à une pré-irrigation d'une durée d'environ deux semaines sans arrêt, appelée aussi faux semis. Ce dernier a pour but de favoriser la levée des mauvaises herbes et de faciliter le travail du sol. Lorsque la pression des mauvaises herbes est importante, leur destruction est obtenue chimiquement ou mécaniquement à l'aide d'un passage croisé au cover-crop.

Selon les recommandations des services techniques de l'ITGC, la préparation du lit de semence doit être réalisée en deux étapes. La première comprend un travail profond sans retournement au Chisel, ce qui permet d'obtenir un foisonnement du sol en profondeur favorable au lessivage des sels. La deuxième étape consiste à faire passer l'herse rotative en passages croisés pour créer un état structural favorable et faciliter le travail du semoir.

L'itinéraire pour l'installation de la culture de la pomme de terre comprend une pré-irrigation, un travail profond avec retournement (charrue à soc), un épandage d'engrais de fond, une reprise du labour ou pseudo labour, de façon superficielle pour l'ameublissement de sols, plantation, buttage en 2 fois, pulvérisateur généralement pour les traitements de désherbage et la pulvérisation des engrais foliaires.

4.2. Travail des sols sableux

Le travail du sol affecte les facteurs biotiques et abiotiques du sol, soit directement en modifiant les propriétés structurales du sol comme l'arrangement des vides, la taille des agrégats et la connectivité des pores, soit indirectement en changeant les conditions d'aération, de température et de pénétrabilité du sol par les racines (Van Muysen, 2006).

Dans les systèmes de travail du sol à base de labour, la structure du sol est principalement créée par les opérations de travail du sol tandis que dans les systèmes excluant le labour la structure est principalement créée par l'action du climat et par des processus biologiques (Lal et Shukla, 2004). La structure d'un sol non travaillé est plus homogène

et présente souvent une structure plus massive composée de macro-pores d'origine biologique. Les fissures et les vides sont en général moins importants dans les sols non travaillés.

D'après les travaux de Rasmussen (1999), sur les sols sableux des pays scandinaves, l'un des effets les plus remarquables du système non labouré sur ce type de sol est l'augmentation de la densité apparente dans les couches de subsurface. Cette augmentation de la densité du sol est accompagnée par une diminution du volume des macropores ($>30 -60 \mu\text{m}$) et une augmentation du volume de mésopores ($30- 0,2\mu\text{m}$), mais le volume des micropores ($<0,2 \mu\text{m}$) n'est que légèrement affectée par le système non labouré (figure 23).

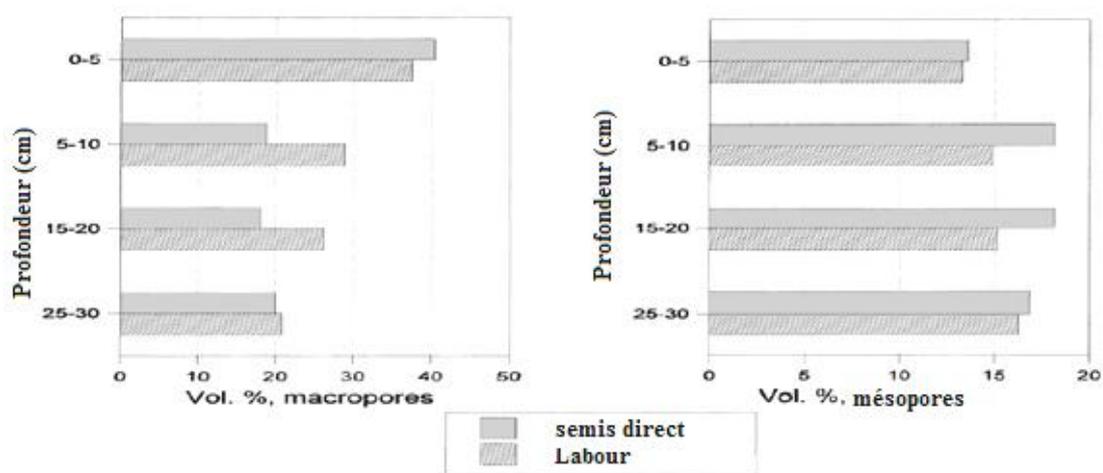


Figure 23. Variation du volume des macropores ($>60 \mu\text{m}$) et mésopores ($60-0.2 \mu\text{m}$) de sol entre le semis direct et le travail dans un sol sableux grossier après 6 ans de mise en culture en orge (Rasmussen, 1999).

L'effet des différentes techniques de travail du sol sur la structure diffère selon le type de sol. Les sols sensibles au tassement, comme les sols sableux, se prêtent moins à l'abandon du labour car leur faible activité structurale limite la régénération de la structure du sol par les phénomènes naturels de retrait-gonflement (Munkholm et al., 2001).

Lorsque le sol sableux est travaillé, la structure particulière et massive poreuse décrite précédemment explose en agrégats relativement petits et sable déliés (Lesturgez, 2005). Cette explosion des agrégats, qui est particulièrement visible à la surface des sols fraîchement labourés, présente une forte porosité. Il constitue une organisation métastable (Hartmann et *al.*, 2002). Après les cycles d'humectations et dessiccations le sol présente des contraintes physiques telles que la compaction, le durcissement et la battance des la couche superficielles. Cependant, le non labour tend à diminuer la porosité totale dans la couche non travaillée (figure 24), particulièrement dans les sols à faible activité structurale comme les sols sableux et les sols limoneux (Rasmussen, 1999).

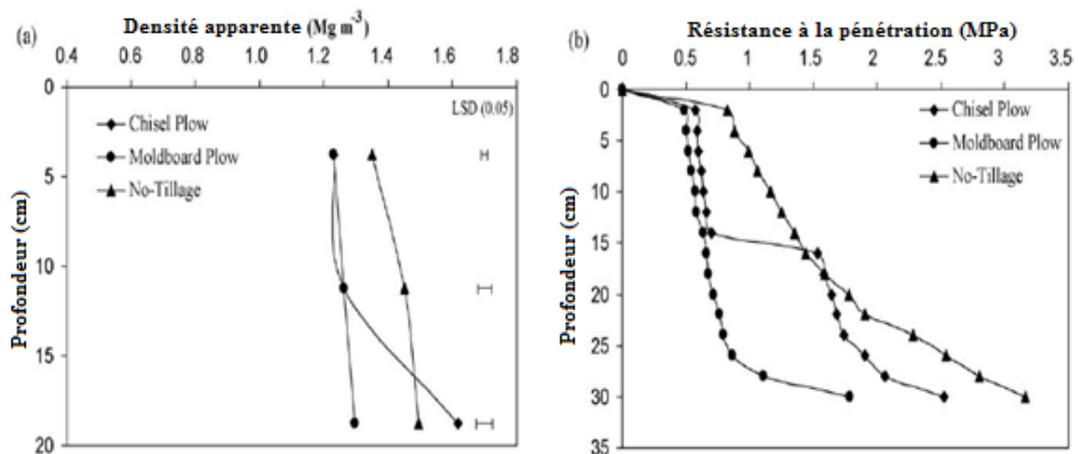


Figure 24. Effets du système de travail du sol sur la densité apparente (a) et la résistance à la pénétration (b) à différentes profondeurs du sol (Mosaddeghi et *al.*, 2009).

La question qui se pose dans ce contexte c'est comment faire le bon choix de l'outillage de travail de ce type de sols vulnérables. A travers cette recherche bibliographique l'effet du mode et l'outil de travail du sol sur les propriétés physiques des sols sableux reste contradictoire. Certains auteurs voient que le labour sans retournement plus convenable aux propriétés des sols sableux et autres ont montré l'inverse.

4.2.1. Travail du sol sans retournement avec outils à dents

Les sols sableux à faible teneur en matière organique et à faible stabilité structurale se consolident pendant la croissance des plants sous l'irrigation. Donc, il est préférable d'utiliser des techniques de labour excluant le retournement de sol telles que le sous soulage et le chiseling. Les outils de ces techniques peuvent décompacter le sol et

réduire au minimum la destruction de la structure de sol en améliorant la vitesse d'infiltration de l'eau (Moroke *et al.*, 2009) (figure 25).

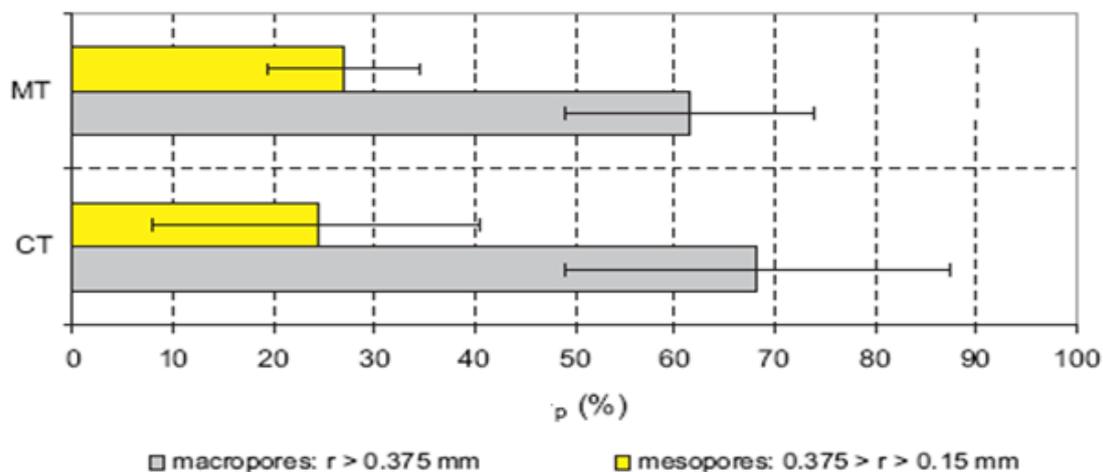


Figure 25. Comparaison de la taille des pores entre le travail minimum et le travail du sol conventionnelle (Castellini et Ventrella, 2012).

Il a été prouvé par Hamza et Anderson, (2008), que le travail superficiel des sols sableux sans retournement avec outils à dents (cultivateur) a un effet positif sur les propriétés physique en diminuant la densité apparente et en augmentant la capacité de rétention en eau. Par ailleurs, la forme et la largeur des dents des instruments peuvent avoir des effets différents sur les propriétés physiques de sol. Ainsi, la vitesse de traction des outils de labour peut pulvériser le sol, ce qui provoque la création de croûtes de battance et la compaction après l'irrigation (Agbede, 2010).

Le labour avec les outils à dents tend à augmenter la densité apparente dans les horizons de profondeur et la diminuer en surface. Cela, peut être dû essentiellement au fait que les résidus de cultures ne sont pas enfouis en profondeur et sont concentrés en surface dans les premiers centimètres de sol, améliorant la structure du sol (Kasper *et al.*, 2009).

4.2.2. Travail du sol conventionnel avec retournement

Le travail conventionnel du sol comprend les pratiques culturales qui ont pour résultat d'enfouir la majorité des résidus de culture se fait avec une charrue à socs, suivi de façons superficielles destinées à préparer le lit de semence avec divers types d'outils. Cette pratique conventionnelle est la plus répandue en agriculture. Cependant, divers chercheurs ont mis en cause cette pratique en raison de ses effets sur la structure du sol, la vie biologique et la stratification de stockage de carbone organique (Carter, 2005).

D'après les travaux qui ont été faits par Hall *et al.* (1994 ; in Willis *et al.*,1997), le labour profond avec la charrue à soc peut augmenter le taux d'argile dans l'horizon de surface de 4 à 5 % comparés avec la sous-soleuse qui peut entraîner une diminution du taux de sable fin dans le même horizon (Willis *et al.*, 1997). Quant à la densité apparente, elle est toujours réduite en profondeur dans le labour avec la charrue à soc comparé avec le chisel qui tend à diminuer la densité en surface et l'augmenter en profondeur (Bonari *et al.*, 1995).

Selon les observations de Munkholm *et al.* (2001) sur des sols sableux, qui comparent le système de labour profond (0-35) sans retournement avec instrument à dents (MIN) et le système de labour profond avec retournement du sol à l'aide d'une charrue à soc (CONV). Il se produit une amélioration remarquable de la structure dans le MIN et une diminution du durcissement. Ainsi, la résistance à la pénétration a diminué de 1800 KPa dans le CONV à 1000 KPa dans le MIN (figure 26). Dans l'horizon de surface il est remarqué une augmentation de friabilité de sol en mesurant un indice de friabilité de 0.16 dans le CONV qui augmente jusqu'à 0.22 dans le MIN.

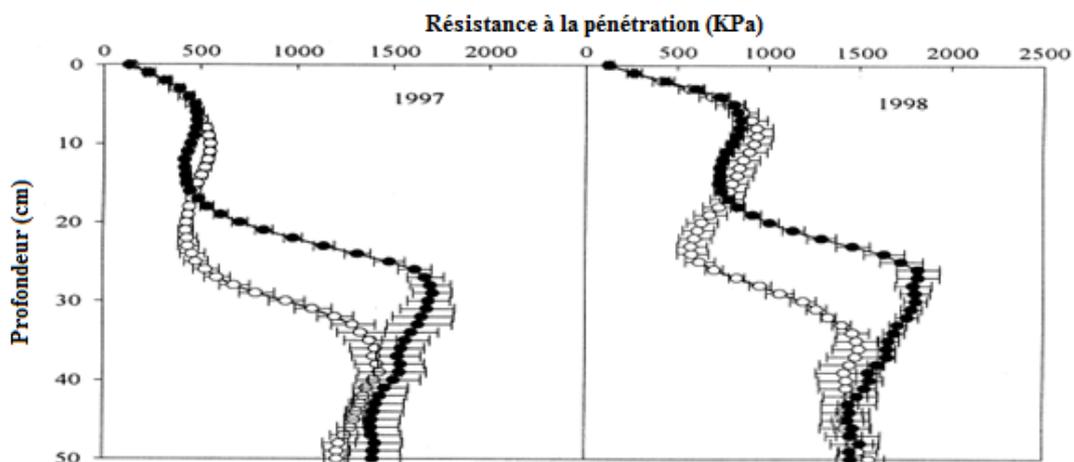


Figure 26. Résistance à la pénétration sous système de travail du sol sans retournement et travail du sol conventionnel classique (- •-) (Munkholm *et al.*, 2001).

Carter *et al.* (1998), ont montré des résultats contraires à ceux de Munkholm *et al.* (2001) en comparant le chisel avec la charrue à soc. Leurs résultats révèlent que la charrue à soc a diminué la résistance à la pénétration à moins de (<1.5 MPa) comparée au chisel(figure 27).

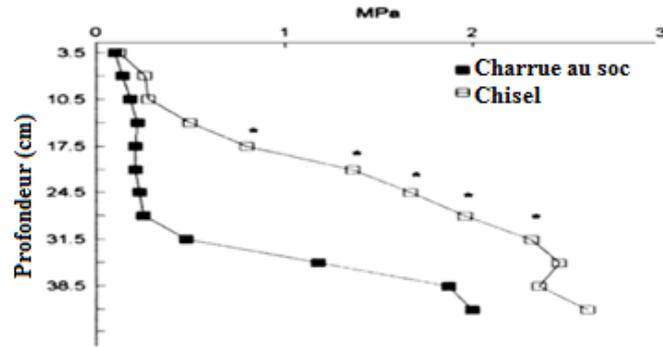


Figure 27. Profils de résistance de pénétration juste avant la plantation de la pomme de terre dans un sol sableux sous labour avec charrue à soc et chisel (Carter et al,1998).

Le labour profond à la charrue conduit à la formation des couches compactes de subsurface (Rosmosen, 1999). Dans une expérience de Meyer et al. (1996) le remplacement de charrue à soc avec le Chisel a donné de bons résultats pour ce qui est de l'amélioration des propriétés physiques du sol : Réduction de l'érosion, des agrégats plus moins stables et la diminution de la densité apparente de la couche de surface. Par contre Diâz-Zorita (2000) a montré que le travail du sol profond avec la charrue ou le chisel diminue la résistance à la pénétration en surface et l'augmente en sub-surface par rapport le travail superficiel et le semi direct, cet auteur a remarqué ainsi que la densité apparente a diminué de 1.14 à 1.10 dans le travail profond (figure 28).

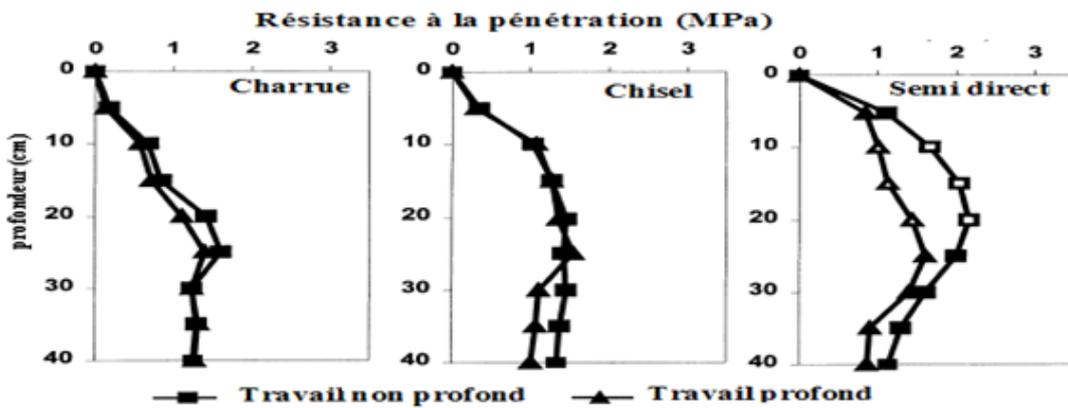


Figure 28. Variation de résistance à la pénétration entre le travail profond et superficiel et en fonction de l'outil de travail du sol (Diâz-Zorita, 2000).

5. Irrigation des sols sableux

Les potentialités hydriques totales en Algérie sont évaluées à 19,2 milliards de m³. Elles se décomposent en 12,4 milliards de m³ d'eau superficielle de la région nord et 5 milliards de m³ d'eau souterraine de la région du Sahara septentrionale (Chabaca, 2007).

La répartition de la superficie irriguée selon les régions et les modes d'irrigation est indiquée au (tableau I). Ce tableau montre l'importance des surfaces irriguées dans les régions d'algerie. Le Sud vient en deuxième position après l'Est, notamment grâce aux zones de mise en valeur des terres.

Tableau I : Modes d'irrigation par région en Algérie (ha) (Chabaca, 2007).

	Est	Centre	Ouest	Sahara	Total	%
Aspersion	32 026	12 625	20 282	21 054	85 987	25 ,45
Localisée	42 272	11 523	22 708	6 672	83 175	24 ,60
Gravitaire	66 801	19 232	14 077	68 777	168 887	49 ,95
Total	141 099	43 380	57 067	96 503	338 049	

La pratique actuelle de l'irrigation est totalement empirique ; elle provoque un gaspillage une ressource en eau qui est non renouvelable au Sahara, et engendre une salinisation secondaire (Djili et *al.*, 2003). L'irrigation dans la région d'Adrar se fait d'une manière excessive avec des doses plus élevées que les besoins des cultures (tableau II).

Tableau II : Besoins en eau du blé sous pivot dans les régions sahariennes (DSA Adrar, 2000).

Mois	Stade végétatif	E.T.P (mm)	KC	Taux de lessivage	Pertes efficiences	Besoins en eau (mm/j)
Nov.	Semis	138	0,65	0,35	0,15	4,5
Déc.	Levée début tallage	87	0,65	0,35	0,15	2,8
Jan	Plein tallage	101	1,15	0,35	0,15	5,8
Fe	Montaison	148	1,15	0,35	0,15	8,5
Mars	Epiaison	191	1,2	0,35	0,15	11
Avril	Maturation	230	0,9	0,35	0,15	10

Le choix du mode d'irrigation a un effet sur l'économie de l'eau et le régime de salinité du sol. Chaque méthode d'irrigation a ses propres caractéristiques qui se traduisent par le mode de distribution de l'eau aux plantes, l'uniformité de l'irrigation et l'effet sur les propriétés de surface du sol. L'irrigation par aspersion (centre pivot) est la méthode d'irrigation la plus répandue dans le monde pour les grandes cultures (Warrick et Gardner, 1983).

5.1. Irrigation par aspersion (pivot)

L'irrigation par pivot, est une technique américaine importée, qui a été implantée dans plusieurs pays arabes touchés par le fait désertique. L'Algérie, la Libye, le Maroc ou encore l'Égypte ont créé des périmètres d'irrigation par pivots. Le gouvernement algérien, dans une optique d'auto-suffisance alimentaire mêlée à une volonté de redynamisation de l'agriculture, a développé ce type d'irrigation. L'idée du gouvernement était notamment d'accroître la production céréalière (Kouzmine, 2003). Cette technique est devenue la plus utilisable car elle est plus automatique, moins fatigante et demande moins de main d'œuvre.

Selon notre enquête sur le terrain, l'introduction du système d'irrigation par pivot au milieu saharien algérien a causé un stress dans les ressources en eau notamment la baisse du niveau d'eau de la nappe qui se manifeste par la disparition de quelques palmeraies et l'assèchement de quelques foggaras. Par ailleurs le manque de données relatives à l'évapotranspiration et aux caractéristiques intrinsèques du sol de la région d'Adrar a conduit à une irrigation plutôt anarchique pour satisfaire les besoins des cultures (Laaboudi, 2001).

Selon notre enquête sur le terrain, dans la région d'Adrar, la rampe d'irrigation est utilisée 24/24 h selon une vitesse de 11.5 h/ tour, et un débit de pompage d'environ 40 l/s, ce qui fait qu'une surface de 30 ha peut consommer plus de 1 200 000 m³ /an, en raison de deux cultures par an. Cette irrigation excessive peut causer une dégradation des propriétés physico-chimiques des sols sableux (Mullins et *al.*, 1990).

Le centre pivot est muni d'asperseurs qui peuvent pulvériser un jet de 8 m de rayon avec un diamètre de gouttelettes de 1.5 à 4 mm pour une pression de 200 kpa en fonction du type des asperseurs et les déflecteurs (Ortiz et *al.*, 2010). Ce mode de pulvérisation de l'eau muni à la rampe d'irrigation qui s'élève environ 2 m au dessus de

la surface de sol peut avoir un effet sur les propriétés physiques de sol (Silva, 2006). Plusieurs études ont été faites sur l'effet de pluies sur la structure de surface de sols et la stabilité des agrégats et la formation des croûtes de battance. Donc on peut admettre que l'irrigation par pivot muni d'asperseurs, peut avoir le même effet que celui de pluies sur les propriétés de surface de sols (figure 29) (Crescimanno et *al.*, 2007).

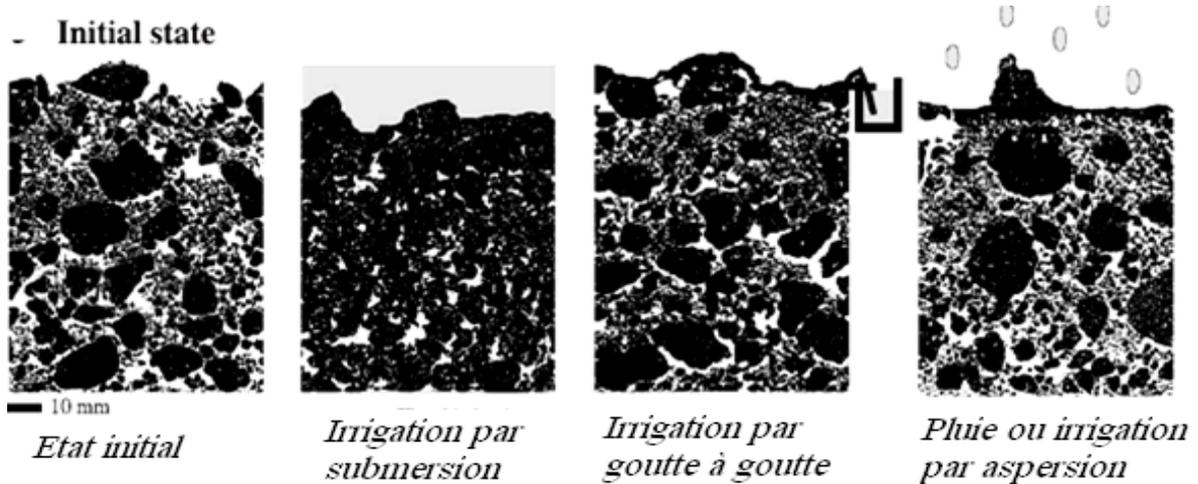


Figure 29. Impact du mode d'irrigation sur la structure du sol (Bresson et Moran, 2004).

L'hétérogénéité de l'irrigation sous pivot conduit à répéter le passage du pivot autant de fois pour combler les points insuffisamment irrigués par les passages précédents. cela conduit à une variation spatiale de distribution de l'eau au sein de la même parcelle accompagné par une variation des propriétés du sol (Seginer, 1979 ; Cogels, 1983 ; Solomon, 1984 ; Ben-Asher et Ayars, 1990) cités par Ruelle et *al.* (2003).

Selon Tarjuelo et *al.* (1999), une uniformité de distribution de l'eau des centres pivots dans les meilleures conditions peut atteindre 78 %. Cette hétérogénéité a un effet sur les ressources en eau et la consommation d'énergie et le rendement des cultures (Dejonge et *al.*, 2007). Il a par ailleurs été prouvé par Ortiz et *al.* (2010) que l'hétérogénéité de l'irrigation est du essentiellement aux types des asperseurs et leurs hauteurs au-dessus de la surface de sol (figure 30).

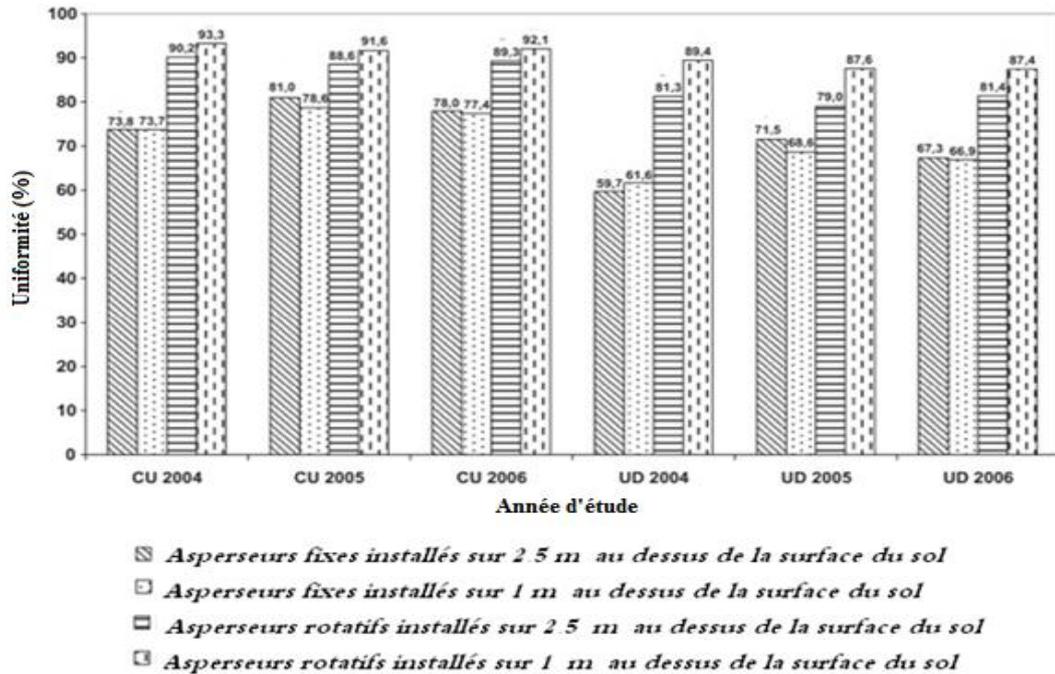


Figure 30. Effet du type de la hauteur des asperseurs sur l'uniformité de l'irrigation Ortiz et al. (2010).

Cette hétérogénéité de l'irrigation, due essentiellement au mode d'arrosage peut influencer les propriétés de sols. Plusieurs auteurs ont étudié les effets des régimes d'irrigation sur la variation des propriétés des sols comme la densité apparente. Lors de l'arrosage, l'énergie apportée par les gouttes va tendre à provoquer l'éclatement des agrégats de surface, au moment de l'impact avec le sol. La stratification des particules mises en suspension peut aboutir à la formation d'une croûte de battance. Selon Silva (2006), l'utilisation de déflecteurs (pièce qui gêne le jet de l'eau) ondulés conduit une uniformité de distribution de l'eau, moins de (83,3%), par rapport aux déflecteurs lisses (90,6%). Cependant, l'énergie cinétique des gouttelettes d'eau dans les déflecteurs ondulés est plus élevée (0.629 kJ/m^2) que dans les déflecteurs lisses (0.558 kJ/m^2). Cette énergie cinétique peut engendrer une compaction et une réduction de la porosité de la couche superficielle du sol. Cet auteur a montré que la perméabilité hydraulique et la densité apparente en cas de déflecteurs lisses diminuent en fonction de la fréquence de l'irrigation (figure 31).

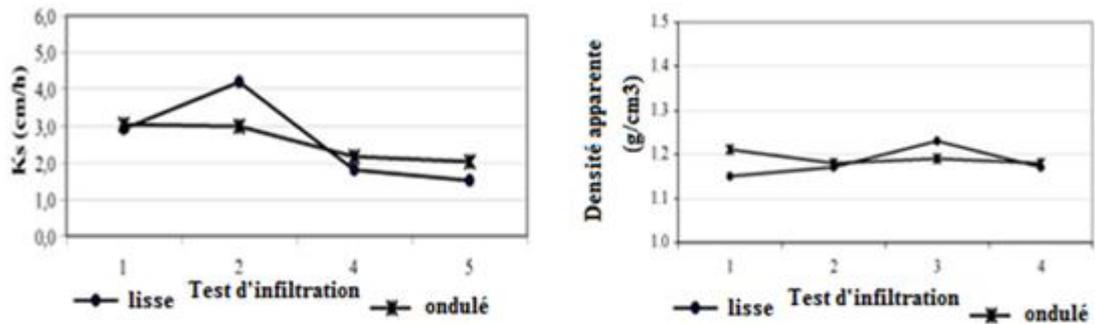


Figure 31. Variation de la perméabilité et la densité apparente en fonction du mode d'arrosage (déflecteur lisse et ondulé) (Silva, 2006)

Divers auteurs ont montré que l'hétérogénéité de l'irrigation par centres pivots peut avoir une influence sur la variabilité spatiale de la salinité (Nahry *et al.*, 2011) et les éléments chimiques du sol (Kolahchi et Jalali, 2006 ; Zotarelli *et al.*, 2006 ; Nahry *et al.*, 2011) (figure 32).

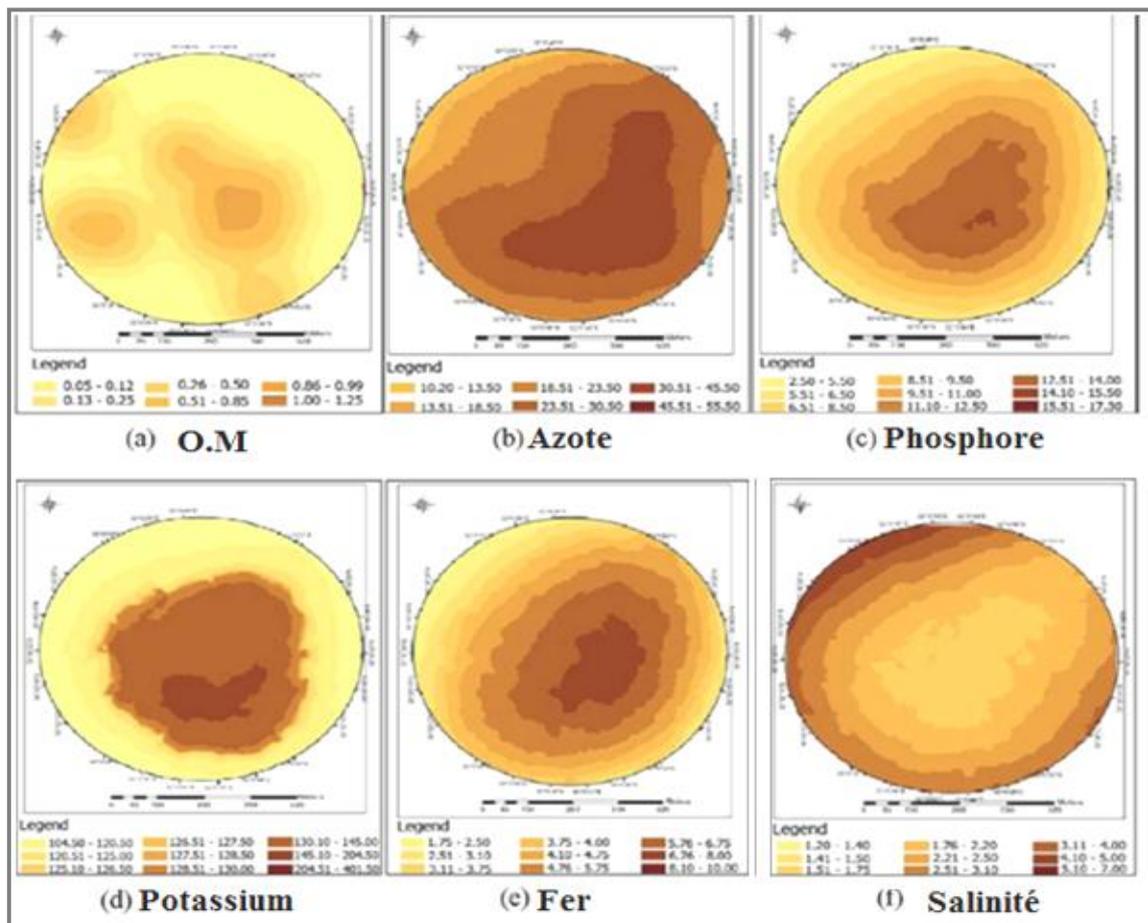


Figure 32. Variabilité spatiale des caractéristiques du sol affectées par l'hétérogénéité de l'irrigation (Nahry *et al.*, 2011).

5.2. Salinisation causée par l'irrigation

L'irrigation altère le bilan hydrique du sol en générant un apport d'eau supplémentaire, cet apport est toujours associé à un apport de sels. En effet, même une eau douce de la meilleure qualité contient des sels dissous et, si la quantité de sels apportée par cette eau peut sembler négligeable, les quantités d'eau apportées au fil du temps entraînent un dépôt cumulé de sels dans les sols qui peut s'avérer considérable (IPTRID, 2006 ; Forges, 1972). L'eau pure est perdue par évaporation mais les sels restent et s'accumulent. Dans les régions arides, l'effet est d'autant plus marqué : les eaux de surface et les eaux souterraines sont relativement riches en sels (parce que l'eau s'est infiltrée dans des sols qui contiennent généralement des minéraux facilement altérables) et le climat sec crée une demande évaporative élevée ce qui se traduit par la nécessité de grandes quantités d'eau pour l'irrigation des cultures (Laaboudi, 2001).

Les terres irriguées salinisées représentent environ 10% de la salinisation due à des actions humaines (qui correspondent à 20% des terres salinisées), Près de 50% des terres irriguées salinisées se trouvent dans la zone aride (IPTRID, 2006).



Photo 4. Salinisation des sols causée par l'irrigation par pivot.

5.3. Qualité de l'eau d'irrigation

L'évaluation de la qualité de l'eau d'irrigation n'est pas une fin en soi, elle est très spécifique aux conditions pédoclimatiques et aux pratiques d'irrigation de la zone. C'est pourquoi il existe plusieurs classifications dans le monde.

Selon de nombreux auteurs (USSL, 1954 ; Ayers et wscot, 1994 ; Ghasmi et *al.*, 1995) cités par (Ziza, 2006), le principal critère pour l'évaluation de la qualité de l'eau d'irrigation est la concentration totale en sels solubles, car la réponse de la majorité des plantes à la salinité est évaluée par la salinité globale plutôt que par l'action spécifique de chaque ion.

Néanmoins, pour toutes les classifications, les paramètres chimiques à prendre en considération pour voir si une eau est de qualité acceptable sont: La conductivité électrolytique qui traduit la concentration totale des sels solubles dans l'eau d'irrigation, la sodicité (SAR) qui traduit la proportion du sodium adsorbé sur le complexe argilo-humique par rapport au calcium et au magnésium, les carbonates, les bicarbonates ainsi que les éléments toxiques.

Le système aquifère saharien comprend la superposition de deux principales couches aquifères profondes : la formation du Continental Intercalaire (CI) qui englobe l'Albien, le Barrémien et le Néocomien est considérée comme la plus importante réserve d'eau souterraine dans le Sahara Algérien et celle du Complexe Terminal, (CT). Ce système recouvre une étendue de plus de 1 million de km² dont 700 000 se trouvent en Algérie, près de 80 000 en Tunisie et 250 000 en Lybie (OSS, 2005). Leurs qualités diffèrent. Les nappes de l'Albien contiennent de 2 à 5 g/l de sels et jaillissent à des températures comprises entre 25°C et 60°C (Chabaca, 2007)

D'après les résultats de Ziza, (2006) relatifs aux caractéristiques chimiques de l'eau d'irrigation de la nappe albienne mettant en évidence un fort risque de salinité et faible danger de sodicité, la teneur en sodium et en chlorure dans ces eaux sont excessives en mode d'irrigation par aspersion.

Conclusion

Les sols sableux, initialement organisés dans une structure particulière fortement aérée présentent des densités apparentes moyennes et une abondante porosité structurale et texturale. Cependant, leur mise en valeur engendre une évolution physico-chimique qui se manifeste par le durcissement du sol, l'apparition des croûtes de battance et la compaction. A travers cette recherche bibliographique nous avons pu conclure que le de l'outil et le mode de travail du sol ainsi, le mode d'irrigation peuvent affecter les propriétés physico-chimique du sol.

CHAPITRE II. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1. Situation géographique

La zone d'étude se situe dans la wilaya d'Adrar dans le Sahara central à 1500 km au sud-ouest d'Alger (figure 33). Sa longitude est de $0^{\circ} 11' E$, sa latitude de $27^{\circ} 49' N$ et son altitude est de 279 m.

La wilaya d'Adrar est très étendue et couvre une superficie de 427 968 Km^2 soit 17,98% du territoire national. Elle est limitée au nord par les wilayas de Bechar, d'El Bayedh et de Ghardaïa, à l'ouest par la wilaya de Tindouf, à l'est par la wilaya de Tamanrasset et au sud par la Mauritanie et le Mali (figure 33). Elle comprend trois zones bien distinctes, le Gourara (Timimoun), le Touat (Adrar) et le Tidikelt (Aoulef).

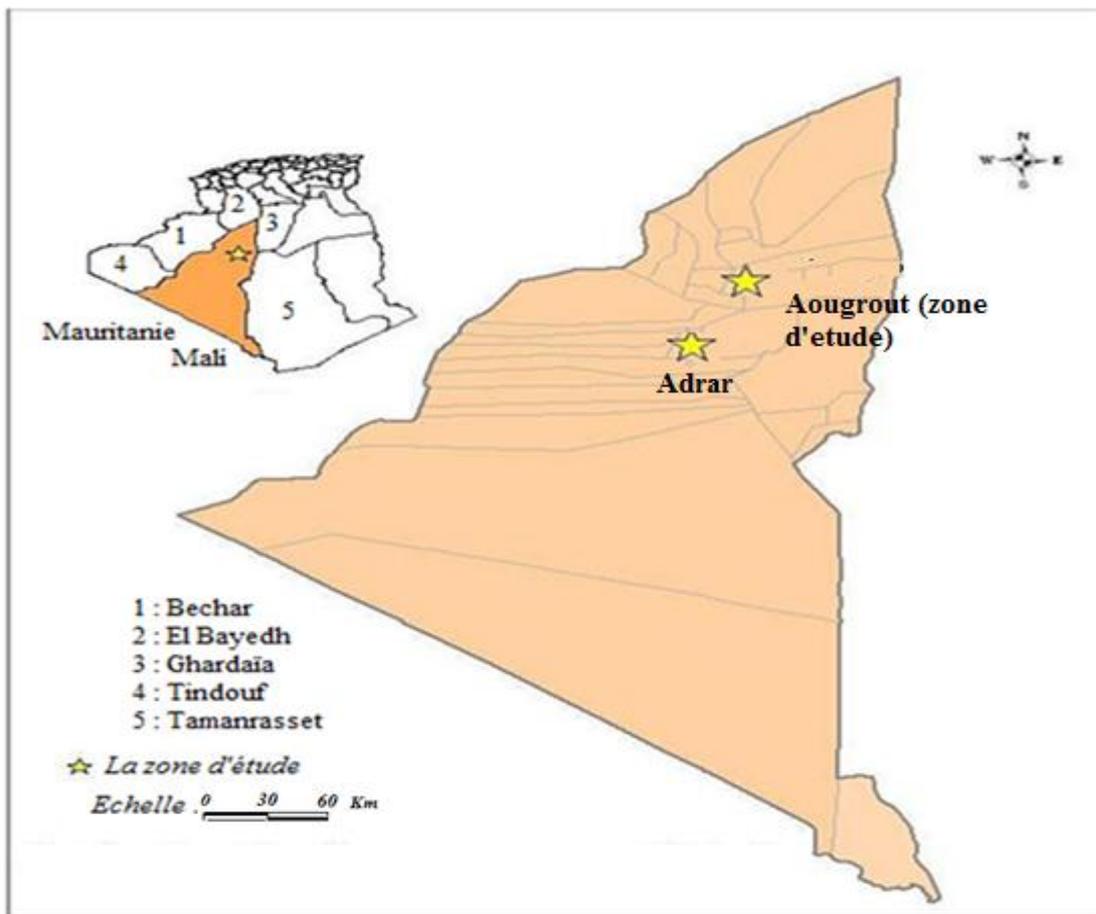


Figure 33. Localisation de la zone d'étude.

2. Le climat

La région d'Adrar est caractérisée par un climat saharien, des précipitations très faibles et irrégulières, de fortes moyennes thermiques quotidiennes comprises entre 20 et 45°C, intégrant des nuits froides et des journées chaudes. De ce fait, la région se classe par le diagramme d'Emberger, modifié par Pouget (1980) dans l'étage bioclimatique saharien à hiver tempéré.

Les données climatiques de la wilaya d'Adrar sont résumées dans le tableau III.

Tableau III. Données climatiques de la station météorologique d'Adrar (1980-2008) (ONM, 2009)

Mois	Température moyenne (°c)	Température maximale (°c)	Température minimale (°c)	Humidité relative (%)	Précipitations(mm)	Vitesse du Vent (km/j)
Janvier	12,87	20,80	4,91	34,22	2,29	24,10
Février	16,45	25,82	8,66	26,66	1,34	25,30
Mars	20,76	28,58	11,78	22,30	4,47	25,00
Avril	25,38	33,20	15,90	22,30	8,43	21,86
Mai	29,97	37,31	19,44	19,17	19,52	13,15
Juin	35,84	44,10	25,86	15,13	4,08	17,20
Juillet	38,34	45,95	29,00	12,73	4,04	20,42
Août	37,59	44,54	27,72	16,18	0,33	27,70
Septembre	33,65	41,32	25,50	21,62	0,42	22,60
Octobre	26,69	35,13	18,72	27,88	3,30	22,45
Novembre	19,21	25,60	10,42	38,65	1,49	16,96
Décembre	13,87	22,05	5,73	39,95	0,67	17,55
Moyennes annuelles	25,89	33,70	16,97	24,73	50,38	21,19

2.1. Les précipitations

Les précipitations mensuelles sont très faibles dans la région d'Adrar (Ziza, 2006). Les précipitations moyennes annuelles de la période 1980-2008 sont de l'ordre de 50 mm (tableau III).

2.2. La température

La température est un facteur qui conditionne l'hydro-climatologie de toute la région. D'après Kholadi (2007), la wilaya d'Adrar connaît des écarts de température considérables (tableau III). La température est très forte en été (plus de 45°C) et très froide en hiver (atteignant parfois les 4°C).

Les mois les plus chauds s'étalent de mai à août avec des températures qui varient en moyenne de 30 à 44 °C. Avec des températures moyennes qui oscillent entre 12 et 16 °C, les mois de décembre à février sont relativement moins chauds. L'amplitude thermique journalière est importante durant toute l'année. Elle varie entre 11 et 20 °C, elle est nettement plus marquée pendant les mois chauds.

2.3. L'évapotranspiration potentielle

La wilaya d'Adrar est caractérisée par une forte évapotranspiration, elle varie de 119 mm (décembre) à 634 mm (juillet), enregistrant une moyenne annuelle 4203 mm (Boubekeur, 2010).

2.4. Les vents

Les vents sahariens sont en relation directe avec les mécanismes climatiques généraux et les perturbations qui s'y développent. Les vents liés au champ barométrique général soufflent surtout le jour. Pendant la nuit, l'inversion des températures qui se produit dans les couches basses de l'atmosphère conduit à une plus grande stabilité. Dès la levée du jour, le rayonnement solaire les réchauffe à nouveau et permet une reprise des turbulences jusqu'au sol (Ziza, 2006). La vitesse du vent est souvent supérieure à 5 m/s toute l'année. Son effet est très défavorable pour l'agriculture du fait de l'augmentation de l'évapotranspiration et des dommages provoqués sur les cultures par l'ensablement. Les vents dominant ont une direction Nord-Est et Nord-Ouest.

2.5. L'humidité relative

L'humidité relative est caractérisée par une moyenne annuelle inférieure à 50 %. Les valeurs minimales peuvent atteindre 12 %, elles sont observées en juin-juillet ; les valeurs maximales sont observées aux mois de novembre et décembre (tableau III).

2.6. L'insolation

La durée d'insolation atteint 3500 heures/ an. La durée d'insolation moyenne journalière est de l'ordre de 8 à 12 heures selon les saisons. Elle est maximale au mois de juillet avec 12 heures par jour, et minimale au mois de janvier avec 8 heures par jour (Boubekeur, 2010).

En conclusion, la zone d'Adrar est une zone de désert absolu, son climat saharien à sécheresse stricte n'autorise aucune agriculture pluviale. Face à ces conditions climatiques caractérisées par une importante évapotranspiration et une rareté des écoulements de surface, seules des structures entièrement artificielles autorisent la production agricole.

3. Géologie et géomorphologique

Selon Boucenna et Berrachedi (2004), la région d'Adrar est située sur le rebord sud occidental du vaste bassin secondaire s'étendant de l'atlas saharien à la hamada du Tinrhest et Touat Gourara au golf de Gabès. Dans le Touat et Gourara, les terrains de cet ensemble qui affleurent sont des formations gréseuses du continental intercalaire (Albien), ou des formations marines du crétacé supérieur et des terrains mio-pliocènes continentaux.

3.1. Les terrasses d'érosions

Elles se sont formées au cours du quaternaire ancien et moyen ; attenantes aux plateaux, elles sont très larges au nord et deviennent plus étroites au sud.

3.2. Les terrasses d'apports

Elles se situent à la rupture des pentes entre les terrasses d'érosion et les Sebkhass et correspondent aux zones à palmeraies. La pente est assez forte à l'amont et faible vers les sebkhass et la surface est ondulée, parfois couverte de micro dunes ou de dunes plus importantes. La carte géomorphologique de la région montre que celle-ci est constituée de quatre grandes formations (figure 34).

3.3. Les plateaux

Parmi les plateaux, le plateau de Tademaït, atteint une altitude de 520 m en moyenne. Il est caractérisé par une terrasse plane avec une pente légère sur 100 km environ. Il est exposé d'une manière intense à l'érosion éolienne et hydrique.

3.4. Les Ergs

En plus des dunes de sable locales et limitées, la région connaît les plus grandes étendues de sable qui s'étalent sur des centaines de kilomètres et qui constituent le grand erg occidental et erg Chèche. C'est le résultat d'une érosion éolienne depuis les aires géologiques anciennes.

3.5. Les plaines

Elles sont constituées des terres planes qui se situent entre les plateaux et les Ergs. Elles prennent deux aspects : les Regs et les Hamadas.

3.6. Les Sebkhas

Elles sont situées généralement dans les dépressions. Elles étaient constituées pendant les époques géologiques anciennes pendant les périodes pluvieuses et évaporation des eaux des lacs comme elles pouvaient être constituées récemment par les eaux de drainage.

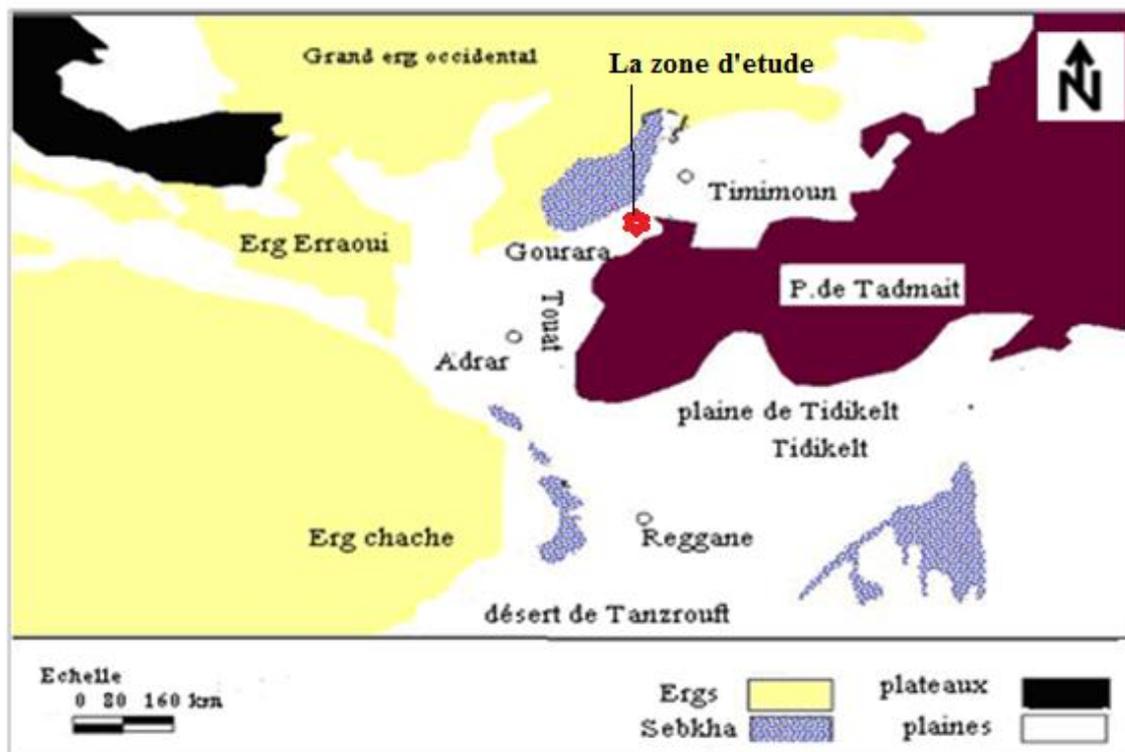


Figure 34. Carte géomorphologique d'Adrar ((Laaboudi et Chabouni, 2011).

4. Hydrogéologie

La région d'Adrar renferme des eaux souterraines de la nappe albienne. Ces eaux appartiennent au continental intercalaire (figure 35). C'est un aquifère fossile très volumineux qui s'étend sur plus de 60 000 milliards de m³ (Chabaca, 2007). La profondeur du toit de l'aquifère augmente du sud au nord.. La nappe du Continental Intercalaire est un réservoir à eau douce ; la plus grande partie de l'eau de cette ressource a été remplie pendant les périodes pluvieuses du quaternaire (Khadraoui, 2005).

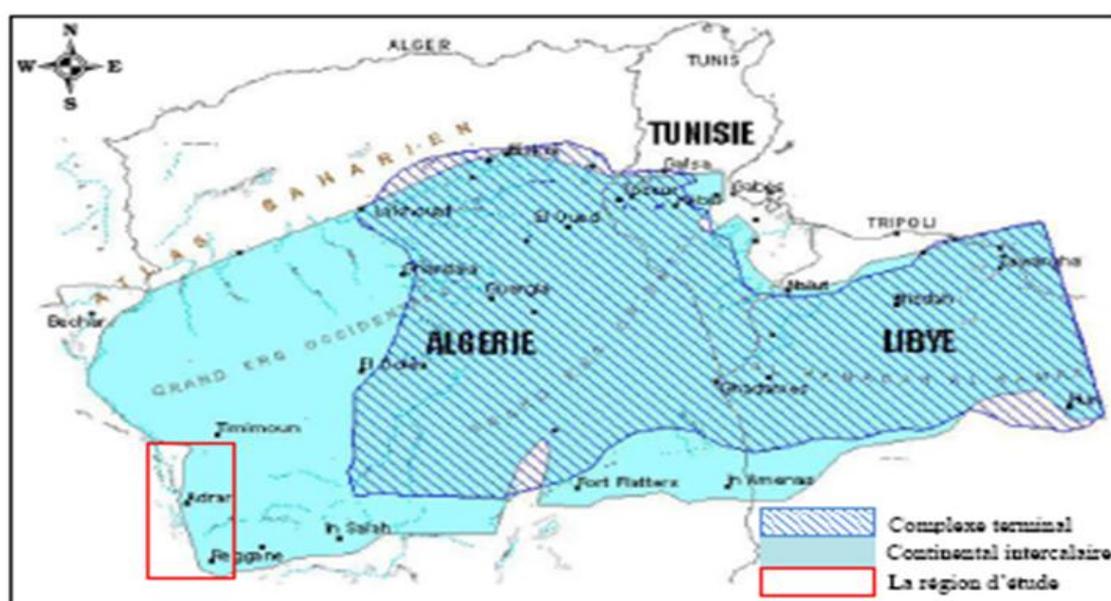


Figure 35. Extension des formations du système aquifère du Sahara septentrionale (OSS, 2008).

5. Les sols

Les sols de la région d'Adrar sont de nature squelettique où la proportion d'argile est faible et la fraction grossière importante (Demangeot, 1981; in Berrached, 1996). La plupart des sols de la région, en particulier ceux de l'erg, sont sableux ou sablo-limoneux à structure particulière, pauvre en matière organique, assez profonds et faciles à travailler. Leur pH est neutre ou légèrement alcalin avec un taux de salinité variable. Il existe aussi quelques zones dont les textures sont limono-argileuses. C'est le cas des lits d'oueds formés par la sédimentation de l'argile et du calcaire. On retrouve aussi des sols de regs, où il y a la présence de croûtes gypso-salines (Dubost, 2002). Dans la

région d'Adrar, certaines terres agricoles sont très salées. De ce fait, les cultures qui y sont pratiquées sont halotolérantes comme *Phoenix dactylifera* et certains maraîchages sous les palmiers, comme la culture de l'ail et de l'oignon (Dubost, 2002). Selon la classification française (CPCS, 1967), les sols de la région sont regroupés en trois classes :

- ❖ Sols minéraux bruts
- ❖ Sols peu évolués
- ❖ Sols halomorphes

6. L'agriculture dans la wilaya d'Adrar

Selon les statistiques du (MADR, 2007) cité par Boubekeur (2010), la superficie agricole totale (SAT) est de 337 650 ha. La superficie agricole utile (SAU) couvre une superficie de 42 598 ha dont 29 787 ha de superficie agricole utilisée irriguée (SAUI). Le nombre d'exploitations agricoles est de 23 467. Le reboisement forestier est de 30 ha. La figure 36 est une carte de répartition de l'agriculture oasisienne au niveau de la wilaya d'Adrar.

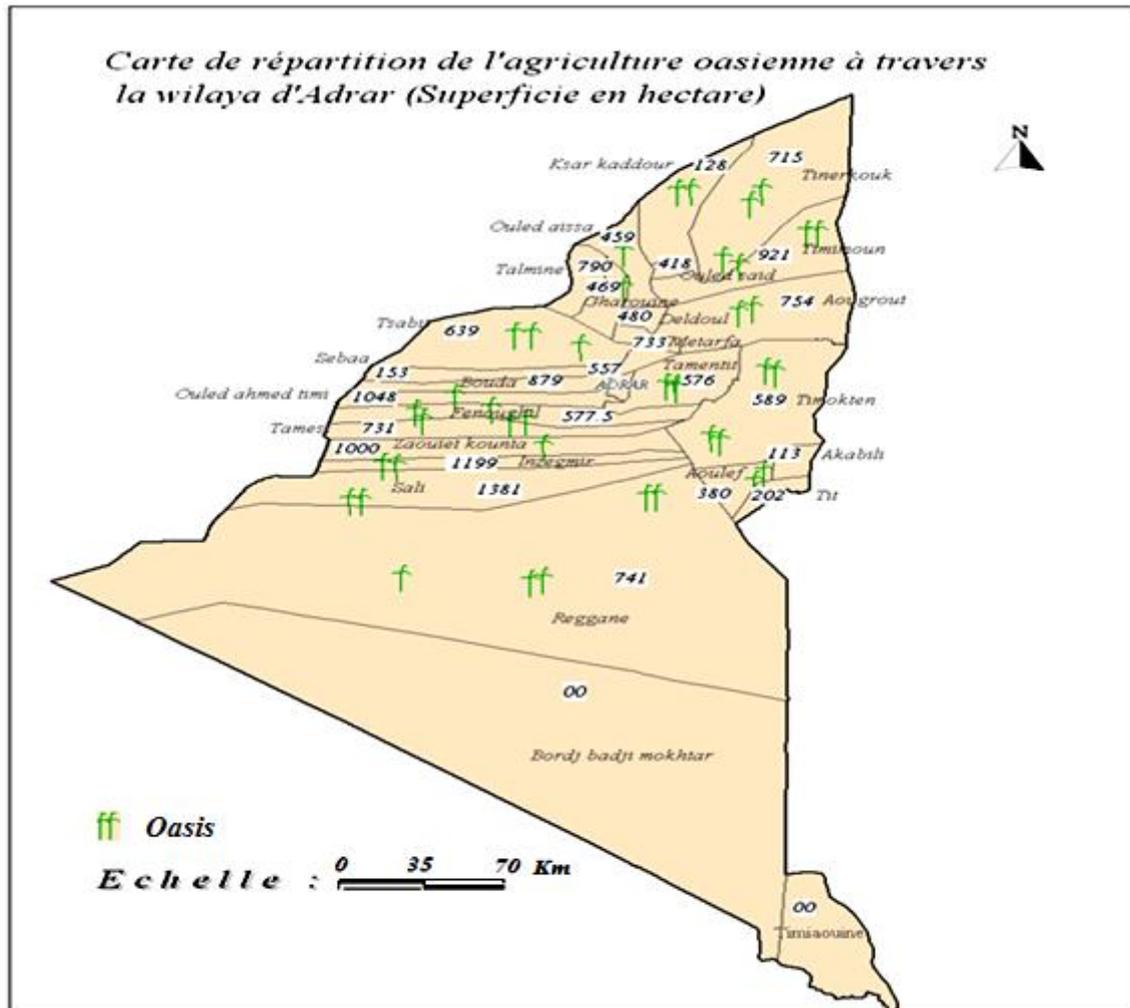


Figure 36. Carte de répartition de l'agriculture oasisienne au niveau de la wilaya d'Adrar.

Conclusion

La région d'Adrar est caractérisée par un climat saharien à hiver tempéré, pluie très faible et très irrégulière, une forte évaporation et des températures élevées, avec des étés chauds et des hivers froids. Les sols de la région sont de nature squelettique avec des textures dominée par la fraction grossière. La plupart des sols de la région, sont sableux ou sablo-limoneux à structure particulière, bien drainants et faciles à travailler. Ainsi la disponibilité de l'eau d'irrigation a permis la création de plusieurs périmètres de mise en valeur en irriguée dans la région.

CHAPITRE III. MATERIEL ET METHODES

Ce travail a pour objectif d'étudier l'effet de l'irrigation par pivot sur quelques propriétés des sols sableux d'Adrar. Il s'agit en fait de comparer des paramètres physiques et chimiques des sols irrigués sous pivots depuis trois périodes différentes t_1 , t_2 et t_3 à leur état initial t_i c'est-à-dire à ceux d'un sol non irrigué.

1. Matériel d'étude

Les sols étudiés appartiennent à trois exploitations agricoles irriguées par pivots respectivement depuis 3, 7 et 14 ans et qui ont subi les mêmes techniques d'irrigation. Les caractéristiques de ces sols seront comparées entre elles d'une part et par rapport à celles d'un sol témoin non irrigué et non travaillé d'autre part.

Les sites d'études se situent sur la terrasse de Teberghamine (Augrout) à 120 Km au nord de la ville d'Adrar. La distance qui sépare le premier site du deuxième est de 1500 m, elle est de 500 m entre le deuxième et le troisième site.

Chaque parcelle couvre une superficie de 30 ha. L'irrigation se fait à partir d'un forage dont l'eau provient de la nappe albienne. La profondeur de la nappe varie entre 7 et 15 m. Les sols de ces trois parcelles sont morphogénétiquement semblables et ne se différencient que par les durées de leur exploitation (3, 7 ou 14 ans).

Les pratiques culturales et les spéculations adoptées dans la région d'Adrar diffèrent selon les cultures. Le précédent cultural et les itinéraires technique adoptés dans chaque parcelle étudiée sont présentés dans le tableau IV.

Tableau IV. Les pratiques culturales suivies dans chaque exploitation

	Précédent cultural	Travail du sol
Parcelle 1	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Trois ans de culture du blé dur 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Deux passages croisés par le cultivateur à dents ❖ Un passage de l'herse rotatif ❖ Deux passages d'épandeur d'engrais ❖ Un passage de semoir.
Parcelle 2	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Quatre ans de culture du blé dur ❖ Deux ans de culture de pomme de terre ❖ Une année de culture de petits pois 	<p>La culture de blé et les petits pois.</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Deux passages croisés de cultivateur à dents ❖ Un passage de l'herse rotative ❖ Deux passages de l'épandeur d'engrais ❖ Un passage de semoir. <p>La culture de pomme de terre</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Un passage de charrue à soc ou à disc selon la disponibilité ❖ Plus de deux passages croisés de l'herse rotative ❖ Deux passages de l'épandeur d'engrais ❖ Un passage de la planteuse ❖ Deux passages de la buteuse ❖ Des passages de pulvérisateur selon l'utilisation (engrais solubles et pesticides).
Parcelle 3	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Treize ans de culture du blé dur 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Deux passages croisés par le cultivateur à dents ❖ Un passage de l'herse rotatif ❖ Deux passages d'épandeur d'engrais ❖ Un passage de semoir.

2. Méthode d'étude

2.1. Choix des profils et échantillonnage

Après avoir prospecté la zone d'étude et pris connaissance de la méthode d'irrigation utilisée et de l'état du matériel d'irrigation, nous avons déterminé dans chaque parcelle des profils représentatifs. Le choix de ces profils a été basé essentiellement sur l'homogénéité du sol et de l'irrigation. La rampe d'arrosage fait un balayage circulaire de la surface des parcelles et l'irrigation se fait de la même manière, avec la même intensité et le même diamètre des gouttelettes d'eau qui tombent sur le sol. De ce fait, les profils n'ont été réalisés que sur un seul rayon de la parcelle. L'échantillonnage des sols a été effectué en deux fois à des périodes différentes. Le premier échantillonnage est utilisé uniquement pour la caractérisation morphoanalytique des sols de la région d'étude. Le deuxième échantillonnage est utilisé pour l'étude effective de l'effet de l'irrigation par pivots sur les propriétés des sols en fonction du temps.

La caractérisation morphoanalytique des sols effectuée en décembre 2011 en début de la campagne agricole. Le sol était très humide et proche de la capacité de rétention des sols. Pour ce faire, nous avons creusé dans chaque parcelle deux profils espacés de 100 m l'un de l'autre (figure 37). Un profil témoin (sol non cultivé, non irrigué) est creusé à proximité de ces sites. Les sept profils ainsi réalisés ont été décrits et échantillonnés en vue d'analyses au laboratoire.

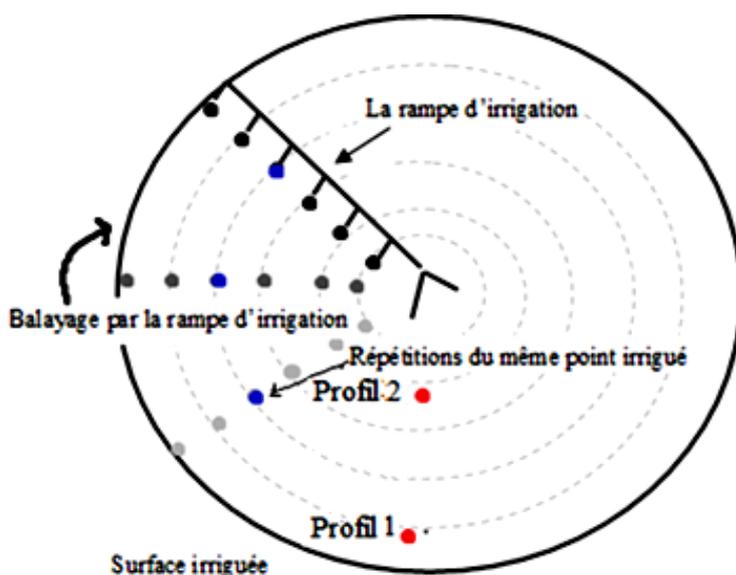
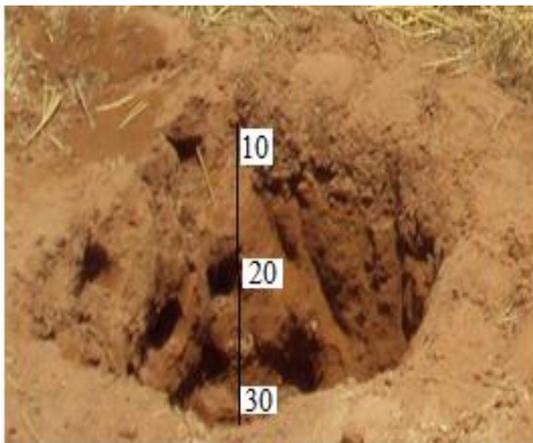


Figure 37. Localisation des profils réalisés à l'intérieur des parcelles.

L'échantillonnage pour l'étude de la modification dans le temps des propriétés des sols sous l'effet de l'irrigation a été effectué en juin 2012 à la fin de la campagne agricole. Le sol était sec en surface et ne comportait que des chaumes de blé. Cette fois ci, nous avons creusé trois profils par parcelle distants d'environ 75 m l'un de l'autre et un quatrième profil témoin (profil non cultivé et non irrigué) à proximité de l'exploitation agricole (figure 38). Au total, nous avons réalisé 12 profils que nous avons échantillonné selon 3 couches de 10 cm de profondeur (Photo 5 et 6). Cette démarche se justifie pour les besoins des statistiques (chaque profil de la parcelle constitue une répétition) et par le fait que l'étude menée préalablement a montré que tous les sols étudiés sont morphologiquement homogènes. De ce fait, nous disposons de 36 échantillons pour réaliser l'étude comparative des propriétés des sols. Les paramètres étudiés ici sont

- ❖ La conductivité électrique
- ❖ Le calcaire
- ❖ La granulométrie
- ❖ La densité apparente
- ❖ La résistance à la traction
- ❖ La perméabilité hydraulique



Photos 5 et 6. Préparation des profils à l'échantillonnage et aux différentes mesures.

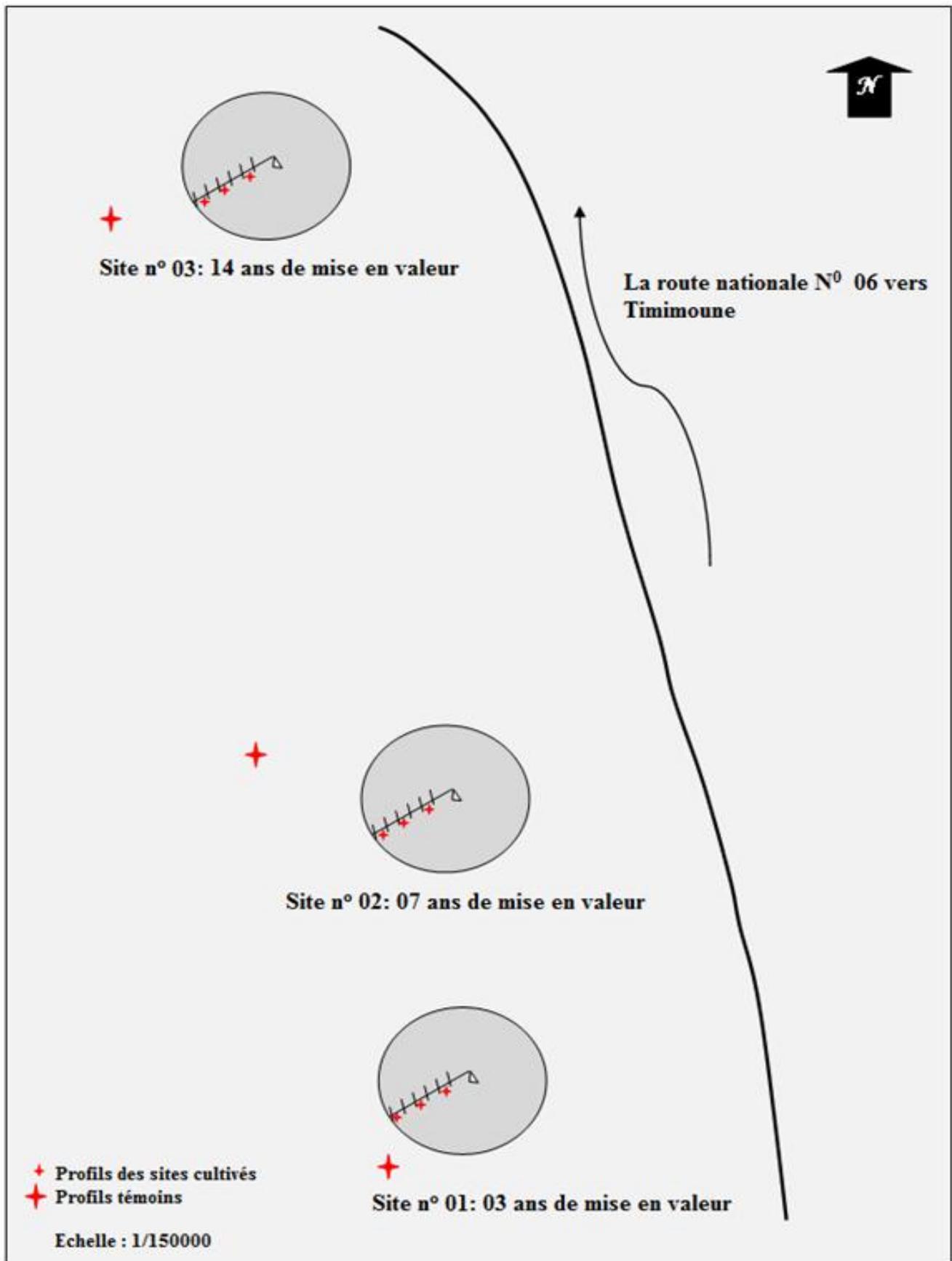


Figure 38. Localisation des profils.

2.2. Méthodes de mesure sur le terrain

2.2.1. Mesure de la perméabilité hydraulique

La perméabilité à saturation du sol a été déterminée à l'aide du perméamètre à double anneaux. L'infiltromètre à double anneaux se compose d'un anneau interne (11,2 cm de diamètre) et d'un anneau externe (30 cm diamètre) grâce auquel le flux vertical est maintenu dans l'anneau interne (photos 7 et 8). Le principe de cet appareil est basé sur la mesure des variations du niveau d'eau dans l'anneau interne. Les deux anneaux, enfoncés dans le sol d'une profondeur de 6 cm et remplis d'eau à la même charge h (charge hydraulique h par rapport à la surface), sont le siège d'une infiltration verticale. On mesure le volume d'eau infiltré dans l'anneau interne au cours du temps au moyen d'un dispositif adapté (une pissette graduée). On maintient une charge h constante, donc l'écoulement à l'intérieur de l'anneau interne est à charge constante. Soit S la surface de l'anneau interne, et Q le volume d'eau infiltré pendant le temps.

Le calcul de la perméabilité se fait par la relation suivante :

$$K \text{ (cm/h)} = Q/S$$

K (cm/h) : la perméabilité

Q (cm³) : le volume d'eau infiltré/ Δh

S (cm²) : la section du cylindre central

Nous avons mesuré la perméabilité hydraulique sur trois surfaces d'infiltration de 75×80 cm préalablement préparées approximativement de chaque profil (on décape la couche superficielle jusqu'à atteindre un niveau plat). Après la mise en place des anneaux (par enfoncement manuelle et par battage), le colmatage de l'anneau externe (pour éviter les fuites) et le remplissage (eau claire et de provenance locale), on sature le sol et on mesure par la suite le volume d'eau infiltré pendant une heure.



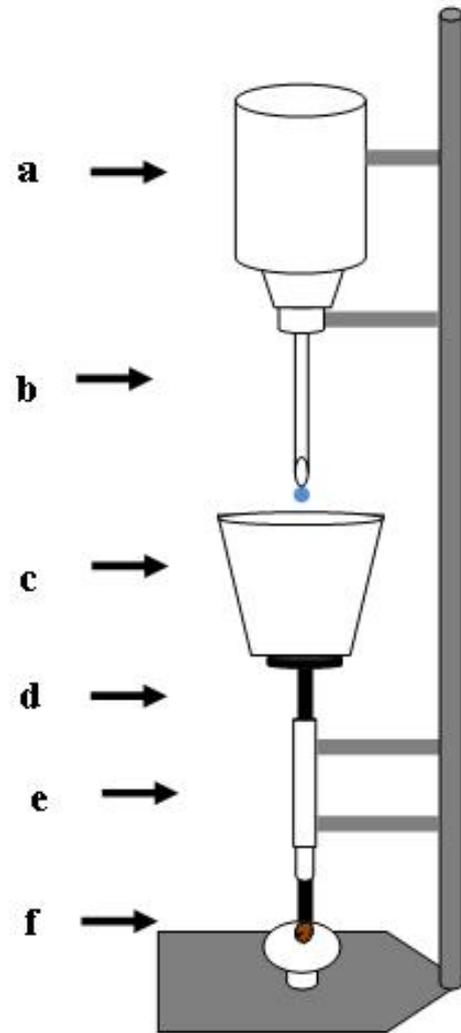
Photos 7 et 8. Déroulement de l'essai de la perméabilité hydraulique.

2.2.2. Mesure de la résistance à la traction

La détermination de la résistance à la traction est réalisée en soumettant des agrégats de sol à des efforts en compression en exerçant sur eux un poids bien déterminé. Cependant, les agrégats obtenus par fragmentation des mottes et tamisage présentent des géométries variées et des arêtes anguleuses. Pour se rapprocher de la forme désirée (10 à 15 mm de diamètre) les agrégats obtenus par fragmentation ménagée et par tamisage sont arrondis manuellement par usure et brassage sur un disque abrasif puis séchés à l'étuve à 105°. Pour la mesure proprement dite, nous avons construit un dispositif à compression simple (figure 39) en nous inspirant du dispositif de Guérif (1988) (figure 40).



Photos 9, 10 et 11. Préparations des échantillons à la mesure de la résistance à la traction.



- b) Goutteur d'eau
- c) Bac recevant
- d) Arbre pointu écrasant
- e) Raccord coulissant
- f) Echantillon

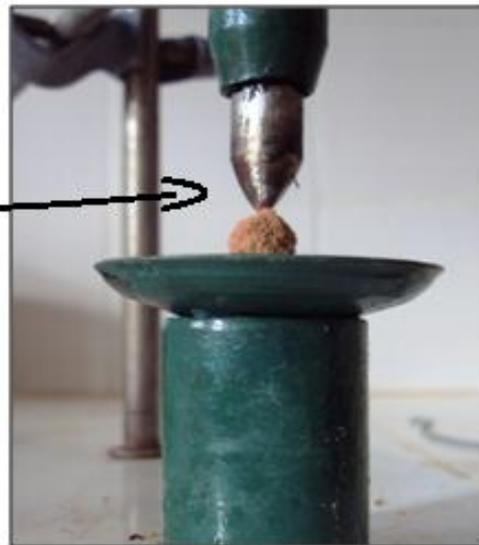
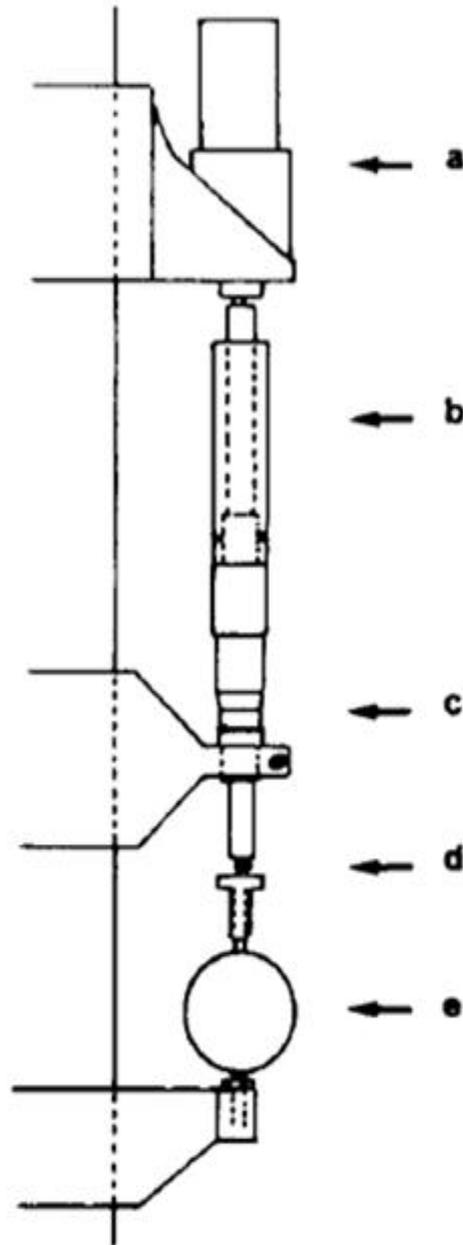


Figure 39. Dispositif du test de résistance à la traction.



*Presse à compression simple pour éprouvette millimétrique.
 a) moteur électrique,
 b) raccord coulissant,
 c) butée micrométrique,
 d) agrégat,
 e) capteur de force (jauge extensiométrique).*

Figure 40. Dispositif du test de la résistance à la traction de (Guérif, 1988).

2.2.3. Détermination de la densité apparente

Les mesures de la densité apparente ont été faites par la méthode au cylindre, les mesures ont été prises après avoir humidifié les profils et laisser le sol ressuyer pendant une heure du temps, après le ressuage les cylindre ont été facilement enfoncés dans les couches des profils (photos 12 et 13).



Photos 12 et 13. Les mesures de la densité apparente sur terrain.

2.3. Méthodes d'analyse des sols au laboratoire

Les échantillons de sol prélevés sont d'abord séchés à l'air libre puis broyés et tamisés à 2 mm. La terre fine a fait l'objet d'analyses physiques et chimiques en trois répétitions.

2.3.1. Les analyses physiques

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

2.3.2. Les analyses chimiques

- La conductivité électrique : Mesurée sur extrait aqueux 1/5 par la méthode électrique.
- Le pH : Méthode potentiométrique sur un rapport sol / eau de 1/2,5
- Le calcaire total : Méthode volumétrique au calcimètre de Bernard
- La capacité d'échange cationique (CEC) : Méthode Bower en saturant le sol avec l'acétate de sodium, pH= 8.2.
- Le carbone organique : Méthode Anne.
- Le gypse par la méthode gravimétrique par précipitation au chlorure de baryum

- Le bilan ionique : Réalisé sur la solution du sol extraite d'un rapport sol / eau de 1/5.
- Les cations : Déterminés par spectrophotométrie d'absorption atomique.
- Les sulfates : Méthode gravimétrique en faisant précipiter les sulfates avec du chlorure de baryum.
- Les chlorures : Méthode titrimétrique en utilisant le nitrate d'argent.
- Les carbonates et bicarbonates : Méthode titrimétrique en utilisant l'acide sulfurique
- **Les analyses statistiques**

Les différents traitements statistiques ont été réalisés par le tableur Excel de microsoft, statistica 7 et Origin 5.0.

CHAPITRE IV. RESULTATS ET DISCUSSION

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord les caractéristiques morphologiques et analytiques des sols du témoin et des 3 parcelles étudiées et nous discuterons ensuite les variations dans le temps de quelques paramètres physiques et chimiques de ces sols.

Nous rappelons que les parcelles étudiées se caractérisent toutes par une même topographie (terrain plat) et un même matériau parental (grés-calcaire). Le sol témoin est non irrigué et non cultivé. La parcelle 1 est cultivée en irrigué depuis 3 ans. La parcelle 2 est cultivée en irrigué depuis 7 ans et la parcelle 3 est cultivée en irrigué depuis 14 ans.

1. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES ET ANALYTIQUES DES SOLS DE LA ZONE D'ETUDE

Dans ce qui suit, nous présentons successivement les sols du témoin, de la parcelle 1, de la parcelle 2 et de la parcelle 3.

1.1. Sol témoin

Ce sol n'a jamais été ni cultivé, ni irrigué.

Ce profil est illustré par la photo 14.

❖ Données générales

- Coordonnées géographiques : Longitude $000^{\circ} 16' 44,4''$ Est ; latitude $28^{\circ} 36' 49,0''$ Nord.
- Date de description : 24/12/2011
- Temps : ciel clair
- Altitude : 184 m
- Topographie : terrain plat
- Matériau originel : grés-calcaire
- Etat de surface : sol nu avec environ 40 % de gravier en surface.



Photo 14. Profil Témoin.

❖ **Description morphologique**

A : 0-25 cm: sec; couleur à l'état humide 5YR5/6 ; sableux ; structure polyédrique subangulaire peu nette ; non fragile ; très poreux avec une forte macroporosité ; meuble ; moins de 7 % d'éléments grossiers; non organique ; pas d'activité biologique ; pas de taches; forte effervescence à l'HCl généralisée ; transition peu nette et irrégulière.

C: > 25 cm: sec ; couleur à l'état humide 5YR 6/8 ; structure massive à éclats émoussés ; présence de fragments calcaires et de nodules calcaires ; forte effervescence à l'HCl.

❖ **Résultats des analyses physiques et chimiques du sol témoin**

Les résultats des analyses physiques et chimiques sont présentés dans le tableau V.

Tableau V. Résultats des analyses du profil témoin.

Profondeur (cm)		0-25	> 25
Horizon		A	C
Granulométrie (%)	A	7,3	5,4
	LF	5,7	3,1
	LG	4,1	3,8
	SF	62,2	59,3
	SG	20,7	28,3
Carbone organique (%)		0,15	0,09
Matière organique %		0,26	0,16
Calcaire total (%)		33,44	60,98
Gypse (%)		0,95	1,80
Capacité d'échange cationique (Cmoles/Kg)		4,55	2,36
pH		7,86	7,77
Conductivité électrique 1/5 (dS/cm)		1,1	0,9
Bilan ionique (méq/l)	HCO ³⁻	0,15	0,20
	SO ₄ ²⁻	2,45	1,78
	Cl ⁻	4,25	7,75
	Na ⁺	5,53	6,08
	Ca ⁺⁺	0,15	0,07
	K ⁺	1,46	1,28
	Mg ⁺⁺	0,96	0,56
Densité apparente		1,31	1,29
Perméabilité (cm/h)		24,37	

Ce sol est peu profond (25 cm), mal structuré et peu caillouteux (moins de 7 % d'éléments grossiers). Il est de type A/C. Ce sol se caractérise surtout par ses très faibles teneurs en argile ($5\% < \text{Argile} < 7\%$). Les valeurs de la CEC concordent assez bien avec les taux d'argile, elles oscillent entre 2,36 et 4,55 Cmole/Kg. Les taux de matière organique sont très faibles et sont inférieurs à 0,5 %. Ce profil est très calcaire, il renferme plus de 33 % de CaCO_3 dans l'horizon de surface et plus de 60 % de CaCO_3 dans l'horizon de profondeur. Le pH est légèrement basique ($7,7 < \text{pH} < 7,8$) et la salinité est forte ($\text{CE}_{1/5} \approx 1 \text{ dS/m}$).

Selon la CPCS (1967), ce sol est un sol peu évolué, non climatique, d'érosion, régosolique.

1.2. Sol de la parcelle 1

La parcelle 1 est cultivé en céréales (blé dur) en irrigué depuis trois ans. Les sols de cette parcelle ont été caractérisés par deux profils, le profil P11 et le profil P12. Du fait que les deux profils sont très semblables, nous ne présentons, dans ce qui suit, que le profil P11. La description morphologique et les résultats des analyses du profil P12 sont présentés dans l'annexe 1.

Le profil P11 est illustré par la photo 15.

❖ Données générales

- Coordonnées géographiques : Longitude $000^{\circ} 16'49,0''$ Est; latitude $28^{\circ} 36'25,6''$ Nord.
- Date de description: 24/12/2011
- Temps : ciel clair
- Altitude : 183
- Topographie : terrain plat
- Matériau originel : grés-calcaire
- Aspect de surface : Terrain cultivé en blé dure, apparition d'une fine croûte de battance, charge caillouteuse réduite.

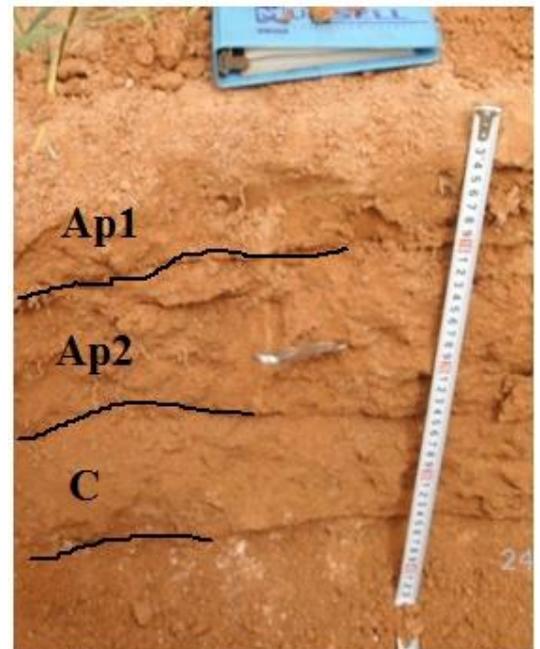


Photo 15. Profil 11.

❖ Description morphologique

Ap1 : 0-10 cm: frais ; couleur à l'état humide 5YR 5/6 ; sableux ; structure massive à sous structure particulière ; présence en surface de quelques agrégats friable ; poreux ; meuble ; moins de 5 % d'éléments grossiers ; non organique ; quelques racines du blé; activité biologique faible ; pas de taches; forte effervescence à l'HCl généralisée ; transition peu nette et régulière.

Ap2 : 10-25 cm: frais ; couleur à l'état humide 5YR 6/8 ; sableux ; structure massive à sous structure particulière ; peu poreux que le précédent ; peu compact ; friable ; pas d'agrégats ; présence d'éléments grossiers moins de 5 % ; non organique ; rares racines ; activité biologique faible ; pas de taches; effervescence à l'HCl généralisée ; transition peu nette et régulière.

C : 25-35 cm: frais ; couleur à l'état humide 2.5YR 5/8 ; sableux ; structure massive à sous structure particulière ; poreux ; compact ; friable ; présence d'éléments grossiers moins de 5 % ; peu organique ; rares racines ; pas d'activité biologique ; pas de taches; forte effervescence à l'HCl ; présence de fragments calcaire.

Les résultats des analyses physico-chimiques sont présentés dans le tableau VI.

Tableau VI. Résultats des analyses de P11

Profondeur (cm)		0-10	10--25	25-35
Horizon		Ap1	Ap2	C
Granulométrie (%)	A	6,0	5,7	4,6
	LF	0,7	1,6	1,3
	LG	4,1	3,5	2,2
	SF	73,9	75,9	48,4
	SG	15,9	13,4	43,5
Carbone organique (%)		0,55	0,62	0,31
Matière organique (%)		0,95	1,06	0,53
Calcaire total (%)		17,70	25,57	32,46
Gypse (%)		1,90	0,65	1,96
Capacité d'échange cationique (Cmole/Kg)		2,21	2,14	2,14
pH eau		7,88	8,23	8,44
Conductivité électrique 1/5 (dS/m)		0,69	1,85	1,58
Bilan ionique (méq/l)	HCO ³⁻	0,25	0,30	0,55
	SO ₄ ²⁻	1,24	0,64	1,62
	Cl ⁻	1,75	4,25	2,25
	Na ⁺	6,46	5,00	6,30
	Ca ⁺⁺	0,09	0,04	0,16
	K ⁺	0,32	1,13	0,33
	Mg ⁺⁺	0,31	0,15	0,06
Densité apparente		1,28	1,36	1,39
Perméabilité (cm/h)		26,84		

Le sol de la parcelle 1 est caractérisé par une profondeur très réduite (35 cm). La structure est dans tous les horizons massive à sous structure particulière. Ce sol est meuble en surface et relativement compact en profondeur. De même, il se caractérise par une couleur rougeâtre dans la première partie du solum qui devient par la suite assez claire en profondeur. Ce profil se caractérise aussi par de très faibles taux d'argile ($4 < A \% < 6$) d'où des CEC très faible avec des valeurs qui oscillent entre 2,1 et 2,2 Cmole/Kg. Les taux de matière organique sont très faibles et varient entre 0,5 et 1 %. Ce profil devient de plus en plus calcaire en profondeur, il passe de 17 % de calcaire dans l'horizon de surface à 25 % dans l'horizon de sub-surface et à 32 % dans l'horizon de profondeur. Les sols de cette parcelle sont légèrement basique ($7,8 < \text{pH} < 8,4$) et la conductivité électrique ($CE_{1/5}$) oscille entre 0,7 et 1,8 dS/m ce qui dénote la présence

d'une forte salinité, surtout dans l'horizon de subsurface. La densité apparente est de 1,3 en moyenne et la perméabilité hydraulique est très élevée (26,8 cm/h).

Selon la CPCS (1967), ce sol est un sol peu évolué, non climatique, d'érosion, régosolique.

1.3. Sol de la parcelle 2

Cette parcelle est cultivée en céréaliculture en irriguée depuis sept ans. Les sols de cette parcelle ont été caractérisés par deux profils, le profil P21 et le profil P22 (annexe 2).

Le profil P21 est illustré par la photo 16.

❖ Les données générales

- Coordonnées géographiques : Longitude 000°17'18,1"Est ; latitude 28° 36' 25,6" Nord
- Date de description: 24/12/2011
- Temps : ciel clair
- Altitude : 183 m
- Topographie : terrain plat
- Matériau originel : grès calcaire
- Etat de surface : Terrain cultivé en blé dure, apparition d'une fine croûte de battance, charge caillouteuse réduite environ 5%.

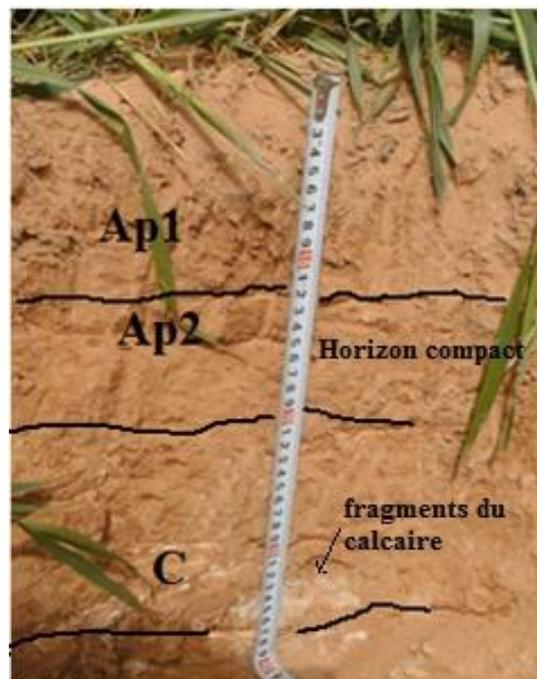


Photo 16. Profil 21.

❖ Description morphologique

Ap1 : 0-12 cm: sec ; couleur à l'état humide 5YR5/6 ; sableux ; structure particulière associée à quelques agrégats de forme polyédrique subangulaire très peu nette ; poreux ; peu compact ; fragile ; moins de 5 % d'éléments grossiers ; peu organique ; nombreuses racines de blé ; activité biologique moyenne ; pas de taches ; effervescence à l'HCl généralisée ; transition peu nette et régulière.

Ap2 : 12-19 cm: sec ; couleur à l'état humide 5YR6/6 ; sableux ; structure massive ; moins poreux que le premier horizon ; compact ; présence d'environ 15 % d'éléments grossiers ; non organique ; peu de

racines ; activité biologique faible ; pas de taches; effervescence à l'HCl généralisée ; transition peu nette et régulière.

C : 19-38 cm: sec ; couleur à l'état humide 5YR5/8 ; sableux ; structure massive ; poreux ; peu compact ; fragile ; présence d'éléments grossiers (5 %) ; peu organique ; pas de racine; pas d'activité biologique ; pas de taches; forte effervescence à l'HCl ; présence des fragments de calcaire.

Les résultats des analyses physico-chimiques sont présentés dans le tableau VII.

Tableau VII. Résultats des analyses de P21

Profondeur (cm)		0-12	12-19	19-38
horizon		Ap1	Ap2	C 2
Granulométrie (%)	A	5,2	4,2	3,6
	LF	1,1	16,8	16,3
	LG	1	3,2	4,7
	SF	54,7	67,3	56,0
	SG	38,0	8,5	19,4
Carbone organique (%)		0,58	0,65	0,09
Matière organique(%)		1,00	1,11	0,16
Calcaire total (%)		15,74	26,56	30,49
Gypse (%)		1,45	1,30	0,79
Capacité d'échange cationique (Cmole/Kg)		3,16	2,65	1,7
pH eau		7,9	8,13	8,19
Conductivité électrique 1/5 (dS/m)		0,18	0,17	0,32
Bilan ionique (még/l)	HCO ³⁻	0,16	0,40	0,40
	SO ₄ ²⁻	1,96	0,57	1,67
	Cl ⁻	0,25	0,75	0,25
	Na ⁺	0,33	1,47	0,16
	Ca ⁺⁺	0,08	0,02	0,29
	K ⁺	0,31	0,31	0,30
	Mg ⁺⁺	0,27	0,19	0,10
Densité apparente		1,40	1,46	1,40
Perméabilité (cm/h)		8,3		

Le sol de la parcelle 2 est également peu profond (38 cm). L'horizon de surface se caractérise par une structure particulière sableuse associée à quelques agrégats mal formés. L'horizon de subsurface, quand à lui, est compact et se caractérise par une structure massive. Les taux d'argile (3 % < A < 5 %), les taux de matière organique

(MO \approx 1 %) et la CEC (CEC < 4 Cmole/Kg) sont faibles. Le pH est légèrement basique (7,9 < pH < 8,19). Les taux de calcaire augmentent graduellement avec la profondeur, passant de 15 % en surface à 30 % dans le bas du profil. La conductivité électrique est faible, elle varie entre 0,17 et 0,32 dS/m ce qui suggère que ce profil n'est pas salé. La densité apparente est de l'ordre de 1,4 et la perméabilité hydraulique est égale à 8,3 cm/h. Ce résultat concorde bien avec la texture sableuse des horizons et signifie que ce sol est assez poreux.

1.4. Sol de la parcelle 3

Cette parcelle est cultivée en céréaliculture en irriguée depuis treize ans. Les sols de cette parcelle ont été caractérisés par deux profils, le profil P31 et le profil P32 (annexe 3)

Le profil P31 est illustré par la photo 17.

❖ Les données générales

- Coordonnées géographiques : Longitude 000,19'30,0"Est ; latitude 28°39'32,9"Nord.
- Date de description: 25/12/2011
- Temps : ciel clair
- Altitude : 182m
- Topographie : terrain plat
- Matériau originel : grès calcaire
- Etat de surface : Terrain cultivé en blé dur, charge caillouteuse réduite environ 5 %.

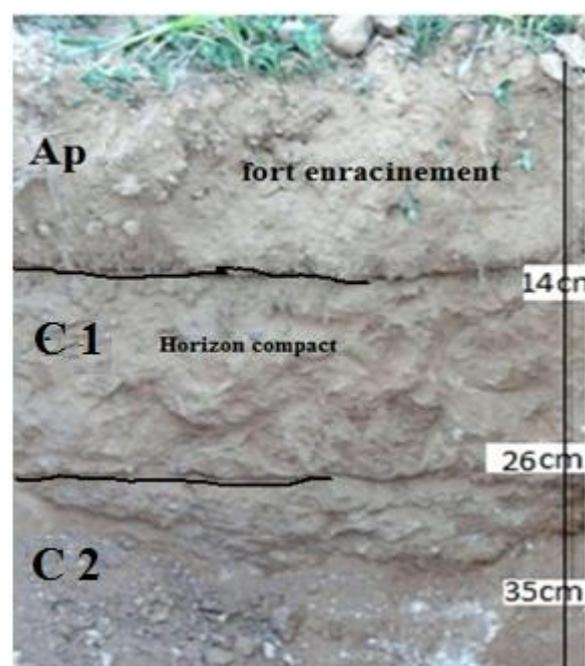


Photo 17. Profil 31

❖ Description morphologique

Ap : 0-14 cm: peu frais ; couleur à l'état humide 5YR 5/6 ; structure particulière associée à une structure polyédrique subangulaire très peu nette ; friable ; sableux ; poreux ; peu compact ; plus de 5 % d'éléments grossiers ; peu organique ; nombreuses racines de blé ;

activité biologique moyenne ; pas de taches; effervescence à l'HCl généralisée ; transition peu nette et régulière.

C1 : 14-27 cm: frais ; couleur à l'état humide 5YR 6/8 ; structure massive ; sableux ; non poreux ; compact ; environ 15 %d'éléments grossiers ; non organique ; peu de racines ; activité biologique faible ; pas de taches; effervescence à l'HCl généralisée ; transition peu nette et régulière.

C2 : 27-35 cm: frais ; couleur à l'état humide 5YR/5/8 ; structure massive ; sableux ; peu compact ; présence de fragments de grés ; pas de racines ; pas d'activité biologique ; pas de taches; forte effervescence à l'HCl ; présence de fragments calcaires.

Les résultats des analyses physico-chimiques sont présentés dans le tableau VIII.

Tableau VIII. Résultats des analyses de P1 de la parcelle 3

Profondeur (cm)		0-14	14-27	27-35
Horizon		Ap	C1	C2
Granulométrie (%)	A	5,6	6,0	3,8
	LF	0,5	0,1	1,7
	LG	5,0	4,2	4,2
	SF	75,8	67,9	68,7
	SG	13,5	20,2	17,3
Carbone organique (%)		0,55	0,03	0,34
Matière organique (%)		0,95	0,05	0,58
Calcaire total (%)		24	27	41
Gypse (%)		0,25	0,45	1,13
Capacité d'échange cationique (Cmole/Kg)		2,93	2,39	1,65
pH eau		7,91	7,94	7,94
Conductivité électrique 1/5 (ms/cm)		1,23	1,7	1,5
Bilan ionique (méq/l)	HCO ³⁻	0,15	0,10	0,30
	SO ₄ ²⁻	1,32	2,73	1,49
	Cl ⁻	2,75	7,75	5,25
	Na ⁺	6,04	10,11	5,10
	Ca ⁺⁺	0,16	0,17	0,15
	K ⁺	0,33	0,32	0,31
	Mg ⁺⁺	0,85	1,63	2,06
Densité apparente		1,37	1,44	1,42
Perméabilité cm/h		13,24		

Le profil P31, comme les autres sols, est peu profond (35 cm) et sa texture est dominée par le sable. Les taux d'argile sont très faibles ($A \approx 5\%$). Les taux de matière organique sont bas et ne dépassent guère le 1%. Ces caractéristiques expliquent les faibles valeurs de la CEC ($CEC < 3 \text{ Cmole/Kg}$). Les taux de calcaire sont relativement forts et augmentent selon la profondeur, passant de 23% en surface à 41% en bas du profil. Le pH est légèrement basique ($7,91 < \text{pH} < 7,94$). La $CE_{1/5}$ oscille entre 1,2 et 1,7 dS/m, ce résultat suggère que ces sols sont affectés par la salinité. La densité apparente varie autour de 1,4 et la perméabilité hydraulique est assez forte (13 cm/h).

Conclusion

D'une façon globale, les quatre sols étudiés sont morphologiquement identiques. Il s'agit de sols peu évolués régosiques de type A/C ne dépassant guère les 40 cm de profondeur. Ils sont particulièrement sableux ($75 < \text{Sable total } \% < 94$) et très peu organiques ($0,05 < \text{MO } \% < 1,11$) et leur CEC est particulièrement faible. Tous ces sols sont diversement pourvus en calcaire ($15 < \text{CaCO}_3 \% < 61$), peu gypseux ($0,25 < \text{CaSO}_4 \% < 1,96$) mais, en revanche, ils sont relativement salés ($0,22 < CE_{1/5} \text{ dS/m} < 1,96$). La solution du sol est généralement chlorurée sodique.

Cependant, ces caractéristiques varient légèrement entre les quatre sols et entre les horizons d'un même sol. Ainsi, la distribution de la salinité dans la plus part des profils des sols cultivés présente un profil salin de type convexe, tandis que le témoin présente un profil salin de type ascendant. Le calcaire se distribue en augmentant progressivement du haut des profils vers le bas des profils et le témoin est plus calcaire que les sols cultivés. Quand aux propriétés physiques, la texture varie dans l'ensemble du profil particulièrement la fraction de l'argile et du sable grossier.

2. QUALITE DE L'EAU D'IRRIGATION

Il est bien connu que la qualité de l'eau d'irrigation a un effet sur les caractéristiques des sols (Hatira, 2005) et sur les rendements des cultures (Laaboudi, 2011). Pour cette étude, l'échantillonnage des eaux d'irrigation a été effectué au niveau du forage 1 pour les parcelles 1 et 2 et au niveau du forage 2 pour la parcelle 3.

Les résultats des analyses de ces eaux sont mentionnés dans le tableau IX.

Tableau IX. Résultats des analyses de l'eau d'irrigation.

Forage	pH	CE (dS/m)	HCO ³⁻ (méq/l)	CO ₃ ⁻ (mé/l)	SO ₄ ²⁻ (mé/l)	Cl ⁻ (méq/l)	Na ⁺ (méq/l)	Ca ⁺⁺ (méq/l)	K ⁺ (méq/l)	Mg ⁺⁺ (méq/l)
Forage 1	7,77	1,69	0,25	0	1,14	5,75	6,91	0,56	0,15	0,32
Forage 2	7, 86	1,55	0,30	0	0,6 3	5,22	5,39	0,52	0,17	0,31

Les résultats du tableau IX révèlent que les eaux d'irrigation sont basiques (pH \approx 7,8) et fortement salés (USSS, 1954) ($1,55 \text{ dS/m} < \text{CE} < 1,69 \text{ dS/m}$). Ces eaux sont particulièrement dominées par les ions Na⁺ (5,3 à 6,9 méq/l) et Cl⁻ (5,22 à 5,75 méq/l) et elles sont donc chlorurées sodiques. Les autres cations et anions sont très minoritaires.

Ces caractéristiques suggèrent que cette eau d'irrigation a des effets sur les caractéristiques des sols.

Les chlorures sont les anions les plus fréquents avec des concentrations allant de 5,22 à 5,75 meq/l. L'eau d'irrigation présente des quantités moins abondantes des sulfates que les chlorures, leurs concentration varient entre 0,69 à 1,14 meq/l. Les bicarbonates se trouvent en des concentrations moindres en comparaison avec les sulfates et les chlorures, ils varient ente 0,25 et 0,30 meq/l. L'eau d'irrigation est complètement dépourvue de carbonate.

3. VARIATION TEMPORELLE DES PROPRIÉTÉS DES SOLS DANS LA PROFONDEUR ET DANS L'ESPACE

Forts des résultats de la caractérisation morphologique et analytique des sols des parcelles étudiées, nous avons creusé dans chaque parcelle trois profils pédologiques. De même, nous avons creusé un profil témoin (non cultivé et non irrigué) à proximité de chaque parcelle. Pour les besoins de cette étude, nous avons prélevé de chaque profil trois échantillons de sol correspondant aux couches 0-10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm. Au total, nous avons creusé 12 profils et prélevé 36 échantillons de sol. Cette opération a été effectuée à la fin de la campagne agricole.

Les paramètres étudiés sont la salinité, le calcaire total, la texture, la densité apparente, la résistance à la traction et la perméabilité hydraulique.

3.1. La salinité

3.1.1. Variations verticales et temporelles

Les résultats analytiques de la salinité (CE), montrent que la CE_{1/5} des échantillons étudiés varie entre 0,15 dS/m et 2,17 dS/m avec une moyenne de 0,93 dS/m. ce résultat suggère que les échantillons des sols étudiés sont peu salés (Ziza, 2006). Les résultats statistiques sont présentés au tableau X.

Tableau X. Variabilité de la salinité des échantillons étudiés.

	Moyenne	Minimum	Maximum	Ec-Type	CV%
CE ds/m	0,93	0,15	2,17	0,64	68

Le tableau X montre aussi une importante variabilité de la CE_{1/5} des différents échantillons (CV ≈ 68 %). Cette salinité varie dans le profil et dans l'espace. En effet, la figure 41 montre que les profils salins des trois parcelles cultivées sont analogues et sont de type convexe. Ce résultat signifie qu'il y a eu une légère accumulation saline dans les horizons médians. Par contre, le sol témoin (non cultivé) présente un profil descendant. L'alternance de périodes d'humidification (irrigation) et de dessèchement des sols a probablement joué un rôle important dans la dynamique des sels et leur accumulation en subsurface. En effet, les eaux d'irrigation responsables des

mouvements descendants des eaux seraient insuffisantes pour lixivier complètement les sels solubles et les évacuer hors du profil. Les fortes chaleurs et la forte sécheresse sont responsables des mouvements ascendants et provoqueraient donc une remontée capillaire et par conséquent une remontée des sels dans le profil. Ce jeu de descente et de remontée des sels a provoqué leur accumulation dans la partie médiane du profil, du moins en ce qui concerne cette période de l'année (fin de la campagne agricole). La succion de l'eau par les racines au raient également contribué à la diffusion des sels dans cette partie du profil.

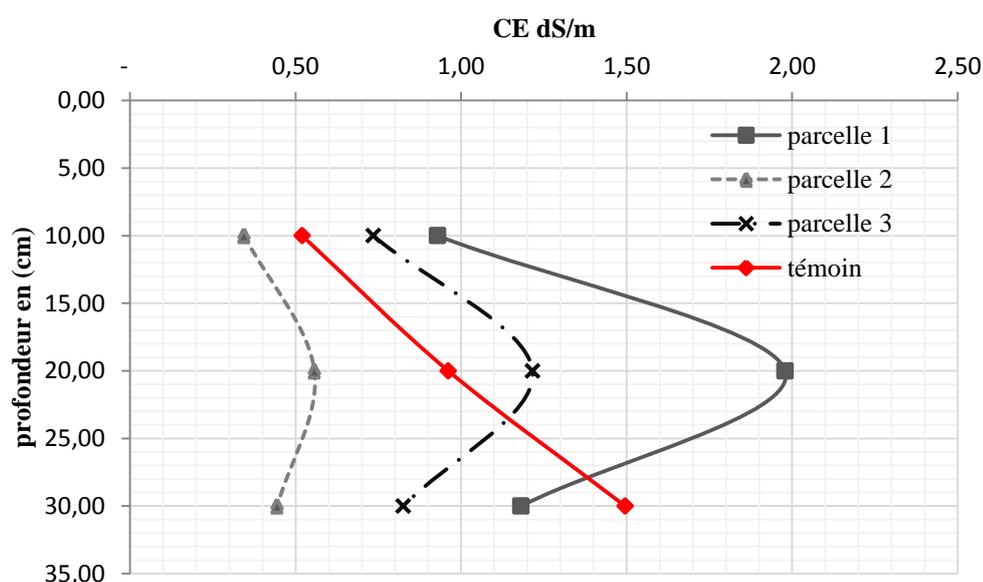


Figure 41. Profils salins des parcelles étudiées.

La figure 41 révèle aussi que la salinité, quelle que soit la couche de sol considérée, décroît dans le sens parcelle 1 > parcelle 3 > parcelle 2. Elle montre aussi que le profil salin moyen des sols non cultivés s'intercale entre ceux des parcelles 2 et 3 jusqu'à une profondeur de 20 cm. Au delà de cette profondeur, la salinité moyenne des sols témoins devient plus forte que celles des sols cultivés. Les valeurs de la CE varient de 0,34 à 0,93 dS/m dans les couches de surface, de 0,56 à 1,98 dS/m dans les couches médianes et de 1,49 à 0,44 dS/m dans les couches de profondeur comme le montre le tableau XI. Ce tableau montre aussi que quelle que soit la parcelle considérée, les différences de salinité sont statistiquement non significatives entre les couches d'un même profil. Il montre également que les différences sont statistiquement non significatives entre les couches de même catégorie des quatre parcelles considérées. Cependant, la comparaison des moyennes a révélé une différence significative entre H1

et H2 dans la parcelle 1. Cette comparaison a révélé aussi une différence significative entre la parcelle 1 et la parcelle 2 dans l'horizon de subsurface pour la comparaison entre parcelles (annexe 4). Ce résultat signifie que d'une façon globale, même si des différences de salinité ont été détectées dans le profil et dans l'espace, ces différences sont statistiquement non significatives et témoignent donc du faible impact de l'irrigation et du temps sur la salinité des sols.

Tableau XI. Analyse de la variance de la variation verticale entre couches présentée en colonnes et la variation spatiale entre parcelles présentée en lignes des données de la CE en dS/m.

	Témoin	parcelle 1	parcelle 2	parcelle 3	Probabilité	Signification
H 1	0,52 ± 0,54	0,93 ± 0,70	0,34 ± 0,13	0,73 ± 0,42	0,56	NS
H 2	0,96 ± 0,70	1,98 ± 0,18	0,56 ± 0,53	1,22 ± 0,57	0,07	NS
H 3	1,49 ± 0,79	1,18 ± 0,31	0,44 ± 0,24	0,82 ± 0,55	0,18	NS
Probabilité de signification	NS	NS	NS	NS		

Les différences entre les profils salins des parcelles cultivées et ceux des parcelles témoins correspondantes sont illustrées par la figure 42.

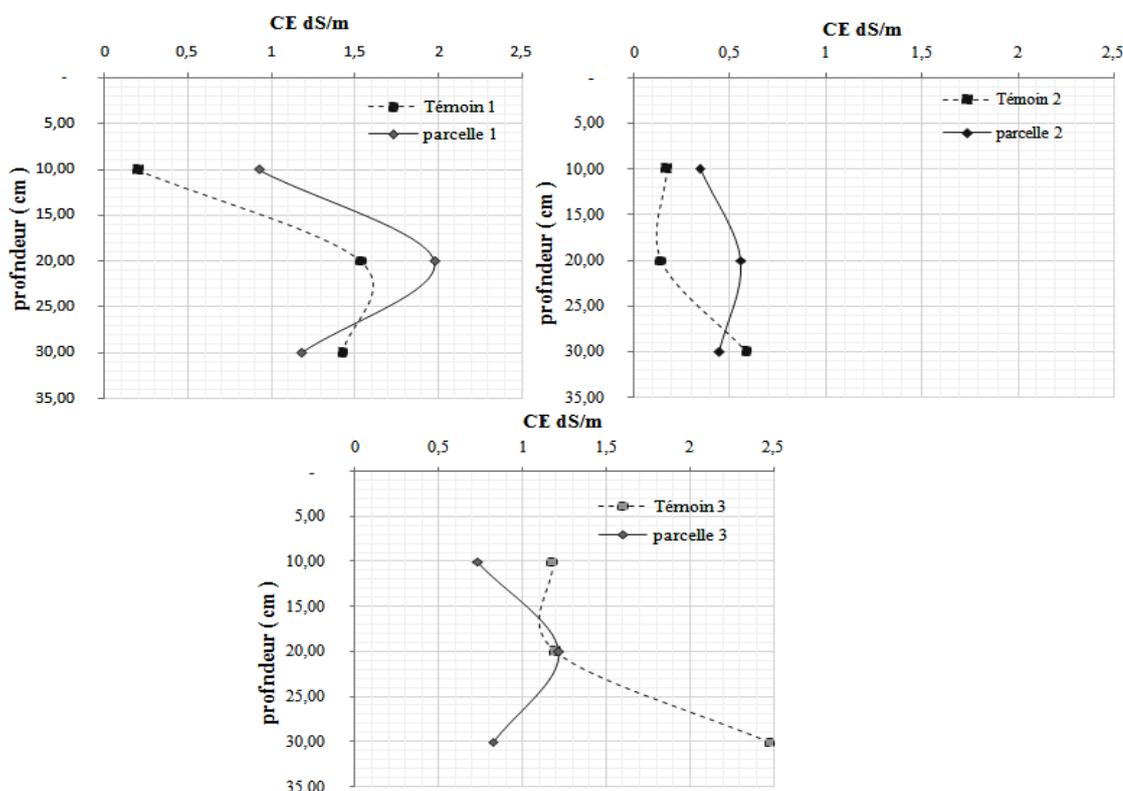


Figure 42. Profils salins des trois parcelles étudiées.

L'observation de la figure 42 montre que les profils salins des trois parcelles cultivées sont tous convexes et qu'ils ont donc le même comportement dans le sol. En revanche, les profils salins des parcelles non irriguées sont convexes dans la parcelle 1 et ils sont concaves dans les parcelles 2 et 3. La figure 42 révèle aussi que d'une façon globale, l'irrigation a provoqué une augmentation de la salinité des horizons médians dans les parcelles cultivées et une diminution de la salinité de la couche de profondeur. En revanche, il y a une légère augmentation de la salinité dans les couches de surfaces des parcelles 1 et 3 et une légère augmentation de la salinité dans la parcelle 2. Cette évolution non uniforme des profils salins dans le temps semble indiquer que la part de salinité due aux eaux d'irrigation est minime. De même, du fait que les profils salins d'une même parcelle sont assez proches l'un de l'autre, la salinité des sols cultivés serait essentiellement d'origine primaire.

3.1.2. Synthèse et discussion

L'analyse statistique révèle une importante variabilité des données de la CE. Cependant, l'analyse de la variance ne montre aucune différence significative de la CE dans le profil et dans l'espace. Ce résultat signifie que la salinité ne varie pas fortement en fonction des facteurs prédictifs, à savoir la durée d'exploitation des parcelles et leurs profondeurs. En effet, les résultats ont montré que les plus faibles valeurs de la conductivité électrique sont apparues au niveau de la parcelle 2 qui est cultivée pour la septième année au lieu d'apparaître dans la parcelle 1 récemment mise en culture. De ce fait, la durée de la mise en valeur en irrigué dans la région d'étude n'a pas un effet significatif sur l'accentuation de la salinité et cette dernière serait d'origine primaire plutôt que secondaire. Les résultats ont montré aussi que la salinité des sols témoins varie d'un site à l'autre et rejoint donc les conclusions de Ziza (2006).

Bien que la salinité soit faible, elle présente des profils salins convexes dans toutes les parcelles cultivées à cause probablement de l'effet combiné des eaux de percolation, de la remontée capillaire et de la succion provoquée par les racines.

3.2. Le calcaire

3.2.1. Variations verticales et temporelles

Les résultats portés dans le tableau XII indiquent que les taux de calcaire total (CaCO_3 %) varient assez fortement dans les sols étudiés ($\text{CV} \approx 41$ %). Le taux moyen en calcaire total est de 30 %, il varie entre 14 % et 61%. Ce résultat signifie que les sols étudiés sont très riches en calcaire selon les normes de Baize (1988).

Tableau XII. Statistiques descriptives des taux de calcaire total

Moyenne	Minimum	Maximum	Ec-Type	CV%
30 %	14 %	61 %	12 %	41

La figure 43 révèle que tous les profils calcaires des sols étudiés sont analogues.

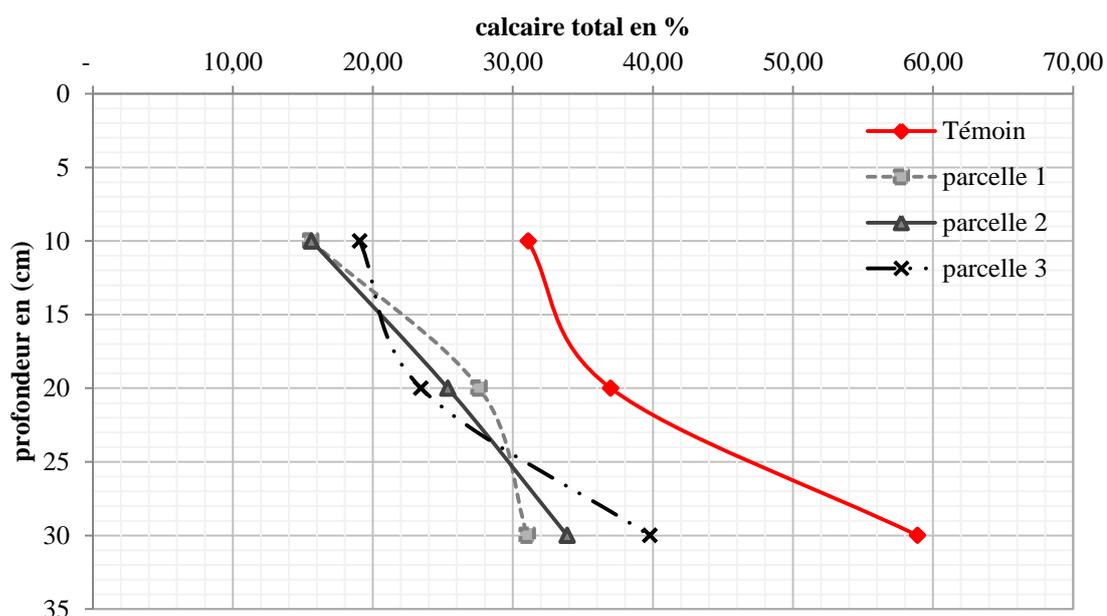


Figure 43. La distribution du calcaire dans les profils du témoin moyen et des trois parcelles.

En effet, tous les profils calcaires sont de type descendant. Cette figure montre aussi que le profil témoin moyen se situe franchement à droite des autres profils et signifie donc que les sols irrigués sont nettement moins calcaires que les sols qui ne le sont pas. En effet, les valeurs les plus faibles sont enregistrées au niveau des couches de surface, variant de 16 % à 19 % dans les parcelles cultivées contre 32 % dans le profil témoin

moyen. Ces taux augmentent dans les couches médianes pour se situer entre 23 % et 27 % dans les parcelles cultivées et autour de 37 % dans le sol témoin moyen. Les plus fortes valeurs sont enregistrées dans les couches de profondeur, elles varient de 31 % à 40 % dans les sols cultivées et elles se situent autour de 59 % dans le témoin moyen. Dans l'absolu, ce résultat signifie que l'irrigation aurait eu un effet sur la solubilisation et la lixiviation du carbonate de calcium. Dans ce sens, l'analyse de la variance à un seul facteur (tableau XIII) révèle que les différences entre les taux de calcaires de H1, H2 et H3 sont toutes significatives dans le profil (variation verticale). Ces différences sont également toutes significatives entre les horizons de même catégorie (surface, subsurface et profondeur) entre les parcelles (variation spatiale). Ainsi, la comparaison des moyennes entre horizons du même profil et entre les profils des parcelles a montré que les différences sont généralement significatives (annexe 5). Ce résultat peut signifier que l'irrigation et la durée de la mise en culture auraient eu un effet significatif sur les teneurs des sols en calcaire total. Ce résultat peut être plausible si on considère les importantes doses d'irrigation utilisées dans cette région et l'importance de la perméabilité hydraulique des sols à cause de leur texture sableuse

Tableau XIII. Analyse de la variance verticale entre couches présentées en colonnes et la variation spatiale entre parcelles présentées en lignes des données du calcaire total

	Témoin	parcelle 1	parcelle 2	parcelle 3	Probabilité	signification
H 1	31,09 ± 3,55	15,57 ± 1,45	15,63 ± 1,64	19,07 ± 3,87	0,003	DS
H 2	36,99 ± 4,14	27,60 ± 1,10	25,36 ± 1,10	23,44 ± 3,21	0,009	DS
H 3	58,91 ± 4,82	31,04 ± 2,78	33,88 ± 3,55	39,78 ± 1,29	0,000	DS
probabilité	0,001	0,001	0,001	0,003		
signification	DS	DS	DS	DS		

Par ailleurs, le test de Newman-Keuls pour un seuil de probabilité de 0,05 a permis de regrouper les valeurs des taux de calcaire obtenues dans les différentes couches au niveau du témoin et des trois parcelles en trois groupes homogènes pour la variation spatiale (temps) (tableau XIV). Ce test révèle que les horizons du sol témoin constituent à chaque fois un groupe à part par rapport aux horizons des sols cultivés et conforte donc l'hypothèse sur l'effet de l'irrigation sur la diminution des taux de calcaire.

Tableau XIV. Groupes homogènes obtenus pour la variation spatiale entre parcelles du calcaire.

groupes homogènes	Groupe A	Groupe B	Groupe C
H 1	parcelle 1, parcelle 2 et parcelle 3	témoin	
H 2	parcelle 1, parcelle 2 et parcelle 3	témoin	
H3	parcelle 1 et parcelle 2	parcelle 2 et parcelle 3	Témoin

La comparaison des sols de chaque parcelle avec son propre témoin révèle que toutes les parcelles étudiées présentent des différences avec leurs témoins en termes du taux et de distribution du calcaire dans les profils (figure 44). Les profils témoins présentent un même type d'allure avec des valeurs plus élevées par rapport aux sols cultivées. Les grandes valeurs des taux de calcaire se retrouvent dans les couches de profondeur, puis diminuent régulièrement dans les couches de sub-surface et encore un plus dans les couches de surface. Cette comparaison permet de constater que les sols de la région d'étude sont au départ très calcaires, mais dès que le sol est mis en irrigation, il perd presque la moitié de son calcaire au bout de trois ans et se stabilise par la suite.

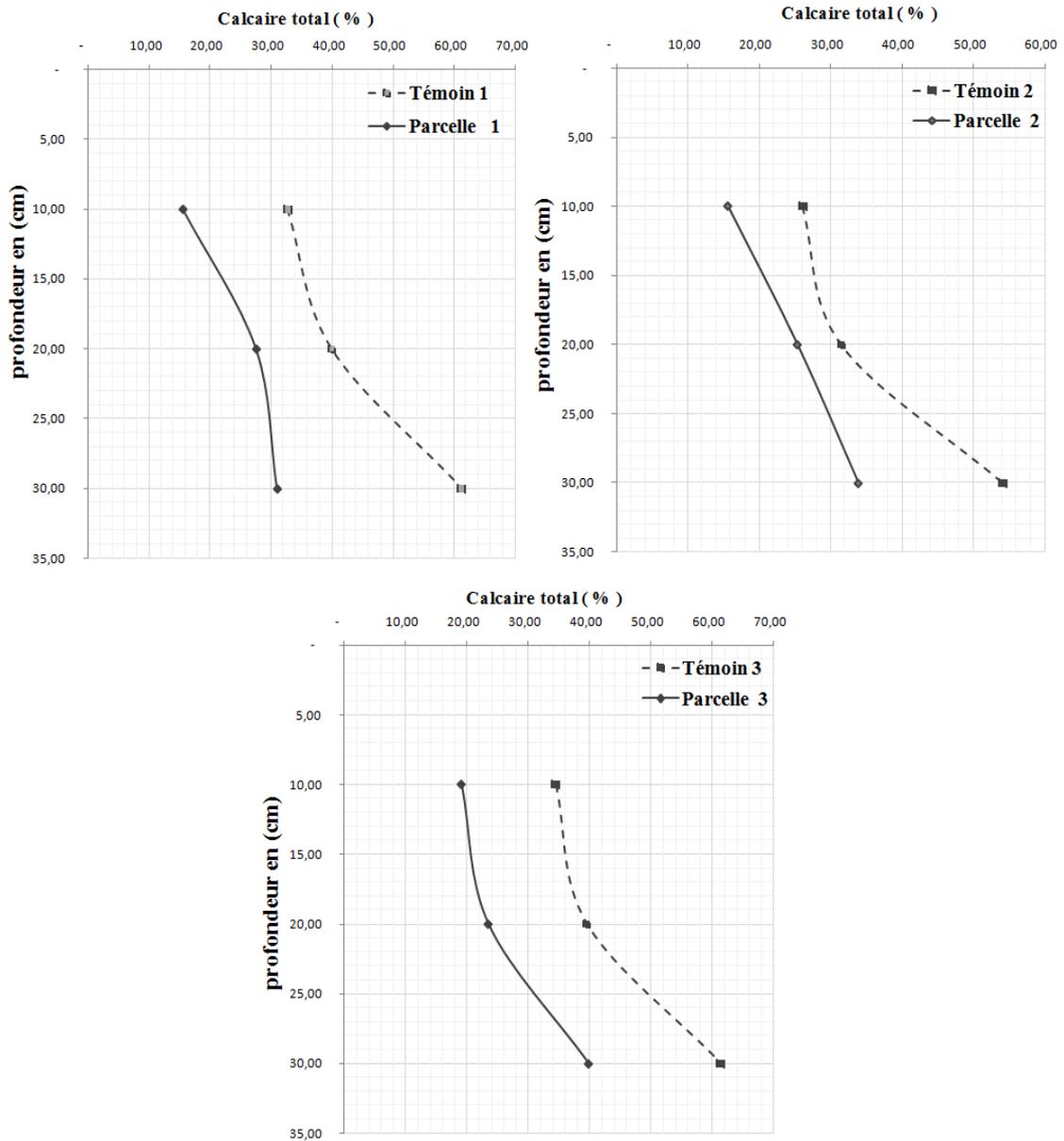


Figure 44. Profils de distribution des taux de calcaire dans les parcelles et dans les témoins.

3.2.2. Synthèse et discussion

Ces résultats suggèrent que la variation spatiale du calcaire total est très importante. En effet, les taux de calcaire sont plus forts dans les sols témoins par rapport aux sols cultivés en irrigué. D'après les tests statistiques, la variation des taux de calcaire est toujours significative que se soit pour la variation verticale ou spatiale. Le test de Newman et Keuls a montré que cette variation est visible dès la troisième année de mise en culture à cause de la forte lixiviation du calcaire par les eaux d'irrigation.

3.3. La texture du sol

3.3.1. Variations verticales et temporelles

Les statistiques des résultats de l'analyse granulométrique présentées au tableau XV révèlent une importante variabilité de la composition granulométrique entre les échantillons, en particulier celle des fractions limoneuses ($CV \approx 70\%$). Cependant, les taux des limons fins et grossiers sont, au même titre que ceux des argiles, très faibles (moyennes $\approx 6\%$; Maximum $< 17\%$). En revanche, les taux de la fraction grossière sont dominants dans ces sols et ils constituent à eux seuls environ les 3/4 de la terre fine.

Tableau XV. Statistiques descriptives des taux des fractions granulométriques des échantillons étudiés

	Moyenne	Minimum	Maximum	Ec-Type	CV%
A %	6,2 %	3,0 %	11,4 %	1,9 %	31
LF %	5,2 %	0,9 %	14,9 %	3,8 %	73
LG %	6,8 %	1,2 %	17,8 %	4,7 %	69
SF %	59,9 %	43,3 %	76,3 %	10,9 %	18
SG %	21,9 %	10,2 %	45,2 %	7,9 %	36

La figure 45 illustre bien ce résultat et montre clairement la prédominance de la fraction sableuse sur celles des limons et des argiles aussi bien dans les 3 parcelles cultivées que dans le témoin moyen.

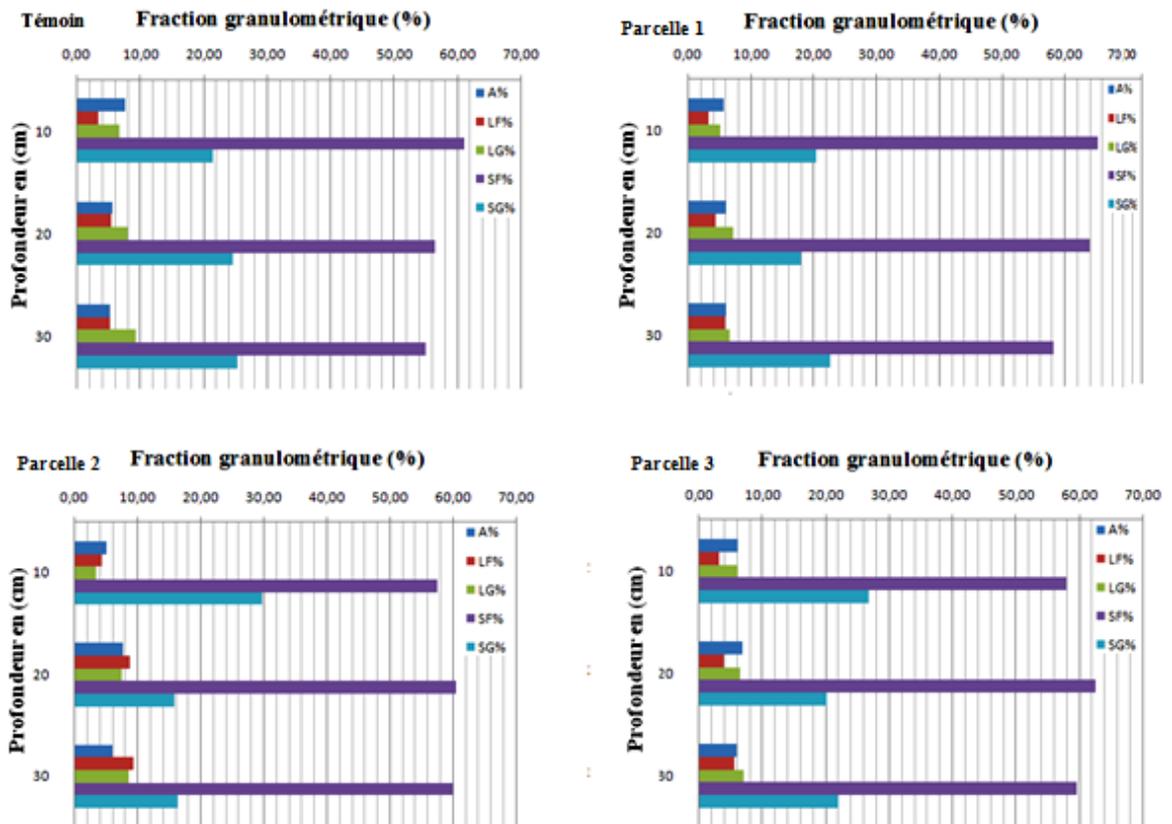


Figure 45. Distribution de la fraction granulométrique dans le témoin et les trois parcelles étudiées.

Cette texture très grossière affectera sûrement certaines propriétés physiques (perméabilité hydraulique, rétention en eau, plasticité..) et chimiques (CEC) de ces sols. En tenant compte de ce qui précède, nous avons réalisé les profils argileux des quatre parcelles pour détecter un éventuel lessivage des argiles dans le temps (figure 46).

Les profils argileux du témoin moyen et des trois parcelles sont illustrés par la figure 46.

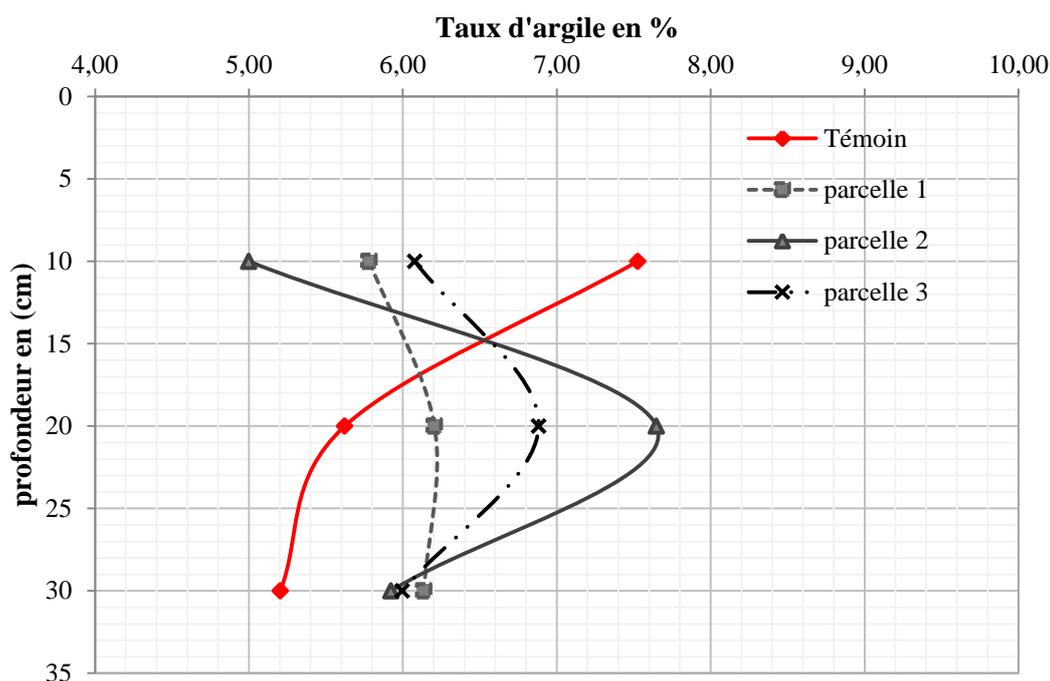


Figure 46. Profils argileux du sol témoin et des sols des trois parcelles.

L'observation de cette figure révèle deux faits importants. D'une part, les taux d'argiles sont tous faibles ($5\% < A < 7,5\%$) et par conséquent la mise en évidence d'un quelconque lessivage de cette fraction granulométrique serait assez hasardeux. D'autre part, le profil argileux du profil témoin moyen est ascendant et légèrement concave alors que ceux des parcelles cultivées sont convexes.

La comparaison de chaque profil argileux avec son propre témoin le confirme (figure 47). Ce résultat signifie que malgré des taux d'argile très faibles, il y aurait eu une légère accumulation des argiles dans la partie médiane du profil. Cependant, seules des observations micromorphologiques sont en mesure de prouver si cette accumulation est la conséquence d'un lessivage des argiles ou non. Dans le cas positif, la mise en culture en irrigué de ces sols mobilise les argiles et les entraîne vers le bas du profil.

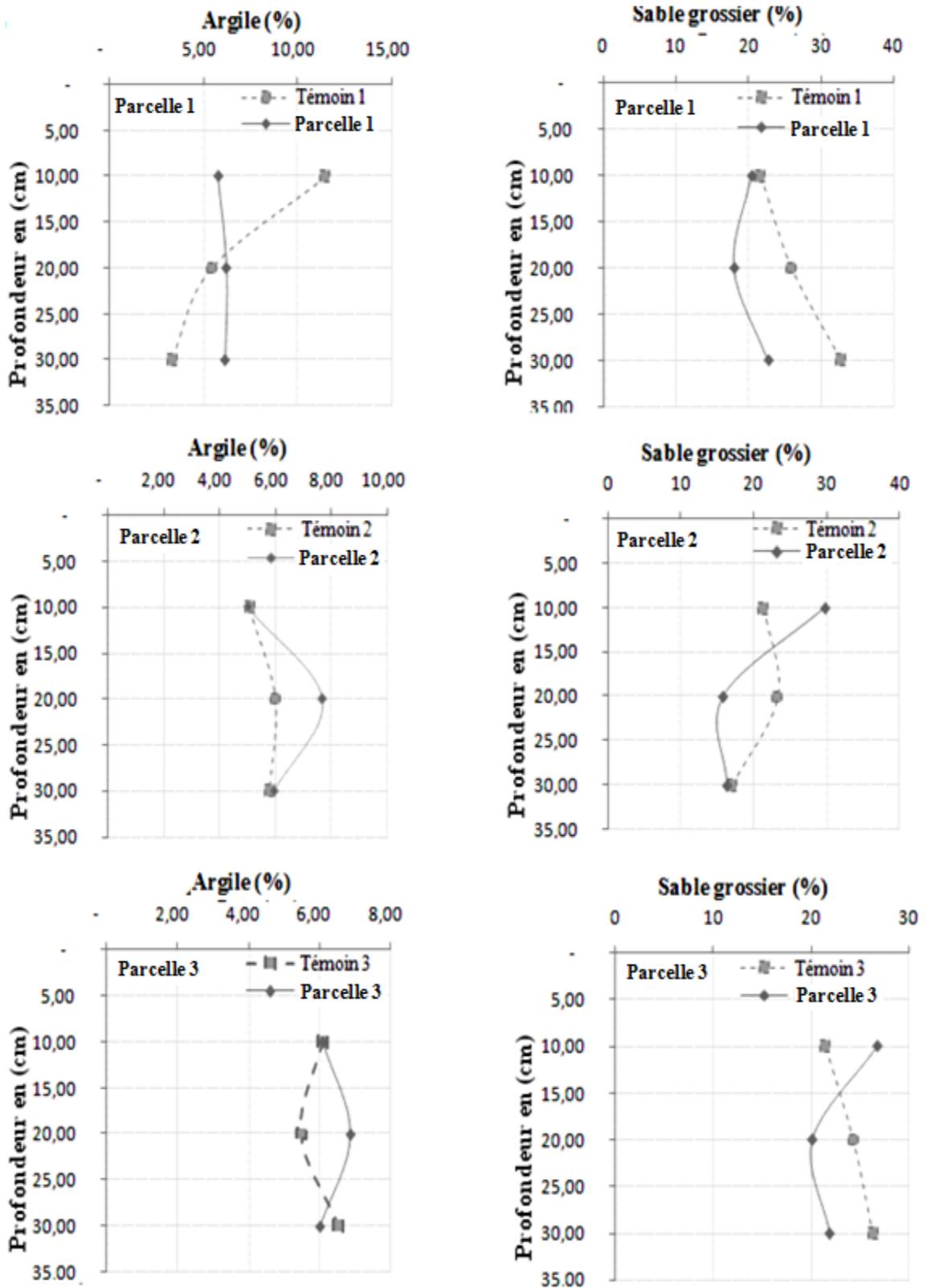


Figure 47. Profils argileux et profils sableux des trois parcelles et de leurs témoins respectifs.

Cependant, l'analyse de la variance à un seul facteur et la comparaison des moyennes des différents taux des fractions granulométriques (tableau XVI) montre que toutes les différences sont statistiquement non significatives aussi bien dans le profil d'une même parcelle qu'entre les profils des différentes parcelles. La fraction de sable grossier de la parcelle 2 constitue un cas particulier. La comparaison des moyennes entre parcelles a révélé des différences significatives des taux d'argile entre les couches de subsurface entre le témoin et parcelle 2 et entre le témoin et la parcelle 3. De même, les différences des moyennes des taux de sable grossier entre témoin et la parcelle 1 et entre le témoin et la parcelle 2 sont significatives. La différence entre H1 et H2 dans la parcelle 2 est également significative (annexe 4).

Tableau XVI. Analyse de la variance de la variation verticale entre couches présentée en lignes et la variabilité spatiale entre parcelles présentée en colonnes de la distribution de la fraction granulométrique.

		H 1	H 2	H3	Probabilité et signification		
Témoin	A %	7,52 ± 3,72	5,62 ± 0,82	5,20 ± 1,91	0,44	NS	
	LF %	3,23 ± 1,79	5,33 ± 4,04	5,15 ± 3,54	0,61	NS	
	LG %	6,68 ± 6,83	7,97 ± 6,89	9,29 ± 4,90	0,86	NS	
	SF %	61,11 ± 11,45	56,55 ± 11,86	54,98 ± 14,28	0,80	NS	
	SG %	21,44 ± 1,77	24,50 ± 3,77	25,36 ± 9,44	0,58	NS	
Site 1	A %	5,78 ± 3,00	6,20 ± 2,05	6,14 ± 7,46	0,97	NS	
	LF %	3,36 ± 2,65	4,46 ± 4,92	5,88 ± 3,47	0,79	NS	
	LG %	5,14 ± 3,70	7,21 ± 6,77	6,64 ± 2,71	0,91	NS	
	SF %	65,25 ± 12,52	64,12 ± 16,38	58,57 ± 14,45	0,83	NS	
	SG %	20,45 ± 4,18	17,9 ± 3,64	22,77 ± 15,05	0,82	NS	
Site 2	A %	5 ± 1,3	7,65 ± 1,83	5,92 ± 1,97	0,09	NS	
	LF %	4,20 ± 3,10	8,740 ± 5,69	9,23 ± 5,89	0,44	NS	
	LG %	3,42 ± 3,70	7,36 ± 6,40	8,48 ± 8,06	0,61	NS	
	SF %	57,63 ± 4,14	60,45 ± 8,02	60,01 ± 15,30	0,93	NS	
	SG %	29,73 ± 8,24	15,78 ± 5,31	16,34 ± 3,23	0,03	S	
Site 3	A %	6,07 ± 2,06	6,88 ± 1,55	5,99 ± 3,85	0,88	NS	
	LF %	3,14 ± 2,52	3,90 ± 3,50	5,48 ± 3,35	0,61	NS	
	LG %	6,10 ± 2,79	6,38 ± 2,84	6,99 ± 2,94	0,82	NS	
	SF %	57,94 ± 16,46	62,69 ± 13,01	59,61 ± 13,74	0,91	NS	
	SG %	26,73 ± 17,14	20,14 ± 7,56	21,89 ± 6,66	0,77	NS	
Probabilité et signification	A %	0,68	NS	0,21	NS	0,96	NS
	LF %	0,94	NS	0,58	NS	0,66	NS
	LG %	0,78	NS	0,99	NS	0,94	NS
	SF %	0,85	NS	0,89	NS	0,97	NS
	SG %	0,63	NS	0,24	NS	0,68	NS

Le test de Newman-Keuls pour un seuil de probabilité de 0,05 a permis de regrouper les valeurs du taux de sable grossier obtenues dans les différentes couches au niveau de la parcelle 2 en un seul groupe homogène pour la variation verticale (profondeur) (tableau XVII).

Tableau XVII. Groupes homogènes de la variation du sable grossier dans le profil.

Groupes homogènes	Groupe A	Groupe B	Groupe C
Parcelle 2	H2, H3 et H1	/	/

3.3.2. Synthèse et discussion

Les résultats obtenus montrent que les fractions les plus variables pour l'ensemble des profils des parcelles étudiées sont la fraction argileuse et la fraction de sable grossier. La distribution dans le profil de ces deux fractions dans les sols témoins est singulièrement différente de celle des parcelles irriguées. En effet, les résultats ont révélé une légère tendance à la diminution des taux d'argile des couches de surface accompagnée d'une légère augmentation dans les couches de subsurface des parcelles irriguées par rapport à leurs témoins. Ce phénomène peut être expliqué par l'effet de l'irrigation qui entraîne la fraction granulométrique la plus fine en bas des profils. En ce qui concerne la fraction du sable grossier, nous assistons au phénomène inverse. Ce résultat ne signifie nullement un quelconque déplacement des grains de sable du bas vers le haut du profil, l'augmentation des taux de sable en surface et leur diminution dans les couches de subsurface ne peuvent être expliquées que par un enrichissement ou appauvrissement relatif de ce constituant suite au mouvement des particules argileuses. Ce phénomène est particulièrement visible dans les parcelles 2 et 3 mises en valeur depuis longtemps dans un sol filtrant dans lesquelles l'irrigation a pu affecter la distribution naturelle de la granulométrie en lessivant les particules les plus fines en bas des profils et laissant la fraction grossière en surface (Lesturgez, 2005). De ce fait, l'hypothèse du lessivage des argiles est donc confortée par l'antagonisme entre la distribution des fines particules et des grosses particules. En effet, la fraction fine migre vers le bas du profil et la fraction grossière qui sera empêchée par la taille des pores reste en surface et provoque donc un enrichissement relatif.

Nous pouvons donc déduire que la durée de mise en valeur et l'intensité de l'irrigation dans la région d'Adrar peuvent perturber la distribution naturelle de la fraction granulométrique.

3.4. La densité apparente

3.4.1. Variations verticales et temporelles

Le tableau XVIII indique que toutes les densités apparentes sont faibles à moyennes, elles sont comprises entre 1,2 et 1,5. Ces densités varient très peu d'un échantillon à l'autre (CV = 7%). Nous rappelons que ces sols sont tous très sableux et très peu structurés. Leur mise en culture n'aurait que de faibles répercussions sur leur structuration et donc sur leur densité apparente.

Tableau XVIII. Statistiques descriptives relatives aux densités apparentes

	Moyenne	Minimum	Maximum	Ec-Type	CV%
Da	1,3	1,2	1,5	0,09	7

Les distributions dans le profil de ces densités apparentes sont illustrées par la figure 48. L'analyse de cette figure fait apparaître deux types de profils de distribution. Le premier type est concave ; il est représenté par le profil témoin moyen et par celui de la parcelle 1. Ces deux profils sont très proches l'un de l'autre. Ce résultat signifie qu'après trois années de mise en culture, il n'y a pratiquement pas de modification notable de la densité apparente. Le deuxième type de profil est convexe ; il est représenté par les profils des parcelles 2 et 3. Ces deux dernières se situent largement à droite des profils des parcelles témoin et 1. Ce résultat suggère qu'une mise en culture prolongée de plus de sept années engendre une augmentation de la densité apparente, en particulier dans les couches de subsurface.

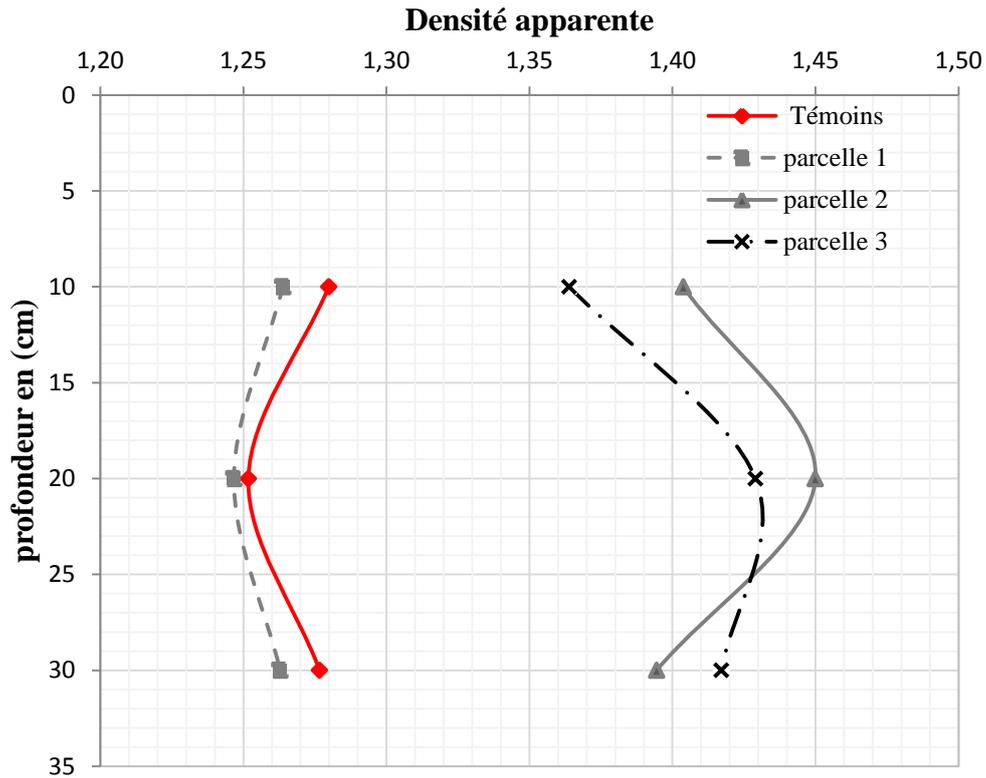


Figure 48. Evolution de la densité apparente pour le témoin moyen et les trois parcelles.

La comparaison des profils de chaque parcelle avec son propre témoin (figure 49) le confirme. En effet, la figure 49 met en évidence la similitude du profil de la parcelle 1 avec son témoin d'une part (profils concaves et très proches l'un de l'autre) et la similitude des profils des parcelles 2 et 3 (profils convexes). Ces deux derniers profils sont assez éloignés de leurs témoins respectifs (profils concaves), surtout en ce qui concerne leurs couches de subsurface.

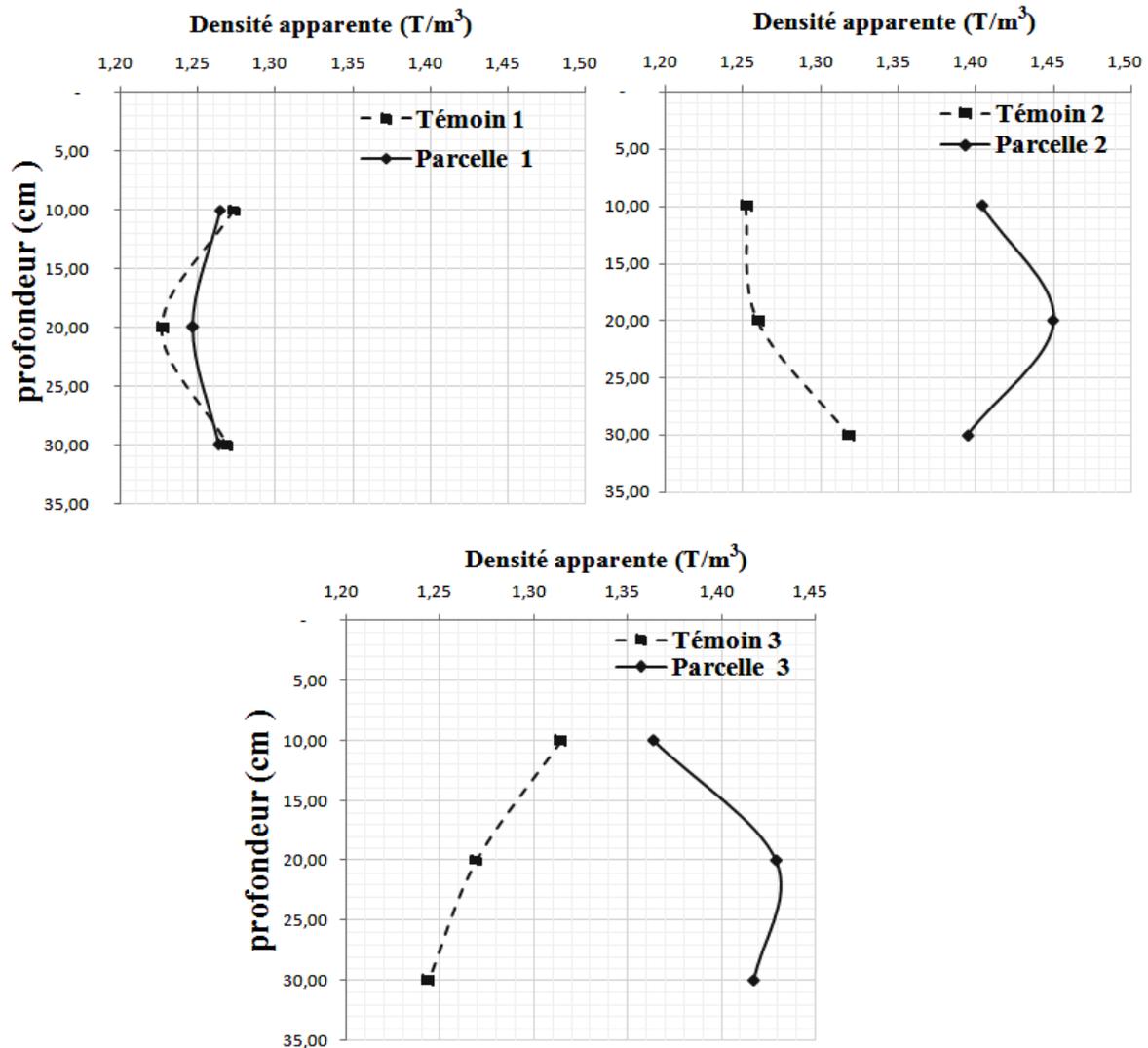


Figure 49. Comparaison de la densité apparente de chaque parcelle avec son propre témoin.

L'analyse de la variance à un seul facteur de la densité apparente (tableau XIX) confirme ce résultat et révèle que les différences entre les densités apparentes d'un même type de couches entre parcelles sont statistiquement significatives. En revanche, ces différences sont statistiquement non significatives au sein d'une même parcelle. Ainsi, la comparaison des moyennes pour la variation spatiale (entre parcelles) a révélé que les différences sont généralement significatives sauf pour quelques cas particuliers comme entre témoin et la parcelle 2 dans l'horizon de subsurface et entre le témoin moyen et les trois parcelles cultivées (annexe 4). Cependant, les différences des moyennes entre les horizons de la même parcelle sont non significatives sauf dans la

parcelle 3 entre H1 et H2 (annexe 4). De ce fait, ce résultat signifie que la mise en culture des parcelles a engendré une modification de leur densité apparente.

Tableau XIX. Analyse de la variance de la densité apparente dans le profil et dans l'espace

	Témoin	parcelle 1	parcelle 2	parcelle 3	Probabilité	signification
H 1	1,27 ± 0,05	1,26 ± 0,083	1,40 ± 0,09	1,36 ± 0,04	0,01	DS
H 2	1,25 ± 0,08	1,25 ± 0,08	1,45 ± 0,07	1,43 ± 0,06	0,00	DS
H 3	1,28 ± 0,05	1,26 ± 0,04	1,39 ± 0,13	1,42 ± 0,06	0,03	DS
probabilité	0,52	0,69	0,58	0,11	/	/
signification	NS	NS	NS	NS	/	/

Le test de Newman-Keuls pour un seuil de probabilité de 0,05 a permis de regrouper les valeurs de la densité apparente des différentes couches du témoin et des trois parcelles en trois groupes homogènes (tableau XX).

Tableau XX. Groupes homogènes de la densité apparente

Groupes homogènes	Groupe A	Groupe B	Groupe C
H 1	Témoin et la parcelle 1	Témoin et la parcelle 3	parcelle 3 et parcelle 2
H 2	Témoin et la parcelle 1	parcelle 3 et parcelle 2	
H 3	Témoin et les trois parcelles	/	/

Ce résultat conforte donc l'hypothèse qui stipule que la mise en culture a engendré une modification dans le temps de la densité apparente. Il s'avère donc que ces sols ont subi une compaction qui se traduit par une augmentation de leur densité apparente qui engendrerait une limitation du système racinaire, en particulier dans les couches de subsurface comme le montre la figure 50. Cette modification de la densité apparente est particulièrement mise en évidence qu'après sept ans et quatorze ans de mise en culture. Ce résultat rejoint celui de Carter et Gregorich (2010) qui ont montré qu'après trois ans de mise en culture, il pourrait y avoir une augmentation de la densité apparente. Ce changement pourrait être expliqué par l'effondrement de la structure du sol sous l'effet de l'irrigation, et le nombre de passages répétés des engins de travail du sol.

La figure 50 illustre la formation d'une couche compacte en subsurface. En effet, les photos (c) et d de la figure 50 montrent un système racinaire localisé dans les couches de surface des parcelles 2 et 3. Le développement du système racinaire qui ne dépasse

guère les 10 et 14 cm de profondeur semble donc bien gêné par la couche plus dense située en subsurface. Par contre, le système racinaire est bien développé dans la parcelle 1, il atteint environ 35 cm de profondeur et ne semble être gêné par aucun obstacle comme il est illustré par la photo (b) de la figure 50.

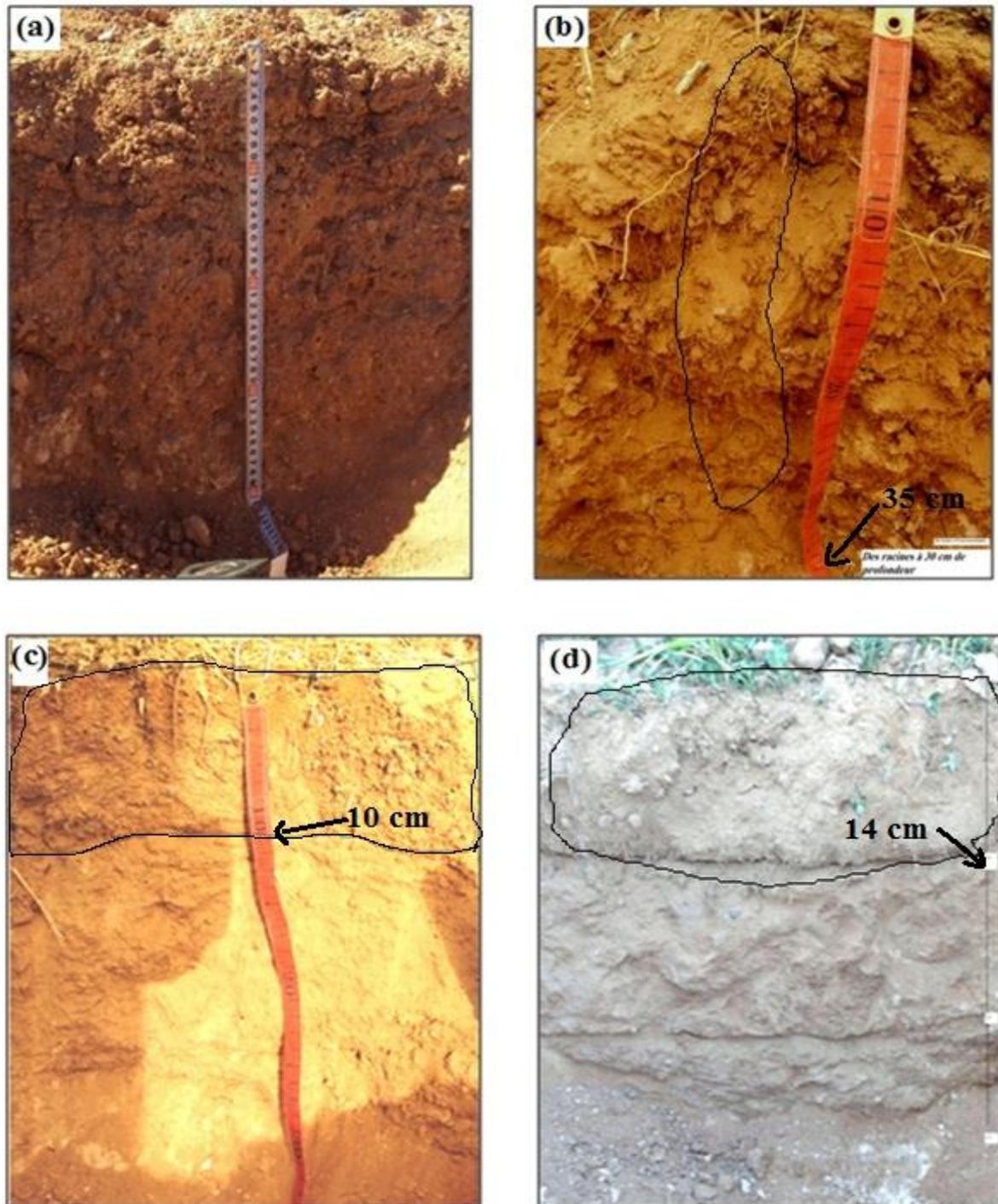


Figure 50. Effet de la compaction sur le développement du système racinaire (a) témoin, (b) parcelle 1, (c) parcelle 2 et (d) parcelle 3.

3.4.2. Synthèse et discussion

Les résultats obtenus montrent que les valeurs de la densité apparente des couches de surface sont plus faibles que celles des couches de subsurface. Ce résultat concorde bien avec ceux de Ampoorter (2007), Dam et al. (2005), Kasper et al. (2009) et So et al. (2009) et qui ont montré que la densité apparente est toujours faible dans les couches de surface par rapport à celle des couches sous-jacentes dans les sols cultivés. Ce résultat est particulièrement remarquable dans les parcelles 2 et 3 qui ont été mises en cultures respectivement depuis 7 et 14 ans. Dans ce sens, nous avons montré auparavant que les profils texturaux des parcelles 2 et 3 se caractérisent par une légère accumulation des particules fines dans les couches de subsurface. Le mélange de petites particules à de grosses particules fait diminuer le volume poral et augmenter ainsi la densité apparente comme montré par Lesturgez (2005). Ainsi, sous l'irrigation, le sol se compacte sous son propre poids par la destruction des agrégats qui fait disparaître l'espace porale entre les unités élémentaires de la structure (Crescimanno et al., 2007). De ce fait, les horizon de subsurface sont sujets à la compaction qui se manifeste par l'augmentation de la densité apparente et la résistance à la pénétration (Mouazena et al., 2002 ; Lal et Chukla, 2004 ; Hamza et al., 2002 ; Hamza et Anderson, 2005 ; Motavalli et al., 2003 ; Lesturgez, 2005 ; Ampoorter et al., 2007 ; Flowers et Lal, 1998). Les principaux facteurs de cette compaction sont les techniques culturales utilisées et les précédents culturaux.

La densité apparente est souvent plus faible là où le sol n'est pas travaillé et là où la structure n'est pas massive ce qui est d'ailleurs le cas des sols témoins. Cette évolution structurale caractérisée par le passage d'une structure polyédrique où la macroporosité formée par l'espace entre et inter agrégats à une structure massive et compacte constitue un changement radical dans les propriétés physiques des sols étudiés.

3.5. La résistance à la traction

3.5.1. Variations verticales et temporelles

Nous rappelons que la mesure de la résistance à la traction a été réalisée sur des agrégats artificiels obtenus par fragmentation de mottes d'environ 10 mm de diamètre arrondies manuellement par un disque abrasif. Ces agrégats sont soumis progressivement à des efforts de compression en exerçant un poids de plus en plus grand jusqu'à ce que

l'agrégat se détruit. Le poids à partir duquel l'agrégat s'effondre est pris comme valeur de la résistance à la traction de cet agrégat.

La résistance à la traction (tableau XXI) pour l'ensemble des couches des sols varie dans une large gamme de valeurs comprises entre 333 g et 2116 g. Ce résultat signifie que ce paramètre est très hétérogène dans les sols étudiés, résultat confirmé par la forte valeur de son coefficient de variation (CV = 47 %). La résistance à la traction moyenne est de 879 g. On peut considérer que ces sols sont faiblement à fortement résistants.

Tableau XXI. Statistiques descriptives de la résistance à la traction des sols étudiés

	Moyenne	Minimum	Maximum	Ec-Type	CV %
R	879 g	333 g	2116 g	416 g	47

Cette forte variabilité de la résistance à la traction est bien illustrée par la figure 51 qui montre clairement les écarts de résistances à la traction au sein d'un même profil et entre profils. En effet, cette figure révèle que quelle que soit la parcelle considérée, la plus forte résistance à la traction est toujours provoquée par les couches de subsurface.

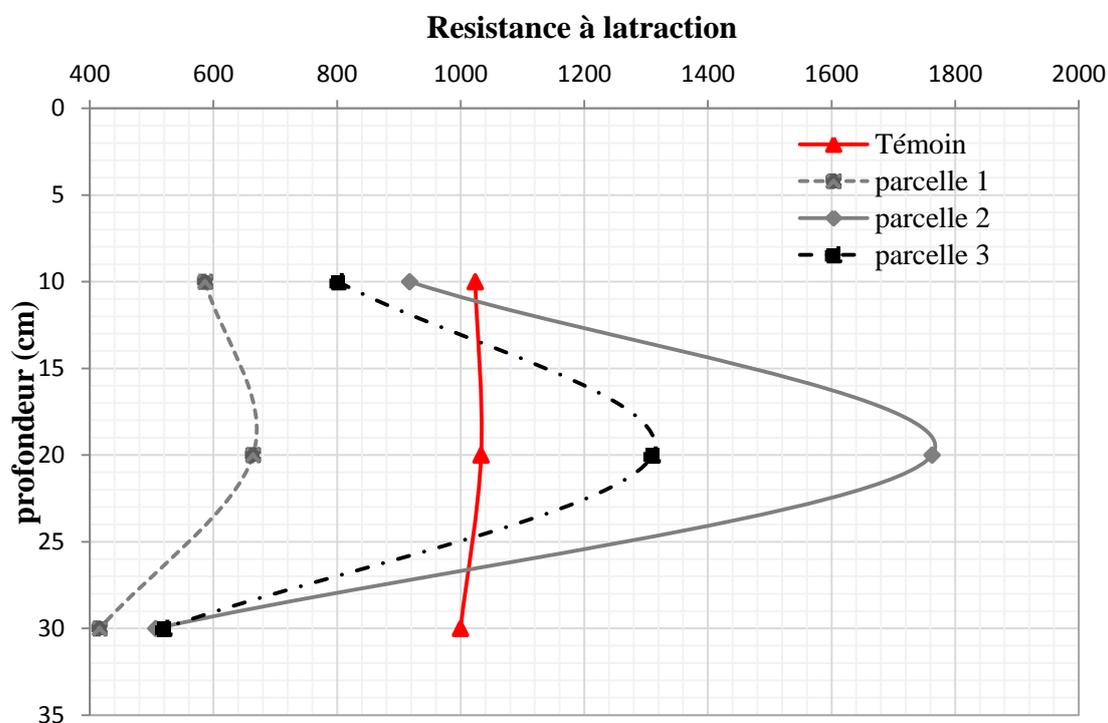


Figure 51. Profils de distribution de la résistance à la traction dans le témoin et dans les parcelles.

Ainsi, la figure 51 montre que, dans tous les cas, les profils de distribution de la résistance à la traction sont convexes. Ce résultat signifie que les couches de subsurface sont celles qui résistent le plus à la traction. Cependant, les différences entre les couches d'un même sol varient d'une parcelle à une autre. Ces différences sont très faibles au niveau du profil témoin moyen, peu importantes dans la parcelle 1, forte dans la parcelle 3 et très forte dans la parcelle 2. Ce résultat signifie que la mise en culture en irrigué a provoqué une modification de ce paramètre dans le sol, mais que cette modification n'est pas proportionnelle à la durée de mise en culture.

La comparaison des parcelles cultivées avec leurs propres témoins (figure 52) révèle des différences de comportement des profils comparables entre les parcelles 2 et 3 qui se traduisent par une augmentation de la résistance à la traction dans les couches de subsurface. Ce résultat signifie que la mise en culture en irrigué pendant 7 et 14 ans a provoqué un durcissement des couches de subsurface. En revanche, la mise en culture pendant 3 ans n'a provoqué qu'un léger ameublissement de toutes les couches du sol.

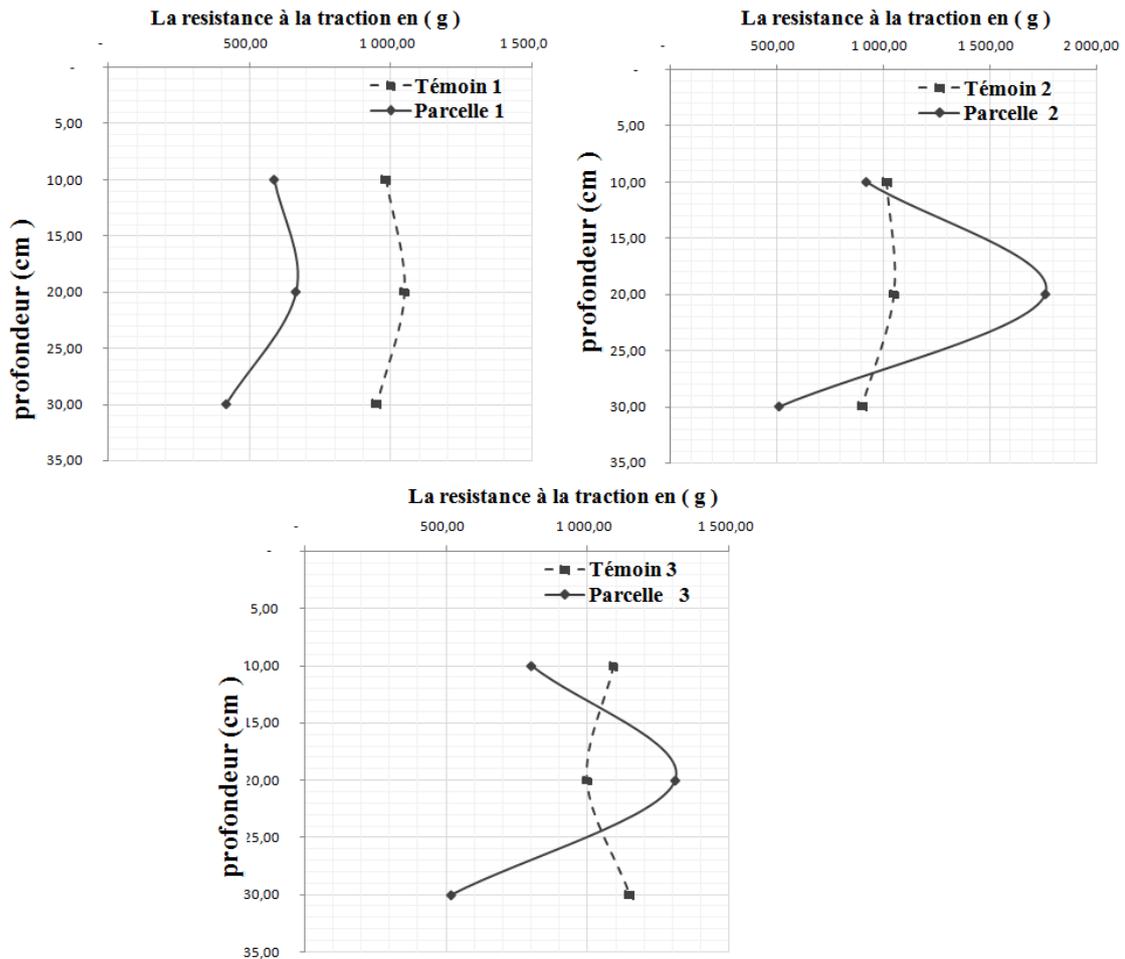


Figure 52. La comparaison de la résistance à la traction dans chaque site cultivé avec son témoin.

L'analyse de la variance à un seul facteur (tableau XXII) indique que le facteur temps a un effet significatif sur la résistance à la traction pour les couches de subsurface et de profondeur ($p < 0,05$). Cet effet est statistiquement non significatif entre les horizons de surface. Le tableau XXII révèle aussi que les différences entre les 3 couches du sol ne sont pas significatives dans le témoin et dans la parcelle 1 (3 ans de mise en culture). En revanche, ces différences sont statistiquement significatives dans les parcelles 2 (7 ans de mise en culture) et 3 (14 ans de mise en culture). Par ailleurs, la comparaison deux à deux des moyennes (annexe 4) a révélé que toutes les différences entre les horizons de subsurface sont significatives. En ce qui concerne les horizons de profondeur, les différences des moyennes sont significatives entre le témoin et les trois parcelles. Ces résultats signifient qu'une mise en culture prolongée supérieure à 7 ans provoque une

modification de la résistance des sols à la traction, en particulier dans les couches de subsurface.

Tableau XXII. Analyse de la variance de résistance à la traction dans le profil et entre parcelles

	Témoin	parcelle 1	parcelle 2	parcelle 3	Probabilité	signification
H 1	1030 ± 154	586 ± 113	917 ± 209	802 ± 304	0,15	NS
H 2	1033 ± 130	664 ± 343	1762 ± 316	1310 ± 110	0,00	S
H 3	999 ± 172	415 ± 270	507 ± 246	519 ± 166	0,03	S
probabilité	0,86	0,47	0,00	0,01	/	/
signification	NS	NS	S	S	/	/

Le test de Newman-Keuls pour un seuil de probabilité de 0,05 a permis de regrouper les valeurs de la résistance à la traction dans les différentes couches du témoin et des trois parcelles en trois groupes homogènes pour la variation verticale (profondeur) et en deux groupes homogènes pour la variation spatiale ou temporelle. Les groupes homogènes sont représentés dans les tableaux XXIII et XXIV.

Tableau XXIII. Groupes homogènes de la résistance à la traction entre parcelle.

groupes homogènes	Groupe A	Groupe B	Groupe C
H 1	/	/	/
H 2	Le témoin et la parcelle 1	Le témoin et la parcelle 3	parcelle 2
H3	La parcelle 1 et la parcelle 3	La parcelle 2 et la parcelle 3	témoin et la parcelle 2

Tableau XXIV. Groupes homogènes de la résistance à la traction dans le profil

groupes homogènes	Groupe A	Groupe B	Groupe C
Sol témoin	/	/	/
Parcelle 1	/	/	/
Parcelle 2	H 1 et H 3	H 2	/
Parcelle 3	H 1 et H 3	H 2	/

3.5.2. Synthèse et discussion

Les statistiques ont mis en évidence que les échantillons les plus résistants sont ceux des parcelles 2 et 3. Elles ont montré que la résistance à la traction est relativement faible en surface mais qu'elle est assez forte en sub-surface. Ces résultats concordent bien avec ceux obtenus par de nombreux auteurs (Hamza et Anderson, 2005 ; Motavalli et al., 2003 ; Lesturgez, 2005 ; Ampoorter et al., 2007) . En revanche, les résultats obtenus

pour les échantillons des couches de profondeur indiquent que ces échantillons sont très faiblement résistants à la traction et ne rejoignent donc pas ceux de la littérature internationale.

Au total, la mise en culture en irrigué pendant une longue durée des sols sableux de la région d'étude a provoqué une compaction et un durcissement de leurs couches de subsurface. Ce résultat serait en relation avec la modification texturale de ces couches qui sont devenues légèrement plus argileuses. Ce phénomène (accumulation des argiles) qui a épargné les couches de profondeur expliquerait pourquoi ces dernières sont restées très meubles.

3.6. La perméabilité hydraulique

3.6.1. Variations verticales et temporelles

Nous rappelons que la mesure de la vitesse d'infiltration de l'eau a été effectuée in situ par la méthode du double anneau (MUNTZ), juste après la récolte. Après avoir saturé le sol, le volume de l'eau infiltré en une heure de temps est quantifié.

Les résultats (tableau XXV) ont montré que la perméabilité hydraulique varie entre 5,41cm/h et 26,84 cm/h avec une moyenne de 16,74 cm/h. Ce résultat signifie que ce paramètre est très variable (CV = 40 %) et que tous les sols sont très filtrants ($K_s > 5,41\text{cm/h}$) à cause probablement de leur texture sableuse.

Tableau XXV. Statistiques descriptives de la perméabilité hydraulique à saturation

	Moyenne	Minimum	Maximum	Ec-Type	CV%
Ks	16,74 cm/h	5,41 cm/h	26,84 cm/h	6,74 cm/h	40

Les valeurs moyennes de la perméabilité hydraulique à saturation varient de 7,90 cm/h à 23,14 cm/h (tableau XXVI). La plus grande valeur de la perméabilité hydraulique à saturation a été obtenue dans la parcelle 1 avec 23,14 cm/h, suivie par le témoin moyen (22,64 cm/h). La plus faible valeur est celle de la parcelle 2 ($K_s = 7,90\text{ cm/h}$). La parcelle 3 est caractérisée par une perméabilité hydraulique de 13,25 cm/h.

Les moyennes de la perméabilité hydraulique à saturation sont représentées par la figure 53. L'observation de cette figure permet de distinguer deux comportements du sol vis-à-vis de l'infiltration de l'eau. Le premier se situe au niveau du témoin moyen et de la

parcelle 1 qui se caractérisent tous les deux par de fortes perméabilités comparables l'une à l'autre et caractéristiques des sols sableux. Le deuxième se situe au niveau des parcelles 2 et 3 qui se caractérisent par des perméabilités hydrauliques toujours fortes mais nettement plus faibles que celles du témoin moyen et de la parcelle 1. Les valeurs de la perméabilité hydraulique de ces deux parcelles sont également très proches l'une de l'autre. Ce résultat signifie qu'après trois années de mise en culture, la perméabilité hydraulique est très peu affectée par les travaux culturaux et reste très proche de celle des sols non cultivés. En revanche, une mise en culture prolongée de plus de sept ans engendre une diminution remarquable de la perméabilité hydraulique.

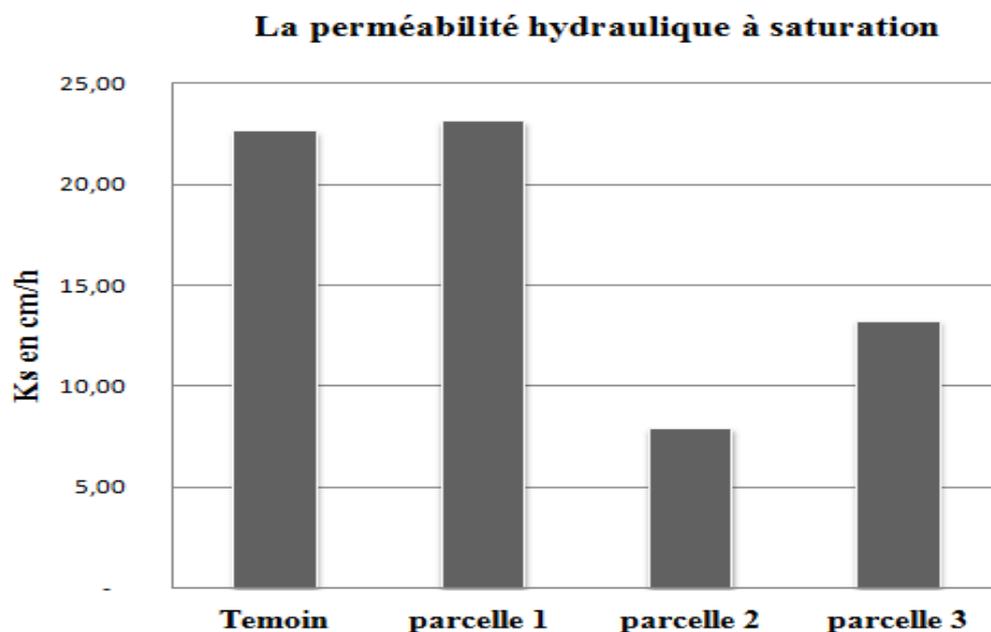


Figure 53. Perméabilité hydraulique à saturation au niveau du témoin et des parcelles.

La comparaison des parcelles cultivées avec leurs propres témoins (figure 54) révèle aussi que la perméabilité hydraulique dans la parcelle 1 n'a pas fortement changé par rapport à son témoin. Par contre, les parcelles 2 et 3 ont des perméabilités hydrauliques nettement plus faibles (environ 50 %) que celles de leurs témoins respectifs. Ce résultat confirme qu'une mise en culture prolongée aurait eu un effet sur la vitesse d'infiltration de l'eau en diminuant la perméabilité hydraulique jusqu'à la moitié.

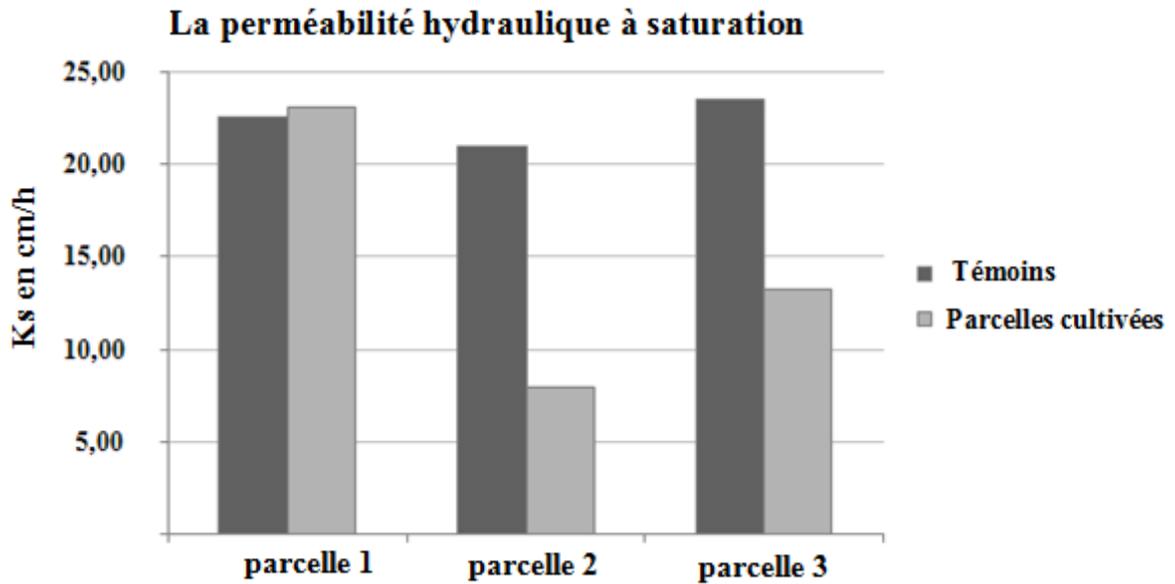


Figure 54. Perméabilité hydraulique des parcelles cultivées et de leurs témoins

L'analyse de la variance à un seul facteur indique que le facteur temps a un effet significatif sur la perméabilité hydraulique (Tableau XXVI). De même, la comparaison des moyennes a révélé que leurs différences sont toutes significatives sauf entre le témoin et la parcelle 1(annexe 4). De ce fait, ce résultat signifie qu'une mise en culture prolongée des sols engendre une diminution de la perméabilité hydraulique à saturation.

Tableau XXVI. Analyse de la variance de variation de la perméabilité hydraulique des différentes parcelles étudiées

	Témoin	Site 1	Site 2	Site 3	Probabilité et signification	
$K_s \pm$ IC(cm/h)	22,64 ± 2,04	23,14 ± 2,38	7,90 ± 2,39	13,25 ± 1,73	0.00	DS

Le test de Newman-Keuls pour un seuil de probabilité de 0,05 a permis de regrouper les valeurs de la perméabilité hydraulique des trois parcelles en trois groupes homogènes (tableau XXVII).

Tableau XXVII. Groupes homogènes de la perméabilité hydraulique.

groupes homogènes	Groupe A	Groupe B	Groupe C
	Le témoin et la parcelle 1	La parcelle 3	La parcelle 2

Ce résultat confirme donc la modification de la perméabilité hydraulique dans le temps. Il montre bien que le sol témoin et la parcelle 1 appartiennent au même groupe, résultat qui signifie qu'une durée d'exploitation du sol de 3 ans n'a pas provoqué une modification significative de la perméabilité hydraulique. En revanche, cette modification devient significative après 7 ans et 14 ans de mise en culture.

3.6.2. Synthèse et discussion

Les résultats obtenus ont montré que la perméabilité hydraulique varie d'une parcelle à l'autre. Ils ont montré aussi que la perméabilité hydraulique de la parcelle 1 n'a pas beaucoup varié par rapport à celle du sol témoin. La diminution de la perméabilité hydraulique est cependant remarquable au niveau des parcelles 2 et 3 cultivées respectivement depuis 7 et 14 ans. Tenant compte de l'évolution des propriétés physiques de ces sols, en particulier dans les couches de subsurface (compaction, densité apparente et relative accumulation des argiles), nous pouvons avancer que la modification de la perméabilité hydraulique est compréhensible et logique et qu'elle concorde avec les résultats de Hongtao et *al.*, (2011).

De ce fait, nous pouvons affirmer que la mise en valeur en irrigué des sols sableux en milieu saharien conduit à une dégradation des propriétés physiques des sols qui se traduit par une compaction et un durcissement des couches de subsurface, phénomène qui réduit à terme la vitesse d'infiltration de l'eau et limite le développement du système racinaire.

4. Discussion générale

Les sols étudiés sont morphologiquement identiques. Ce sont des sols peu évolués régosoliques de type A/C peu profonds développés sur grés calcaire. Ils sont particulièrement sableux ($75 < \text{Sable total } \% < 94$) et très peu organiques ($0,05 < \text{MO } \% < 1,11$) et leur CEC est particulièrement faible. Tous ces sols sont diversement pourvus en calcaire ($15 < \text{CaCO}_3 \% < 61$), peu gypseux ($0,25 < \text{CaSO}_4 \% < 1,96$) mais, en revanche, ils sont relativement salés ($0,22 < \text{CE}_{1/5} \text{dS/m} < 1,96$). La solution du sol est généralement chlorurée sodique. Par ailleurs, ces sols possèdent des caractéristiques très particulières. En effet, à l'état naturel, les agrégats de ces sols sont consolidés et très peu friables. L'agent agrégeant reste inconnu si nous tenons compte de leurs faibles taux d'argile et de matière organique. Nous rappelons que le climat hyperaride de cette zone n'est guère favorable aux processus pédogénétiques.

Les résultats ont montré que l'âge des parcelles, autrement dit le facteur temps, n'a pas une influence particulière sur la modification de la salinité des parcelles étudiées avec une tendance claire à la salinisation ou à la désalinisation. En effet, les valeurs les plus faibles de la conductivité électrique ont été enregistrées au niveau de la parcelle 2 (7ans de mise en culture) et les valeurs les plus fortes au niveau de la parcelle 1 (3ans de mise en culture). En théorie, ce résultat signifie que la mise en culture en irrigué pendant trois ans a engendré une forte salinisation des sols, surtout dans les couches de surface et de subsurface (témoin moyen vers parcelle 1). Au-delà de cette période, la poursuite de la mise en culture et de l'irrigation s'est traduite par une chute spectaculaire de la salinité (parcelle 1 vers parcelle 2). Par la suite, la tendance s'est inversée et nous assistons de nouveau à une salinisation des sols (parcelle 2 vers parcelle 3). Au total, nous assistons à un phénomène de salinisation-désalinisation-salinisation des sols. Ce résultat signifie que la durée de la mise en culture en irrigué dans la région d'étude n'a pas un effet constant sur l'évolution de la salinité des sols. De ce fait, nous supposons que la contribution des eaux d'irrigation à la salinisation des sols est négligeable et ne saurait expliquer à elle seule ce phénomène. En effet, si la salinité de ces sols était due à la qualité des eaux d'irrigation, nous aurions assisté probablement à une augmentation progressive de la salinité en fonction du temps. Cependant, des pratiques culturales différentes, des doses d'irrigation différentes avec ou sans doses lessivantes auraient pu perturber la tendance naturelle à la salinisation (ou à la désalinisation) de ces sols. Par

ailleurs, la comparaison des profils salins des trois parcelles avec leurs témoins respectifs n'a pas révélé de fortes différences de salinité entre l'état initial et l'état final. De ce fait, nous supposons que la salinité de ces sols serait essentiellement d'origine primaire plutôt que secondaire, les résultats ayant montré que la salinité des sols témoins varie d'un site à l'autre, ce qui concorde bien avec les conclusions de Ziza (2006). Par ailleurs, les résultats ont montré que tous les profils salins des trois parcelles cultivées sont convexes ce qui signifie que l'irrigation a provoqué une légère salinisation au niveau des couches de subsurface. Ce phénomène est bien explicité par la transformation des profils salins qui étaient concaves dans les sols témoins et qui sont devenus convexes dans les sols irrigués (Parcelles 2 et 3). Au niveau de la parcelle 1, nous assistons à un léger glissement vers la droite du profil salin du sol irrigué par rapport à son témoin. De ce fait, l'eau d'irrigation, en plus de la quantité de sels fournie aux sols, a probablement joué un rôle significatif dans la salinisation de ces sols, au moins en mobilisant les sels solubles primaires par le truchement de la lixiviation et de la remontée capillaire.

Cette mise en culture en irrigué a non seulement modifié la salinité et les profils salins des sols, mais elle a également remanié d'une façon directe ou indirecte d'autres propriétés et caractéristiques des sols. Ainsi, en ce qui concerne le carbonate de calcium, les résultats ont montré que dès que les sols sont soumis l'irrigation, ils perdent environ la moitié de leur calcaire au bout de trois ans et ils se stabilisent par la suite. Ce résultat signifie que la moitié du calcaire de ces sols appartient à une fraction relativement soluble qui est perdue au bout de trois ans par solubilisation et lixiviation par les eaux d'irrigation. L'autre moitié du carbonate de calcium appartiendrait à la fraction très peu soluble, voir insoluble qui explique la conservation de forts taux de calcaire dans le sol, même après quatorze ans d'irrigation dans un milieu poreux. De même, les résultats ont montré que les profils texturaux ont été profondément modifiés par l'irrigation, particulièrement les profils argileux et les profils sableux. Ainsi, les résultats ont montré clairement un enrichissement en argiles des couches de subsurface. Ce phénomène ne peut être expliqué que par le lessivage des argiles à partir des horizons de surface qui ont vu en même temps leurs teneurs en sables grossiers résiduels augmenter. Les résultats ont montré que l'intensité de ce processus est clairement liée à la durée d'arrosage.

Cette étude a montré aussi que la mise en culture a conduit à une densification des sols, en particulier de leurs couches médianes. En effet, les résultats ont montré que tous les profils de densité apparente des parcelles cultivées se sont déplacés à droite par rapport à ceux de leurs témoins respectifs. Ce résultat signifie que la mise en culture a engendré une augmentation de la densité apparente des sols cultivés. Ce processus est particulièrement intense dans les couches de subsurface et dans les parcelles 2 et 3. Ce phénomène est donc en relation avec le lessivage des argiles et leur accumulation en subsurface d'une part et avec l'âge des parcelles d'autre part. En effet, le mélange de grosses particules avec des particules plus fines fait diminuer le volume poral et augmenter ainsi la densité apparente (Lesturgez, 2005). De même, le passage répété des engins de travail du sol pourrait affecter les propriétés mécaniques du sol et expliquer l'augmentation de la densité apparente après une mise en valeur prolongée (Rasmussen, 1999).

Le test de la résistance à la traction a montré qu'après trois années de mise en culture, les sols ont subi un ameublissement de leurs différentes couches. La comparaison des profils de la résistance à la traction de la parcelle 1 avec son témoin le montre bien. En revanche, la mise en culture en irrigué pendant sept ans et quatorze ans a engendré un durcissement des couches médianes des parcelles 2 et 3. Ce résultat pourrait s'expliquer par la relative richesse en argile des couches de subsurface de ces parcelles. Cependant, les résultats obtenus montrent que la variation de la résistance à la traction des échantillons n'est pas statistiquement significative avec la durée de l'utilisation du sol. En effet, les échantillons les plus résistants sont ceux de la parcelle 2 (7 ans de mise en culture) suivis par ceux de la parcelle 3 (14 ans de mise en culture) et en dernier par ceux de la parcelle 1 (3 ans de mise en culture). Les pratiques culturales, probablement différentes entre les parcelles, pourraient être à l'origine de ces différences. Par ailleurs, la représentation graphique de la résistance à la traction en fonction de la profondeur a montré une allure qui rejoint celles de nombreux auteurs qui ont étudié les effets de la compaction et du durcissement des sols (Hamza et Anderson, 2005 ; Motavalli et al., 2003 ; Lesturgez, 2005 ; Ampoorter et al., 2007). En revanche, les couches de profondeur semblent être très peu résistantes par rapport à celles de ces études. Au total, les sols sableux de la région d'étude subissent une compaction et un durcissement de leurs couches de subsurface après une longue durée de mise en valeur.

Les valeurs de la perméabilité hydraulique varient d'une parcelle à une autre mais reste à chaque fois élevée. Les résultats ont montré que la perméabilité hydraulique de la parcelle 1 est très forte et qu'elle n'a pas beaucoup changé par rapport à celle du sol témoin. Ce résultat signifie qu'une mise en culture pendant une durée de trois ans n'a pas eu un effet sur K_s . Ce résultat serait lié à la faible densité apparente et donc à la forte porosité de ce sol sur l'ensemble du profil. Par contre, les résultats ont montré que K_s des parcelles 2 et 3 a brutalement chuté par rapport à celui de leurs témoins respectifs. La chute des valeurs de K_s dans ces parcelles serait due à la présence de couches compactes en subsurface et qui limitent l'infiltration de l'eau (Hongtao et al., 2011). L'ensemble de ces résultats suggère que nous sommes en présence de deux milieux différents. Le premier milieu (parcelle 1) est un milieu homogène dans lequel il y a très peu de variation dans le profil des caractéristiques du sol responsables qui influencent K_s (texture, porosité). De ce fait, la vitesse de filtration de l'eau dans le sol est la même en haut et bas du profil. Le deuxième milieu (parcelles 2 et 3) est un milieu hétérogène (couches de subsurface plus compactes que la couche de surface, densité apparente plus forte que celle de la couche de surface et accumulation des particules fines dans la couche de subsurface). Dans un tel milieu, la vitesse de filtration de l'eau sera régie par celle de la couche la moins perméable (couche de subsurface). Ainsi, il s'est avéré que la durée d'exploitation en irrigué des sols sableux situés en milieu aride peut engendrer d'une façon directe (texture, densité apparente, salinité, taux de calcaire) ou indirecte (perméabilité hydraulique, résistance à la traction) des modifications profondes de certaines caractéristiques des sols.

Conclusion générale

L'objectif de cette recherche était d'étudier le comportement dans le temps de six paramètres pédologiques des sols mis en culture en irrigué dans la région d'Adrar. Les paramètres étudiés sont la salinité, les taux de calcaire total, la granulométrie, la densité apparente, la résistance à la traction et la perméabilité hydraulique. Pour ce faire, nous avons choisi trois parcelles céréalières cultivées respectivement durant trois ans, sept ans et quatorze ans.

Les sols étudiés sont tous des sols peu évolués régosoliques de type A/C très sableux, peu pourvus en matière organique, moyennement à fortement salés, légèrement alcalins, très calcaires et peu gypseux.

La comparaison des paramètres pédologiques de chaque parcelle avec ceux de son sol témoin (sol n'ayant jamais été cultivé) et avec ceux des autres parcelles a permis de mettre en évidence certaines modifications parfois statistiquement significatives et parfois non significatives de ces paramètres dans le temps. Les principales conclusions peuvent être synthétisées comme suit :

- La durée de mise en culture en irrigué n'a pas une influence particulière sur la modification de la salinité des parcelles étudiées avec une tendance claire à la salinisation ou à la désalinisation. Les résultats ont montré que la salinité des sols, y compris celle des sols témoins, varie d'un site à l'autre et que cette dernière serait d'origine primaire plutôt que secondaire. Toutefois, les résultats ont révélé une légère augmentation de la salinité dans les couches médianes des sols cultivés à causes probablement de l'effet combiné des eaux de percolation, de la remontée capillaire et de la succion provoquée par les racines.
- La mise en culture en irrigué pendant trois années a provoqué une chute des teneurs en carbonate de calcium des sols d'environ moitié. Au-delà de trois ans, les teneurs en carbonate de calcium se sont stabilisées et sont restées relativement constantes. Ce résultat suggère que 50 % du calcaire des sols de la région d'étude sont facilement solubles.
- La mise en culture en irrigué pendant une longue période (sept ans et plus) a provoqué une modification notable des profils texturaux des sols qui s'est traduite par une relative accumulation des argiles dans les couches médianes des sols et une

augmentation des taux de sable grossier résiduel en surface. Ce phénomène s'est accompagné par une augmentation de la densité apparente et de la résistance à la traction dans les couches de subsurface à causes probablement de leur texture qui est devenue relativement plus argileuse et du tassement répété provoqué par les engins agricoles.

- Les résultats ont révélé une chute brutale de la perméabilité hydraulique après sept ans de mise en culture en irrigué. Cette baisse de K_s serait en rapport avec la modification des autres paramètres pédologiques tels que la densité apparente et la texture des horizons de subsurface.

Cette étude a montré donc que la mise en culture en irrigué des sols sableux sahariens peut provoquer à terme une modification de leurs propriétés et caractéristiques pédologiques.

Enfin, cette étude, qui est une contribution à la connaissance des sols sableux, en particulier ceux du milieu aride dans le sud d'Algérie, mérite d'être élargie à d'autres parcelles et d'être affinée par des moyens d'investigation plus appropriés à ce type de recherche comme la micromorphologie et la pénétrométrie par exemple. Ce n'est qu'à ce prix que les résultats pourront être validés et donc extrapolés à des sols situés dans des conditions analogues.

Références Bibliographiques

Agbede T.M., 2010. Tillage and fertilizer effects on some soil properties, leaf nutrient concentrations, growth and sweet potato yield on an Alfisol in southwestern Nigeria. *Soil and Tillage Research*, vol. 110, n.1, pp. 25-32.

Aimrun W., Amin M., Eltaib SM., 2004. Effective porosity of paddy soils as an estimation of its saturated hydraulic conductivity. *Geoderma*, vol.121, n. 3-4, pp.197-203.

Al-Darby A.M., 1996. The hydraulic properties of a sandy soil treated with gel-forming soil condition. *Soil Tech*, vol. 9, n.1, pp.15-28.

Alvaro-Fuentes J., Cantero-Martinez C., Lopez M.V., 2007. Soil carbon dioxide fluxes following tillage in semiarid Mediterranean agroecosystems. *Soil and Tillage Research*, vol.96, n. 1-2, pp. 331-341.

Ampoorter E., Goris R., Cornelis W.M., Verheyen K., 2007. Impact of mechanized logging on compaction status of sandy forest soils. *Forest Ecology and Management*, vol. 241, n. 1-3, pp. 162–174.

Badraoui M., Agbani M., Soudi B., 2000. Évolution de la qualité des sols sous mise en valeur intensive au Maroc. Séminaire: Intensification agricole et qualité des sols et des eaux, Rabat 2000, 11p.

Baize D., 1988. Guide des analyses courantes en pédologie. France, INRA, 172p.

Belnap J., 2002. Impacts of off-road vehicles on nitrogen cycles in biological soil crusts: resistance in different U.S. deserts. *Journal of Arid Environments*, vol. 52, n. 2, pp.1186-1191.

Berrached A., 1996. Etude comparative de la dynamique des sels dans les régions Sahariennes. Mémoire d'Ingénieur Agronome, Institut Nationale Agronomique d'El-Harrach, Alger, 61 p.

Bertrand L., 1997. Détermination et représentation cartographique de la capacité de stockage en eau des sols du département de la cote d'or. Rapport de Stage, INRA, France, 50p.

Bigorre F., 2000. Influence de la pédogenèse et de l'usage des sols sur leurs propriétés physiques : mécanismes d'évolution et éléments de prévision. Thèse de doctorat, France, Université Nancy 1, 145p.

Boifin J., 1976. La dégradation structurale des couches superficielle du sol sous l'action des pluies. Thèse de doctorat, Paris-grignon, Institut National Agronomique, 100p.

Bonari E., Mazzoncini M., Peruzzib A., 1995. Effects of conventional and minimum tillage on winter oilseed rape (*Brassica napus L*) in a sandy soil. *Soil and Tillage Research*, vol. 33, n.2, pp. 91-108.

Boubekeur A. 2010. Essai d'établissement de typologies d'exploitations d'élevages laitiers dans le contexte du Sud Algérien : Cas de la wilaya d'Adrar. mémoire de magiste. Ecole Nationale supérieure Agronomique d'El-Harrach, 135 p.

Boucenna A., Berrachedi M., 2004. Étude agro-pédologique des périmètres de la wilaya d'Adrar. ANRH, 93p.

Bresson L.M., Moran C.J., 2004. Micromorphological study of slumping in a hardsetting seedbed under various wetting conditions. *Geoderma*, vol. 118, n.3-4, pp. 277–288.

Bruand A., Hartmann C., Ratana-Anupap S., Sindhusen P., Poss R., Hardy M., 2004. Composition, fabric, and porosity of an Arenic Haplustalf in Northeast Thailand : Relation to penetration resistance. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 68, n.1, pp. 185-193.

Bruand A., Pérez Fernandez P., Duval O., Quétin P., Nicoullaud B., Gaillard H., Raison L., Pessaud J.F., Prud'Homme L., 2002. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols : Utilisation de classes de pédotransfert après stratification texturale et texturo-structurale. *Etude et Gestion des Sols*, vol. 9, n. 2, pp. 105-125.

Bruand A., Hartmann C., Lesturgez G., 2005. Physical properties of tropical sandy soils: A large range of behaviours. *Management of Tropical Sandy Soils for Sustainable Agriculture*, Khon Kaen, Thailand, FAO, pp. 148-158.

Carter M.R., Sanderson J.B., MacLeod J.A., 1998. Influence of time of tillage on soil physical attributes in potato rotations in Prince Edward Island. *Soil and Tillage Research*, vol. 49, n. 1-2, pp.127-137.

.Carter M.R., 2005. Long-term tillage effects on cool-season soybean in rotation with barley, soil properties and carbon and nitrogen storage for fine sandy loams in the humid climate of Atlantic Canada. *Soil and Tillage Research*, vol. 81, n. 1, pp.109-120.

Carter M.R., Gregorich E.G., 2010. Carbon and nitrogen storage by deep-rooted tall fescue (*Lolium arundinaceum*) in the surface and subsurface soil of a fine sandy loam in eastern Canada. *Agriculture Ecosystems and Environment*, vol. 136, n.1-2, pp. 125-132.

Castellini M., Ventrella D., 2012. Impact of conventional and minimum tillage on soil hydraulic conductivity in typical cropping system in Southern Italy. *Soil and Tillage Research*, vol. 124, n. 1, pp.47-56.

Chabaca M.N., 2007. Analyse des paramètres d'efficience de l'irrigation gravitaire traditionnelle en Algérie. Optimisation de la pratique d'irrigation pour une modélisation simplifiée à l'échelle de la parcelle et proposition de pilotage. Thèse de doctorat, El Harrach, Institut National Agronomique, 354 p.

Chamayou H., Legros J.P., 1989. Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol. Agence de Coopération culturelle et technique, Paris, Presse universitaires de France. 592p.

Chan K.Y., 1995. Strength characteristics of a potentially hardsetting soil under pasture and conventional tillage in the semi-arid region of Australia. *Soil and Tillage Research*, vol. 34, n. 2, pp.105-113.

Chan K.Y., Sivapragasam S., 1996. Amelioration of a degraded hardsetting soil using an anionic polymeric conditioner. *Soil Technology*, vol. 9, n.1, pp. 1- 100

Chen G.C., He Z.L., Stoffella P.J., Yang X.E., Yu S., Yang J.Y., Calvert D.V., 2006. Leaching potential of heavy metals (Cd, Ni, Pb, Cu and Zn) from acidic sandy soil amended with dolomite phosphate rock (DPR) fertilizers. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, vol. 20, n. 2, pp.127–133.

Cornet A., 1980. Observations sur la capacité de rétention, ses relations avec les valeurs de potentiel et la texture des sols sableux du Nord. *OROSTOM, sér., biol.*, n. 42, pp.53-59.

Crescimanno G., Desantis A., Provenzano G., 2007. Soil structure and bypass flow processes in a Vertisol under sprinkler and drip irrigation. *Geoderma*, vol. 138, n. 1-2, pp.110–118.

Dam R.F., Mehdi B.B., Burgess M.S.E., Madramootoo C.A., Mehuys G.R., Callum I.R., 2005. Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada. *Soil and Tillage Research*, vol. 84, n. 1, pp.41-53.

Degens B.P., Spading G.P., Abbott L.K., 1996. Increasing the length of hyphae in a sandy soil increases the amount of water-stable aggregates. *Applied Soil Ecology*, vol. 3, n. 2, pp. 149-159.

Dejonge K.C., Kaleita A.L., Thorp K.R., 2007. Simulating the effects of spatially variable irrigation on corn yields, costs, and revenue in Iowa. *agricultural water management*, vol. 92, n. 1, pp. 99 – 109.

Díaz-Zorita M., 2000. Effect of deep-tillage and nitrogen fertilization interactions on dryland corn (*Zea mays* L.) productivity, *Soil and Tillage Research*, vol. 54, n. 1, pp.11-19.

Djili K., Daoud Y., Gaouar A., Beldjoudi Z., 2003. La salinisation secondaire des sols au Sahara. Conséquences sur la durabilité de l'agriculture dans les nouveaux périmètres de mise en valeur. *Sécheresse*, vol. 4, n.14, pp. 241-246.

Dubost D., 2002. Ecologie, aménagement et développement agricole des oasis algériennes. Ed. Centre de recherche scientifique et technique sur les régions arides (C.R.S.T.R.A.), Biskra, 423 p.

Durand J-H., 1961. Contribution à l'étude des sols irrigués : les besoins en eau des plantes, aspect pédologique. *Travaux des sections pédologie et agrologie, bulletin n. 15*, 23p.

Escadafal R., 1981. Une méthode nouvelle de description de la surface des sols dans les régions arides. *Actes du colloque : Informatique et traitement des données de sols*, Paris, pp. 21-27.

Eriksen J., Olesen J.E., Askegaard M., 2002. Sulphate leaching and sulphur balances of an organic cereal crop rotation on three Danish soils. *European Journal of Agronomy*, vol. 17, n. 1, pp. 1-9.

Fabiola N., Giarolaa B., Pires da Silvab A., Imhoff S., Dexterd A.R., 2003. Contribution of natural soil compaction on hardsetting behavior. *Geoderma*, vol. 113, n. 1, pp. 95–108.

Flower M.D., Lal, R., 1998. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. *Soil Tillage Reserche.*, vol. 48, n. 1, pp. 21-35.

Forges M., 1972. Irrigation et salinité , E.N.S.H.Versailles. CIHEAM – Options Méditerranéennes, n. 14, pp. 40-45.

Freeze R. A., Cherry J.A., 1979. Groundwater. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, États-Unis, 604p.

Guerif J, 1988. Détermination de la résistance en traction des agrégats terreux: revue bibliographique et mise au point technique. Agronomie, vol.4, n. 8, pp.281-288.

Hadjmiloud S., 2010. Morphologie et propriétés des solonchaks références de la mina. mémoire de magister, El Harrach Institut National Agronomique, 110p.

Halilat T., Tessier D., 2000. Effet de la salinité et la sodicité sur le comportement hydrique de mélanges sable-argile. Étude et Gestion des Sols, vol.7, n. 2, pp. 155-167.

Halilat T., Tessier D., 2006. Amélioration de la rétention en eau de matériau sableux par ajout de bentonite. Cahiers Agricultures, vol. 15, n. 4, pp.347-353.

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

Hamza M.A., Anderson W.K., 2002. Improving compacted clayey and sandy soils in Western Australia. Australian Soil Science Society, vol.6, n. 1, pp. 78–79.

Hamza M.A., Anderson W.K., 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. Soil and Tillage Reserch., vol. 82, n.2, pp. 121-145.

Hamza M.A., Anderson W.K., 2008. Combinations of ripping depth and tine spacing for compacted sandy and clayey soils. Soil and Tillage Research, vol. 99, n. 2, pp. 213-220.

Hartmann C., Poss R., Singhatat, V., 1999. Soil compaction and plant growth in Northeast Thailand: The case of the Nam Phong soil series. IRRI, Khon Kaen, Thailand, pp. 157-162.

Hartmann C., Poss, R., Janeau, J.L., Bourdon, E., Lesturgez, G. and Ratana-Anupap S., 2002. Use of the granular material theory to interpret structural changes in a sandy soil. 17 th World Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand.

Hénin S., 1976. Cours de physique du sol. Tome I, Paris, ORSTOM-EDITEST, 159p.

Hatira A., Benmansour B., Grira et T. et Gallali M., 2005. Impact des eaux d'irrigation sur l'origine des accumulations gypseuses dans les sols de l'oasis de Metouia (Tunisie) *Étude et Gestion des Sols*, Vol.12, n. 1, pp. 43 - 54.

Hillel D., 1998. Environmental Soil Physics. New York, Academic Press, 771p.

Hongtao H., 2010. Slumping of cultivated sandy soils: factors, processes and indicators. Thèse de doctorat, INRA Orleans, 218p.

Hongtao H., Hartmann C., Apichart J., Siwaporn S., Promsakha S., Richard G., Bruand A., Dexter A.R., 2011. Slumping dynamics in tilled sandy soils under natural rainfall and experimental flooding. *Soil and Tillage Research*, vol. 114, n. 1, pp. 9-17.

Ibnoussina M., El Haroui M., Maslouhi A., 2006. Expérimentation et modélisation de la lixiviation de l'azote nitrique dans un sol sableux. *Geoscience*, vol. 338, pp. 787–794.

IPIRID, FAO, CISEAU, 2006. Conférence électronique sur la salinisation : Extension de la salinisation et stratégie prévention et réhabilitation, 11p.

Kang J., Amoozegar A., Hesterberg D., Osmond D., 2011. Phosphorus leaching in a sandy soil as affected by organic and inorganic fertilizer sources. *Geoderma*, vol. 161, n. 3-4, pp.194-201.

Kasper M., Buchan G.D., Mentler A., Blum W.E.H., 2009. Influence of soil tillage systems on aggregate stability and the distribution of C and N in different aggregate fractions. *Soil and Tillage Research*, vol.105, n. 2, pp. 192-199.

Khadraoui A., 2005. Ressources en eau et en sols dans le Touat-Gourara et Tidikelt : Définition des contraintes et proposition d'aménagement : Eaux et Sols en Algérie. Gestion et impact sur l'environnement. Recueil de communications, pp. 55-76.

Kheyar M.O., Amara M., Harrad F., 2007. Mécanisation de la céréaliculture algérienne : Constat et perspectives. Annales de l'Institut National Agronomique, vol. 28, pp.1-2.

Kholladi M. K., 2007. SIG pour l'étude de l'évolution de la répartition de la population de la wilaya d'Adrar. 4th International Conference: (SETIT), Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, March 25-29, Tunisia, 8 p.

Kolahchi Z., Jalali, M. 2006. Simulating leaching of potassiums in a sandy soil using simple and complex models. Agricultural Water Management. vol. 85, n. 1-2, pp.85-94.

Koull N., 2007. Effet de la matière organique sur les propriétés physiques et chimiques des sols sableux de la région de Ouargla. Mémoire de Magister, Ouargla, Kasdi Merbah, 95p.

Kouzmine Y., 2003. L'espace saharien algérien, dynamiques démographiques et migratoires, université de Franche-comté, 208p.

Laaboudi A., 2001. Détermination des besoins en eau de la culture du blé dans la zone d'Adrar : Utilisation des cases lysimétriques. Mémoire de Magister, El Harrach, Institut National Agronomique, 82p.

Laaboudi A., Chabouni A., 2011. les sols de la région d'Adrar ; état initial et méthodes de conservation INRAA. Station expérimentale d'Adrar, 12p.

Lal R., Stewart, B.A., 1990. Soil degradation. Advances in Soil Science, New York, 345p.

Lal R., Shukla M.K., 2004. Principles of soil physics. New York, Marcel Dekker, 682p.

Le Bissonnais Y., Daroussin J., Jamagne M., Lambert J.-J., Le Bas C., King D., Cerdan O., Léonard J., Bresson L.-M., Jones R.J.A., 2005. Pan-European soil crusting and erodibility assessment from the European Soil Geographical Database

using pedotransfer rules. *Advances in Environmental Monitoring and Modelling*, vol.2, n. 1, pp.1-15.

Lesturgez G., 2005. *Densification des sols sableux sous culture mécanisée.* Thèse de doctorat, Nancy, Université d'Henri Poincaré, 164p.

Ley G.J., Mullins C.E., Lal R., 1993. Effects of soil properties on the strength of weakly structured tropical soils. *Soil and Tillage Research*, Vol. 28, n. 1, pp.1-13.

Materechera S.A., 2009. Aggregation in the surface layer of a hardsetting and crusting soil as influenced by the application of amendments and grass mulch in a South African semi-arid environment. *Soil and Tillage Research*, vol. 105, n. 2, pp.251-259.

Meyer K., Joergensen R. G., Meyer B., 1996. The effects of reduced tillage on microbial biomass C and P sandy loess soils. *Applied Soil Ecology*, vol. 5, n. 1, pp. 71-79.

Moroke T.S., Dikinya O., Patrick C., 2009. Comparative assessment of water infiltration of soils under different tillage systems in eastern Botswana. *Physics and Chemistry of the Earth*, vol.34, n. 4-5, pp.316–323.

Mosaddeghi M.R., Mahboubi A.A., Safadoust A., 2009. Short-term effects of tillage and manure on some soil physical properties and maize root growth in a sandy loam soil in western Iran. *Soil and Tillage Research*, vol. 104, n. 1, pp.173–179.

Motavalli P.P., Stevens W.E., Hartwig G., 2003. Remediation of subsoil compaction and compaction effects on corn N availability by deep tillage and application of poultry manure in a sandy-textured soil. *Soil and Tillage Research*, vol. 71, n. 2, pp. 121–131.

Mouazen A.M., Dumont K., Maertens K., Ramonb H., 2003. Two-dimensional prediction of spatial variation in top soil compaction of a sandy loam field-based on measured horizontal force of compaction sensor, cutting depth and moisture content. *Soil and Tillage Research*, vol. 74, n. 1, pp.91-102.

Mullins C.E., MacLeod D.A., Northcote K.H., Tisdall, J.M., Young, I.M., 1990. Hardsetting soils : Behavior, occurrence, and management. In : Soil degradation. Advances in Soil Science, vol. 11, pp. 37-108.

Munkholm L., Schjønning P., Rasmussen K., 2001. Non-inversion tillage effects on soil mechanical properties of a humid sandy loam. Soil and Tillage, vol. 62, n. 1, pp. 1-14.

Musy A., Soutter, M., 1991. Physique du sol. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 335p.

Nahry A.H., Ali R.R., El Baroudy A.A., 2011. An approach for precision farming under pivot irrigation system using remote sensing and GIS techniques. Agricultural Water Management, vol. 98, n.4, pp.517–531.

Ortiz J.N., Juan J.A., Tarjuelo J.M., 2010. Analysis of water application uniformity from a centre pivot irrigator and its effect on sugar beet (*Betavulgaris L.*). Yield Biosystems Engineering, vol. 10, pp.367–379.

OSS (Observatoire du Sahara et du Sahel), 2008. Système aquifère du Sahara septentrional (Algérie, Tunisie, Libye) : gestion d'un bassin transfrontalier. Oss, Collection synthèse n. 1, OSS ; tunis, 48 p.

Rasmussen K.J., 1999. Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality. Soil and Tillage Research, vol. 53, n. 1, pp. 3-14.

Reguieg Yssaad, H., 2007. Effet de la bentonite sur les sols sableux de la région de Mostaganem, étude de comportement d'une association blé pois chiche. Thèse de doctorat, El Harrach, Institut National Agronomique, 124p.

Robert P.C., 2012. Estimating the in situ porosity of sandy soils sampled in boreholes. Engineering Geology, vol. 142, n. 1, pp.57-64.

Roose E., Sarrailh J.-M., 1990. Erodibilité de quelques sols tropicaux vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. OROSTOM, sér. pédol., vol.28, pp.7-30.

Rouahna H., 2007. Relation entre les nappes et la salinité dans les sols gypseux de la région de Ain Ben Noui-Biskra. Mémoire Magister, Université de Batna, 83p.

Ruelle P., Mailhol J.C., Quinones H., Granier J., 2003. Using NIWASAVE to simulate impacts of irrigation heterogeneity on yield and nitrate leaching when using a travelling grain gun system in a shallow soil context in Charente (France), Agric. Water Manag., vol. 63, n. 1, pp. 15-35.

Salim S., Tessier D., 1998. Évolution des propriétés physiques et physico-chimiques de la basse vallée de l'Euphrate (Syrie). Étude et Gestion des Sols, vol. 5, n. 4, pp. 277-287.

Servant J., 1975. Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes. Thèse de doctorat, Languedoc, Université du Languedoc, 194p.

Silva L.L., 2006. The effect of spray head sprinklers with different deflector plates on irrigation uniformity, runoff and sediment yield in a Mediterranean soil. agricultural water management, vol. 85, n. 3, pp. 243-252.

So H.B., Grabski A., Desborough P., 2009. The impact of 14 years of conventional and no-till cultivation on the physical properties and crop yields of a loam soil at Grafton NSW, Australia. Soil and Tillage Research, vol. 104, n. 1, pp. 180-184.

Tarjuelo J.M., Montero J., Honrubia F.T., Ortiz J.J., Ortega J.F., 1999. Analysis of uniformity of sprinkle irrigation in a semi-arid area. Agricultural Water Management, vol. 40, n. 2-3, pp. 315-331.

U.S. Salinity Laboratory. Staff. (1954). Diagnostic and improvement of saline and alkali Saline and alkali soils , U.S.D.A. Hand book, n.60, 160p.

Van Muysen W., Van Oost K., Govers G., 2006. Soil translocation resulting from multiple passes of tillage under normal field operating conditions. *Soil and Tillage Research*, vol.87, n. 2, pp.218-230.

Verrechia E., Yair, A., Kidron, G.J., Verrechia, K., 1995. Physical properties of the psammophile cryptogamic crust and their consequences to the water regime of sandy soils, north-western Negev Desert, Israel. *Journal of Arid Environments*, vol.29, n. 4, pp. 427-437.

Vinas A., Joukov B., 1974. Etude agro-pédologique du Touat-Gourar, direction des études de milieu et de la recherche hydraulique. La sous direction des ressources en sol, Alger, 103p.

Warrick A.W., Gardner, W.R. 1983. Crop yield as affected by spatial variations of soil and irrigation. *Water Resources Research* vol.19, n. 2, pp.181–186.

Wei X.R, Hao M.D, Shao M.G, Gale W.J., 2006. Changes in soil properties and the availability of soil micronutrients after 18 years of cropping and fertilization. *Soil and Tillage Research*, vol. 91, n. 1-2, pp. 120–130.

Willis T.M., Hall D.J.M., McKenzie D.C., Barchia , 1997. Soybean yield as affected by crop rotations, deep tillage and irrigation layout on a hardsetting Alfisol. . *Soil and Tillage Research*, vol. 44, n. 3-4, pp. 151-164.

Yair A., Almong, R., Veste, M., 2011. Differential hydrological response of biological topsoil crusts along a rainfall gradient in a sandy arid area: Northern Negev desert, Israel. *Catena*, vol., 87, n. 3, pp. 326-333.

Zhao Y., Xu M., Belnap J., 2010. Potential nitrogen fixation activity of different aged biological soil crusts from rehabilitated grasslands of the hilly Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, vol.74, n. 10, pp.1186-1191.

Zhong Y.S, Zhao H.L., Zhang X.Y.Z., 2004. Soil properties following cultivation and non-grazing of a semi-arid sandy grassland in northern China. *Soil et Tillage Research*, vol.75, n. 1, pp. 27–36.

Ziza F., 2006. Evolution de la salinité des sols irrigués dans une région saharienne : Cas de la région d'Adrar. Thèse magister, El Harrach, Institut National Agronomique, 111p.

Zotarelli L., Dukes M.D., Scholberg J.M.S., Carpena R. Icerman J., 2009. Tomato nitrogen accumulation and fertilizer use efficiency on a sandy soil ,as affected by nitrogen rate and irrigations cheduling. *agricultural Water Management* , vol. 96, n.8, pp.1247–1258.

Annexe 1

1. Morphologie et propriétés du profil P12

1.1. Les données générales

Les coordonnées géographiques 000,16'47,0" de longitude Est et 28,36'26,9" de latitude Nord.

Date de description: 24/12/2011.

Temps : ciel clair.

Altitude : 183 m.

Topographie : terrain plat.

Matériaux originels : grès calcaire.

État de surface : Terrain cultivé en blé dur, apparition d'une fine croûte de battance, charge caillouteuse réduite.

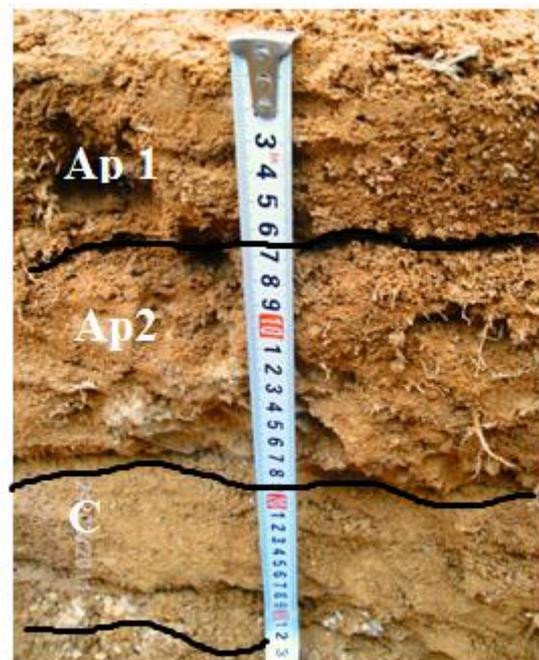


Photo 1. Profil P12

1.2. Description morphologique

Le profil P12 est montré par la photo 1.

Ap1 : 0-7 cm: frais ; couleur à l'état frais 5YR5/6 ; sableux ; structure particulière ; poreux ; moins compact ; friable ; présence d'agrégats fragile; présence d'éléments grossiers moine de 5 % ; peu organique ; présence de racines du blé; activité biologique réduite ; pas de taches; effervescence à l'HCl généralisée ; transition peu nette et régulière.

Ap2 : 7-18 cm: frais ; couleur à l'état frais 5YR5/8 ; sableux ; structure particulière sous structure massive ; moins poreux ; non compact ; friable ; pas d'agrégats ; présence d'éléments grossiers moine de 15 % ; non organique ; moins racineux ; pas d'activité biologique ; pas de taches; effervescence à l'HCl généralisée ; transition peu nette et régulière.

C : 18-32 cm: frais ; couleur à l'état frais 5YR 5/6 ; sableux ; structure particulière ; poreux ; peu compact ; friable ; présence d'éléments grossiers moine de

5 % ; peu organique ; peu de racines ; pas d'activité biologique ; pas de taches; forte effervescence à l'HCl ; présence de concrétion grés calcaire.

Les résultats des analyses physico-chimiques sont présentés dans le tableau I

Tableau I. Résultats des analyses de P12

profondeur		0-7 cm	7-18 cm	18-32 cm
Horizon		Ap1	Ap2	C
Granulométrie	%A	2,7	4,5	7,2
	%LF	1,55	1,6	0,9
	%LG	2,8	3,0	4,2
	%SF	75,6	75,4	75,0
	%SG	17,3	16,2	9,3
Carbone organique (%)		0,34	0,25	0,12
Matiere organique (%)		0,58	0,42	0,21
Calcaire total (%)		14,75	25,57	30,49
Gypse (%)		0,49	1,46	0,95
Capacité d'échange cationique (meq/100g)		2,09	2,72	3,98
pH		8,19	7,94	8,03
Conductivité électrique 1/5 (ms/cm)		0,42	1,96	1,03
Bilan ionique	HCO ₃ ⁻ (mé/l)	0,30	0,15	0,30
	SO ₄ ²⁻ (mé/l)	1,33	2,09	2,64
	Cl ⁻ (méql)	0,75	4,75	2,75
	Na ⁺ (méql)	4,60	4,97	6,00
	Ca ⁺⁺ (méql)	0,16	0,15	0,49
	K ⁺ (méql)	0,33	1,36	1,35
	Mg ⁺⁺ (méql)	0,15	0,67	0,31
Densité apparente g/cm ³		1,40	1,34	1,30
Perméabilité cm/h		22,15		

1.3. Discussion

Ce profil se caractérise par des teneurs très faibles en argile (de 2 à 7 %). L'horizon de surface présente la valeur la plus faible puis le taux d'argile augmente avec la profondeur. Les valeurs de la CEC oscillent entre 2 et 4 meq/100g. Les taux de matière organique sont très faibles, elles varient de 0,2 à 0,58 %. Ce profil présente une augmentation graduelle du taux de calcaire avec la profondeur, plus de 14 % dans l'horizon de surface, 25 % dans l'horizon de sub-surface et 30 % dans l'horizon de profondeur. Le pH est légèrement basique ($7,9 < \text{pH} < 8,2$). La conductivité électrique oscille entre 0,42 et 1,96 dS/m, la plus grande valeur de la CE se retrouve dans l'horizon de sub-surface. Ce profil présente des densités apparentes de l'ordre de 1,3 à 1,4 et une perméabilité très élevée (22,15 cm/h).

Annexe 2

1. Morphologie et propriétés du profil P22

1.1. Les données générales

Les coordonnées géographiques sont 000,17'20,4" de longitude Est et 28,36'39,8" latitude Nord.

Date de description: 23/12/2011.

Temps : ciel clair.

Altitude : 184.

Topographie : terrain plat.

Matériaux originels : grès calcaire.

Etat de surface : Terrain cultivé en blé dur,

apparition d'une fine croûte de battance, charge caillouteuse réduite.

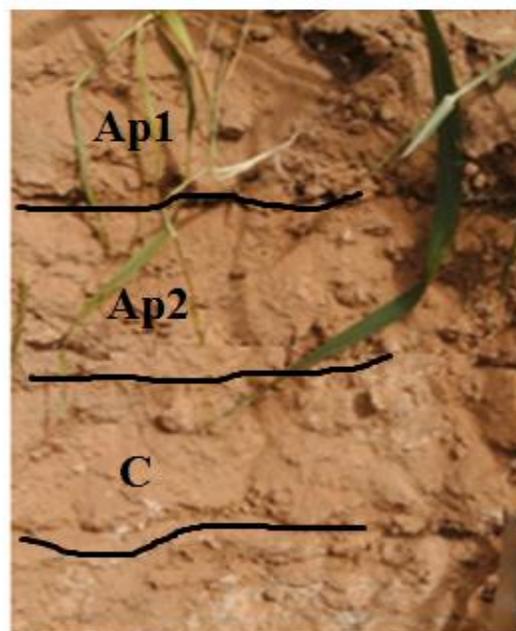


Photo 2. Profil P22

1.2. Description morphologique

Le profil P22 est montré par la photo2

Ap1 : 0-15 cm: sec ; couleur à l'état frais 5YR5/6 ; sableux ; structure particulière très ; poreux ; non compact ; friable ; présence d'agrégats fragile; présence d'éléments grossiers plus de 5 % ; peu organique ; beaucoup de racines du blé; activité biologique réduite ; pas de taches; effervescence à l'HCl généralisée ; transition peu nette et régulière.

Ap2 : 15-22 cm: sec ; couleur à l'état frais 5YR5/6 ; sableux ; structure massive ; compact ; pas de racines ; pas d'agrégats ; présence d'éléments grossiers moins de 5 % ; non organique ; pas d'activité biologique ; pas de taches; effervescence à l'HCl généralisée ; transition peu nette et régulière.

C : 22-40 cm: peu frais ; couleur à l'état frais 5YR6/6 ; sableux ; structure massive ; poreux ; compact ; présence d'éléments grossiers moine de 5 % ; peu organique ; pas d'activité biologique ; pas de taches; forte effervescence à l'HCl ; présence des fragments de calcaire.

Les résultats des analyses physico-chimiques sont présentés dans le tableau II

Tableau II. Résultats des analyses de P22

profondeur		0-15 cm	15-22cm	29-40 cm
Horizon		Ap1	Ap2	C
Granulométrie	%A	3,0	8,9	5,0
	%LF	2,02	2,0	4,1
	%LG	0,8	1,8	1,8
	%SF	62,2	52,1	75,4
	%SG	32,0	33,1	15,4
Carbone organique (%)		0,25	0,62	0,31
Matière organique(%)		0,42	1,06	0,53
Calcaire total (%)		17,70	26,56	38,36
Gypse (%)		0,49	1,29	1,47
Capacité d'échange cationique (meq/100g)		2,19	3,26	1,23
pH		8,09	8,19	8,14
Conductivité électrique 1/5 (ms/cm)		0,45	0,29	0,22
Bilan ionique	HCO ₃ ⁻ (mé/l)	0,21	0,35	0,15
	SO ₄ ²⁻ (mé/l)	0,87	1,26	1,63
	Cl ⁻ (méql)	0,25	0,25	0,75
	Na ⁺ (méql)	0,68	2,35	0,29
	Ca ⁺⁺ (méql)	0,09	0,05	0,01
	K ⁺ (méql)	0,31	0,23	0,30
	Mg ⁺⁺ (méql)	0,29	0,88	0,25
Densité apparente		1,40	1,41	1,42
Perméabilité cm/h		5,41		

1.3. Discussion

Le profil P22 de la parcelle 2 se caractérise particulièrement par l'augmentation de la teneur en argile qui atteint 8,85 %. La teneur la plus élevée en matière organique est observée au niveau de l'horizon de sub-surface avec 1.06 %, les horizons de surface et de profondeur sont faibles en matière organique. Les valeurs de la CEC oscillent entre 2 et 4 meq/100g. Ce profil présente une augmentation graduelle du taux de calcaire avec la profondeur, plus de 17 % dans l'horizon de surface, 25 % dans l'horizon de sub-surface et 38 % dans l'horizon de profondeur. Le pH est légèrement basique ($8,09 < \text{pH} < 8,19$). La conductivité électrique est faible, elle varie de 0.22 à 0.45 dS/m, la plus grande valeur de la CE se retrouve dans l'horizon de sub-surface. Ce profil présente des densités apparentes de l'ordre de 1.4 et une faible perméabilité de 5,41 cm/h.

Annexe 3

1. Morphologie et propriétés du profil P32

1.1. Les données générales

Les coordonnées géographiques sont 000, 1927,0'' de longitude Est et 28,39'35,8'' de latitude Nord.

Date de description: 25/12/2011

Temps : ciel clair

Altitude : 182m

Topographie : terrain plat

Matériaux originels : calcaire.

Etat de surface : Terrain cultivé en blé dur en début de tallage, apparition d'une fine croûte de battance, charge caillouteuse réduite.

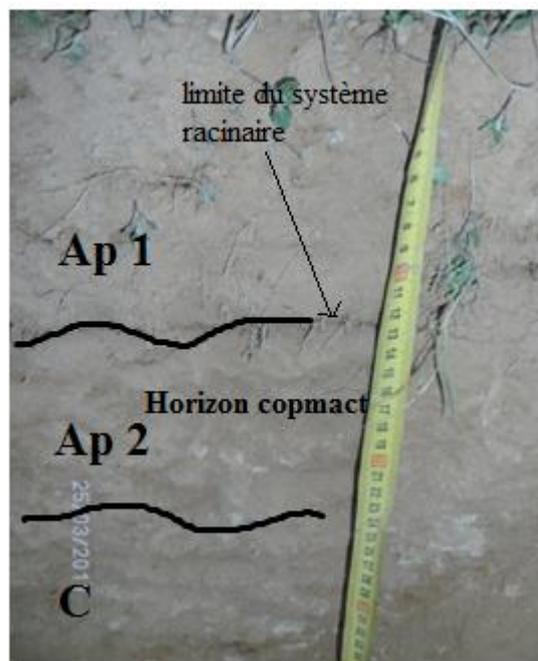


Photo 3. Profil 32

1.2. Description morphologique

Le profil 32 est montré par la photo 3.

Ap1 : 0-12 cm: peu frais ; couleur à l'état frais 2.5YR5/4 ; sableux ; structure massive très aérée ; poreux ; non compact ; des agrégats friables en surface ; présence d'éléments grossiers entourés par du sol moine de 10 % ; peu organique ; présence de racines du blé; activité biologique réduite ; pas de taches; effervescence à l'HCl généralisée ; transition peu nette et régulière.

Ap2 : 12-23 cm: peu frais ; couleur à l'état frais 2.5YR 6/6 ; sableux ; structure massive ; moins poreux ; compact ; pas d'agrégats ; présence

d'éléments grossiers moine de 15 % ; non organique ; pas de racines ; pas d'activité biologique ; pas de taches; effervescence à l'HCl généralisée ; transition peu nette et régulière.

C3 : 23-40 cm: peu frais ; couleur à l'état frais 2.5YR 6/8 ; sableux ; structure massive ; compact ; pas d'éléments grossiers; pas de racines pas d'activité biologique ; pas de taches; forte effervescence à l'HCl ; présence de fragments de calcaire.

Les résultats des analyses physico-chimiques sont présentés dans le tableau III

Tableau III. Résultats des analyses de P32

profondeur		0-12 cm	12--23 cm	23-40 cm
horizon		Ap1	Ap2	C
Granulométrie	%A	3,58	7,92	2,77
	%LF	0,86	0,26	0,37
	%LG	1,31	4,46	9,65
	%SF	47,82	76,87	68,61
	%SG	46,43	10,50	18,60
Carbone organique (%)		0,45	0,09	0,49
Matiere organique (%)		0,78	0,16	0,85
Calcaire total (%)		15,74	19,67	38,36
Gypse (%)		0,93	1,46	1,74
Capacité d'échange cationique		2,4	2,87	1,79
pH		8,07	8,05	8,05
Conductivité électrique 1/5 (ms/cm)		0,29	0,57	0,52
Bilan ionique	HCO ₃ ⁻ (mé/l)	0,20	0,25	0,20
	SO ₄ ²⁻ (mé/l)	1,30	2,10	0,98
	Cl ⁻ (méql)	0,75	1,25	1,75
	Na ⁺ (méql)	1,63	4,60	2,90
	Ca ⁺⁺ (méql)	0,09	0,14	0,08
	K ⁺ (méql)	0,31	0,30	0,29
	Mg ⁺⁺ (méql)	0,40	0,48	0,42
Densité apparente g/cm ³		1,33	1,58	1,46
Perméabilité cm/h		12,18		

1.3. Discussion

Le profil P32 de la parcelle 3 est caractérisé par une teneur de 46 % en sable grossier dans l'horizon de surface, l'horizon de sub-surface contient 10 % et l'horizon de profondeur 18 %. La teneur en argile reste toujours faible se situe entre 2.77 et 7.92 %. La teneur en matière organique est de 0.78 % au niveau de l'horizon de surface, 0.16 % dans l'horizon de sub-surface et 0.85 % en profondeur. Les valeurs de la CEC oscillent entre 1.79 et 2.87 meq/100g. Ce profil présente un taux de calcaire augmente graduellement avec la profondeur, plus de 15 % dans l'horizon de surface, 20 % dans l'horizon de sub-surface et près de 40 % dans l'horizon de profondeur. Le pH est basique (8). La conductivité électrique est faible, elle varie de 0.29 à 0.57 dS/m, la plus grande valeur de la CE se retrouve dans l'horizon de sub-surface. Ce profil présente des densités apparentes variables, la densité apparente est de 1.33 dans l'horizon de surface, elle augmente jusqu'à 1.58 puis diminuent dans l'horizon de profondeur avec une valeur de 1.46. La perméabilité est moyenne, elle est de 12.18 cm/h.

Annexe 4

Tableau I. comparaison des moyenne entres couches de la variation verticale de la conductivité électrique ($CE_{1/5}$)

Parcelle	Horizon		t	probabilité	Signification
Témoin	H1	H2	0,83	0,45	NS
	H1	H3	1,69	0,16	NS
	H2	H3	0,84	0,44	NS
Parcelle 1	H1	H2	2,47	0,60	NS
	H1	H3	0,55	0,02	S
	H2	H3	-3,71	0,54	NS
Parcelle 2	H1	H2	0,66	0,56	NS
	H1	H3	0,62	0,75	NS
	H2	H3	-0,33	0,32	NS
Parcelle 3	H1	H2	1,12	0,83	NS
	H1	H3	0,21	0,46	NS
	H2	H3	-0,82	0,45	NS

Tableau II. comparaison des moyenne entres parcelles de la variation spatiale de la conductivité électrique ($CE_{1/5}$)

Horizon	Parcelle		t	Probabilité	Signification
H1	T	P1	0,76	0,48	NS
	T	P2	-0,51	0,63	NS
	T	P3	0,50	0,63	NS
	P1	P2	-1,38	0,23	NS
	P1	P3	-0,39	0,71	NS
	P2	P3	1,43	0,22	NS
H2	T	P1	2,35	0,07	NS
	T	P2	-0,78	0,47	NS
	T	P3	0,46	0,66	NS
	P1	P2	-4,36	0,01	S
	P1	P3	-2,12	0,10	NS
	P2	P3	1,42	0,22	NS
H3	T	P1	-0,62	0,56	NS
	T	P2	-2,14	0,09	NS
	T	P3	-1,15	0,31	NS
	P1	P2	-3,11	0,03	NS
	P1	P3	-0,90	0,41	NS
	P2	P3	1,04	p = 0,35	NS

Tableau III. comparaison des moyenne entres couches de la variation verticale des taux du calcaire total.

Parcelle	Horizon		t	p	signification
Témoin	H1	H2	1,56	0,19	NS
	H1	H3	7,92	0,00	S
	H2	H3	5,98	0,00	S
Parcelle 1	H1	H2	6,41	0,00	S
	H1	H3	6,75	0,20	NS
	H2	H3	1,50	0,00	S
Parcelle 2	H1	H2	5,79	0,00	S
	H1	H3	5,94	0,04	S
	H2	H3	2,92	0,36	NS
Parcelle 3	H1	H2	1,01	0,00	S
	H1	H3	5,94	0,00	S
	H2	H3	5,12	0,19	NS

Tableau IV. comparaison des moyenne entres parcelles de la variation spatiale des taux du calcaire total.

Horizon	Parcelle		t	Probabilité	Signification
H1	T	P1	-5,38	0,00	S
	T	P2	-5,33	0,00	S
	T	P3	-2,92	0,04	S
	P1	P2	0,03	0,98	NS
	P1	P3	1,00	0,37	NS
	P2	P3	0,98	0,38	NS
H2	T	P1	-3,07	0,04	S
	T	P2	-3,97	0,02	S
	T	P3	-3,39	0,03	S
	P1	P2	-3,39	0,03	S
	P1	P3	-1,30	0,26	NS
	P2	P3	-0,62	0,56	NS
H3	T	P1	-9,15	0,00	S
	T	P2	-6,86	0,00	S
	T	P3	-6,93	0,00	S
	P1	P2	0,85	0,44	NS
	P1	P3	3,79	0,02	S
	P2	P3	1,92	0,12	NS

Tableau V. Comparaison des moyenne entres couches de la variation verticale des donnée de la densité apparente

Parcelle	Horizon		t	p	signification
Témoin	H1	H2	-1,09	0,33	NS
	H1	H3	0,88	1	NS
	H2	H3	-0,22	0,42	NS
Parcelle 1	H1	H2	0,52	0,83	NS
	H1	H3	1,70	0,62	NS
	H2	H3	1,42	0,16	NS
Parcelle 2	H1	H2	-0,11	0,22	NS
	H1	H3	-0,81	0,91	NS
	H2	H3	5,54	0,46	NS
Parcelle 3	H1	H2	1,66	0,00	S
	H1	H3	-0,33	0,17	NS
	H2	H3	-1,09	0,71	NS

Tableau VI. Comparaison des moyenne entres parcelles de la variation spatiale des donnée de la densité apparente

Horizon	Parcelle		t	Probabilité	Signification
H1	T	P1	-0,80	0,46	NS
	T	P2	5,93	0,00	S
	T	P3	4,82	0,01	S
	P1	P2	3,07	0,04	S
	P1	P3	2,41	0,07	NS
	P2	P3	-3,20	0,03	S
H2	T	P1	-3,20	0,03	S
	T	P2	5,99	0,00	S
	T	P3	10,6	0,00	S
	P1	P2	6,36	0,00	S
	P1	P3	9,14	0,00	S
	P2	P3	-0,67	0,57	NS
H3	T	P1	0,59	0,58	NS
	T	P2	1,91	0,12	NS
	T	P3	3,54	0,02	S
	P1	P2	2,27	0,08	NS
	P1	P3	4,44	0,01	S
	P2	P3	9,14	0,77	NS

Tableau VII. Comparaison des moyenne entres couches de la variation verticale des donnée de résistance à la pénétration

Parcelle	Horizon		t	p	signification
Témoin	H1	H2	0,08	0,93	NS
	H1	H3	-0,36	0,73	NS
	H2	H3	-0,42	0,69	NS
Parcelle 1	H1	H2	-1,05	0,35	NS
	H1	H3	0,65	0,54	NS
	H2	H3	-0,79	0,47	NS
Parcelle 2	H1	H2	-1,05	0,35	NS
	H1	H3	3,17	0,03	S
	H2	H3	-2,01	0,11	NS
Parcelle 3	H1	H2	-6,65	0,00	S
	H1	H3	2,65	0,06	NS
	H2	H3	-1,67	0,17	NS

Tableau VIII. Comparaison des moyenne entres parcelles de la variation spatiale des donnée de résistance à la pénétration

Horizon	Parcelle		t	Probabilité	Signification
H1	T	P1	-7,33	0,00	S
	T	P2	-0,57	0,59	NS
	T	P3	-1,54	0,19	NS
	P1	P2	1,64	0,17	NS
	P1	P3	1,41	0,23	NS
	P2	P3	-0,47	0,65	NS
H2	T	P1	-3,42	0,02	S
	T	P2	4,00	0,01	S
	T	P3	2,17	0,09	NS
	P1	P2	5,22	0,00	S
	P1	P3	3,91	0,01	S
	P2	P3	-2,04	0,10	NS
H3	T	P1	-2,62	0,05	S
	T	P2	-5,32	0,00	S
	T	P3	-4,11	0,01	S
	P1	P2	0,42	0,69	NS
	P1	P3	0,45	0,67	NS
	P2	P3	0,12	0,90	NS

Tableau IX. Comparaison des moyenne des données de la perméabilité hydraulique

Parcelle		t	Probabilité	Signification
T	P1	0,46	0,66	NS
T	P2	-14,12	0,00	S
T	P3	-8,60	0,00	S
P1	P2	-17,11	0,00	S
P1	P3	-10,11	0,00	S