

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

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

MEMOIRE

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

Option : Pédosphère

THEME

**PROPRIETES D'UN SOL ARGILEUX
CULTIVE EN BLE SOUMIS A
DIFFERENTES TECHNIQUES DE TRAVAIL
DU SOL**

Présenté par : BELHADJ Abdelouahab

Devant le jury:

<i>Président du jury</i> :	M. DAUD Y.	Professeur
<i>Directeur de thèse</i> :	M. DJILI K.	Professeur
<i>Examinatrices</i> :	Mm. ZERROUK F.	Maître de conférences
	Melle. BOUREGHDA N.	Maître de conférences

Le 14 /12/2014

Année Universitaire 2014-2015

Résumé

Cette recherche a pour objectif de comparer l'effet sur le sol et le végétal de trois techniques de travail du sol (travail conventionnel TC, travail superficiel TS et semis direct SD) après trois années de culture. L'expérimentation a été menée à la station expérimentale de l'Institut Techniques des Grandes Cultures de Oued Smar (Alger) sur un sol peu évolué d'apport alluvial argilo-limoneux cultivé en blé dur. Les résultats ont montré que SD favorise une meilleure organisation structurale du sol accompagnée d'une meilleure densité apparente, porosité totale, macroporosité et rétention en eau dans l'horizon de surface. De même, les résultats ont montré que le SD engendre également une accumulation de la matière organique dans la couche superficielle du sol. Cependant, TC et TS sont plus favorables aux propriétés physiques et hydriques de l'horizon de subsurface que SD. Les résultats ont montré également les rendements en blé dur sont meilleure sous SD que sous TS et TC. Au total, les résultats obtenus lors de cette étude montrent que l'action des outils de travail du sol affecte profondément la répartition de la matière organique et la structure du sol. Ces deux paramètres influencent à leur tour les autres paramètres physiques et hydriques et par conséquence le rendement du blé.

Mots clés : blé dur, Semis direct, Travail du Sol Superficiel, Travail du Sol Conventionnel, Structure du Sol.

Abstract

The aim of this research is to study the effect of three different tillage techniques (conventional tillage, low till and No-till) upon the soil and the crop during three years of cultivation. The experimentation has been undertaken at the national institute of cereal crops (ITGC) at oued smar (Algiers) at a soil with a clay loam technique cultivated with wheat crop. The main result obtained show that the no-till technique promotes a better structural organization of the soil with a better bulk density, total porosity, the macroporosity and higher water retention at the surface horizon. Moreover, the results show no-till technique increase the organic matter in surface horizon. However, TC and TS has a better effect upon the hydro-physical properties at the depth horizon than no-till technique. The results show also a higher yield in the wheat crop obtained with no-till than TC and TS. In conclusion, the results obtained in this research show that the action of the tillage technique had a profound effect upon the repartition of the organic matter and soil structure. These two parameter had an effect upon the other hydro-physical parameter which had an effect at the yield of the wheat.

Key words: Wheat Crop, No-till, Low-till, Conventional tillage, Soil Structure.

المخلص

هذا البحث يهدف الى مقارنة تأثير ثلاث تقنيات للحرث (حرث تقليدي، حرث سطحي و زرع مباشر) على التربة و النبات بعد ثلاث سنوات من الزراعة. اقيمت التجربة بالمعهد التقني للمحاصيل الكبرى (العاصمة) على تربة طينية مزروعة بالقمح. اظهرت النتائج أن تقنية دون حرثة تشجع الهيكلية للتربة، المسامية الكلية و الكبيرة، وأعلى على ذلك، فقد بينت النتائج عدم الحرثة تقنية زيادة المواد العضوية في و الكبيرة. احتباس الماء في السطح الأفق السطح. الأفق السطح.

الحرث التقليدي و السطحى يشجعان الخصائص الفيزيائية و الهيدريكية لافق التحت السطحى مقارنة بالزرع المباشر. النتائج المتحصل عليها بينت كدالك تفوق الزرع المباشر لمردود القمح. وفي الختام، فإن النتائج التي تم الحصول عليها في هذا البحث تبين أن تقنية الحرث كان له تأثير عميق على توزيع المادة العضوية و هيكلية بنية التربة. هذان الاخيران ياتران على باقى العناصر الفيزيائية و الهيدريكية و بالتالى على مردود القمح.

محصول القمح، لا حرث، الحرثة السطحية، الحرثة التقليدية، بنية التربة: الكلمات الرئيسية.

Remerciements

Au terme de ce travail, je voudrai exprimer toute ma reconnaissance à ceux qui tout au long de mon parcours m'ont apporté leurs conseils et leurs encouragements.

J e tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse, Monsieur K. DJILI, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique EL- Harrach, d'avoir accepté de diriger ce travail. Je voudrai le remercier, tout particulièrement, pour sa patience, sa disponibilité et son aide.

*J'*exprime mes sincères remerciements à Monsieur Y. DAOUD, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique EL- Harrach, pour l'honneur et le plaisir qu'il m'a fait en acceptant de présider ce jury, je le prie d'accepter le témoignage de ma reconnaissance.

J e remercie Madame F. ZERROUK, Maitre de conférences à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique EL- Harrach, d'avoir accepté d'examiner ce travail, qu'il trouve ici le témoignage de mon profond respect.

J e remercie, Mademoiselle N. BOURAGHDA, Maitre de conférences à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique EL- Harrach, d'avoir accepté d'examiner ce travail

Dédicaces

A mes parents à qui, je dois tous.

A ma femme.

A mon fils IBRAHIM

A mes frères et mes sœurs.

A toute ma famille.

A tous mes amis (Iddir, Hadj Miloud, Yacine, Ouamer, Bachir, Redouane...).

A tous mes collègues de l'INSID (Kessal, Keslani, Kello, Hammouni, Chaouchi, Amina, Samira, Djamila, Chafikka, Djaouida...).

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

Je dédie ce modeste travail

ABDELOUAHAB

TABLE DES MATIERES

Remerciements

Résumé

Summary

صخلملا

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale.

Chapitre I. Synthèse bibliographiques.

1. Les techniques de travail du sol.....	3
1.1. Les techniques de travail du sol conventionnelles.....	5
1.2. Les techniques de travail du sol sans labour.....	5
1.3. Le semis direct	7
1.3.1. Inconvénients du semis direct.....	7
1.3.2. Les variantes du semis direct.....	7
2. Développement de la technique de conservation du sol dans le monde.....	8
3. Effet des techniques de travail du sol sur les propriétés du sol.....	9
3.1. La structure du sol.....	9
3.2. La stabilité structurale.....	11
3.3. La densité apparente.....	12
3.4. Distribution des pores.....	12
3.5. La rétention en eau.....	13
3.6. La conductivité hydraulique.....	13
3.7. La matière organique.....	14
3.8. Les organismes du sol.....	16
4. La culture du blé.....	16
4.1. Le cycle de développement du blé.....	16
4.2. Les contraintes de la céréaliculture en Algérie.....	18
4.2.1. Contraintes climatiques.....	18
4.2.2. Contraintes techniques.....	19
4.3. Les techniques culturales pour la mise en place du blé en Algérie.....	19
4.3.1. Pour la céréaliculture pluviale.....	19
4.3.2. Pour la céréaliculture par pivot.....	19

Chapitre II. Matériels et méthodes.

1. Le site d'étude.....	21
2. Matériel d'étude	23
2.1. Le sol.....	23
2.2. Le végétal.....	24
3. Méthodes d'étude.....	24
3.1. Dispositif expérimental.....	24
3.2. Les traitements sur le sol.....	25
3.3. Etude de caractéristiques et des propriétés du sol.....	26
3.3.1. Mode de description du profil cultural.....	26

3.3.2. Mode de prélèvement des échantillons du sol.....	27
3.4. Etude des composants du rendement du blé.....	28
3.5. Les Méthodes d'analyses au laboratoire.....	29
3.6. Le traitement des données.....	29

Chapitre III. Résultats et discussion.

1. Description des profils culturaux	
1.1. Sol soumis au travail conventionnel.....	30
1.2. Sol soumis au travail superficiel.....	31
1.3. Sol soumis au semis direct.....	33
1.4. Comparaison entre les trois profils culturaux.....	34
2. La densité apparente du sol.....	35
2.1. Travail conventionnel.....	35
2.2. Travail superficiel.....	36
2.3. Semis direct.....	37
2.4. Comparaison entre les trois techniques.....	38
3. La rétention en eau du sol	40
3.1. Travail conventionnel.....	40
3.2. Travail superficiel.....	41
3.3. Semis direct.....	43
3.4. Comparaison entre les trois techniques.....	45
4. La porosité totale et sa distribution.....	49
4.1. Travail conventionnel.....	49
4.2. Travail superficiel.....	51
4.3. Semis direct.....	53
4.4. Comparaison entre les trois techniques	54
5. Indice d'instabilité structural du sol.....	59
6. Humidité du sol.....	60
6.1. Travail conventionnel.....	60
6.2. Travail superficiel.....	61
6.3. Semis direct.....	64
6.4. Comparaison entre les trois techniques.....	66
7. La matière organique du sol.....	70
7.1. Travail conventionnel.....	70
7.2. Travail superficiel.....	72
7.3. Semis direct.....	73
7.4. Comparaison entre les trois techniques.....	74
8. Rendement et ses composants du blé.....	75
9. Discussion générale.....	78
Conclusion générale.....	80
Références bibliographiques.....	82
Annexe.....	86

La liste des tableaux

Tableau I. Quelques opérations de travail du sol.....	4
Tableau II. Effet du travail du sol sur le taux d'agrégats stables à l'eau (%) après 11 années d'expérimentation.....	11
Tableau III. Effet des techniques de travail du sol sur la teneur en matière organique (%) en fonction du temps.....	16
Tableau IV. Pluviométrie et température enregistrées pendant la période de l'expérimentation (2006/2007).....	23
Tableau V: Résultats des analyses physiques et chimiques du profil pédologique.....	25
Tableau VI: Méthodes d'analyses du sol.....	30
Tableau VII. Signification agronomique de différents états de la rétention du sol en eau.....	30
Tableau VIII. Analyses statistiques ($p<0,05$) de la densité apparente du sol soumis au TC.....	37
Tableau IX. Analyses statistiques ($p<0,05$) de la densité apparente du sol soumis au TS.....	38
Tableau X. Analyses statistiques ($p<0,05$) de la densité apparente du sol soumis au SD.....	39
Tableau XI. Analyses statistiques ($p<0,05$) de la densité apparente du sol soumis selon TC, TS et SD.....	40
Tableau XII. Analyses statistiques ($p<0,05$) de la rétention en eau du sol soumis au TC.....	43
Tableau XIII. Analyses statistiques ($p<0,05$) de la rétention en eau du sol soumis au TS.....	44
Tableau XIV. Analyses statistiques ($p<0,05$) de la rétention en eau du sol soumis au SD.....	45
Tableau XV. Analyses statistiques ($p<0,05$) de la rétention en eau du sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de H1.....	47
Tableau XVI. Analyses statistiques ($p<0,05$) de la rétention en eau du sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de H5.....	48
Tableau XVII. Analyses statistiques ($p<0,05$) de la rétention en eau du sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de H6.....	49
Tableau XVIII. Analyses statistiques ($p<0,05$) de la porosité totale et sa distribution dans le sol soumis au TC.....	52
Tableau XIX. Analyses statistiques ($p<0,05$) de la porosité totale et sa distribution dans le sol soumis au TS.....	54
Tableau XX. Analyses statistiques ($p<0,05$) de la porosité totale et sa distribution dans le sol soumis au SD.....	55
Tableau XXI. Analyses statistiques ($p<0,05$) de la porosité totale et sa distribution dans le sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de H1.....	57
Tableau XXII. Analyses statistiques ($p<0,05$) de la porosité totale et sa distribution dans le sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de H5.....	58
Tableau XXIII. Analyses statistiques ($p<0,05$) de la porosité totale et sa distribution dans le sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de H6.....	59
Tableau XXIV. Différentes classes de stabilité structurale d'après Henin, (1956).....	60

Tableau XXV. Analyses statistiques de l'indice d'instabilité structurale (log Is) du sol soumis selon TC, TS et SD à $p < 0,05$	61
Tableau XXVI. Analyses statistiques ($P < 0,05$) de l'évolution temporelle de l'humidité du sol soumis au TC.....	62
Tableau XXVII. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de l'évolution temporelle de l'humidité du sol soumis au TS.....	64
Tableau XXVIII. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de l'évolution temporelle de l'humidité du sol soumis au SD.....	65
Tableau XXIX. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de l'évolution temporelle de l'humidité du sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de la couche 1.....	67
Tableau XXX. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de l'évolution temporelle de l'humidité du sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de la couche 2.....	68
Tableau XXXI. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de l'évolution temporelle de l'humidité du sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de la couche 3.....	69
Tableau XXXII. Analyses statistiques ($p < 0,05$) des taux de la MO du sol soumis au TC.....	71
Tableau XXXIII. Analyses statistiques ($p < 0,05$) des taux de MO du sol soumis au TS.....	72
Tableau XXXIV. Analyses statistiques ($0,05$) du taux de MO du sol soumis au SD.....	74
Tableau XXXV. Analyses statistiques ($p < 0,05$) des taux de la MO dans le sol selon TC, TS et SD.....	75
Tableau XXXVI. Analyse statistique ($p < 0,05$) du rendement et des composantes du rendement du blé.....	76

La liste des figures

Figure 1: Les divers formes de travail du sol sans labour.....	6
Figure2: Comparaison de la teneur en matière organique entre un sol labouré conventionnellement et un sol non labour.....	15
Figure 3. Localisation du site expérimental à extrait de l'image google earth 2014.....	22
Figure4: Diagramme ombrothermique de Gaussen.....	23
Figure 5: Schéma du dispositif expérimental.....	26
Figure 6. La caractérisation morphologique de la structure du sol.....	28
Figure 7. Densité apparente du sol soumis au TC.....	37
Figure 8. Densité apparente du sol soumis au TS.....	38.
Figure 9. Densité apparente du sol soumis au SD.....	39
Figure 10. Densité apparente du sol soumis selon TC, TS et SD.....	40
Figure 11. Courbes de rétention en eau du sol soumis au TC.....	42
Figure 12. Courbes de rétention en eau du sol soumis au TS.....	43
Figure 13. Courbes de rétention en eau du sol soumis au SD.....	45

Figure 14. Courbes de rétention en eau du sol soumis selon TC, TS et SD au niveau H1.....	46
Figure 15. Courbes de rétention en eau du sol soumis selon TC, TS et SD au niveau H5.....	47
Figure 16. Courbes de rétention en eau du sol soumis selon TC, TS et SD au niveau H6.....	49
Figure 17. Distribution porale dans le sol soumis au TC.....	51
Figure 18. Distribution porale dans le sol soumis au TS.....	53
Figure 19. Distribution porale dans le sol soumis au SD.....	54
Figure 20. Distribution porale dans le sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de l'horizon H1.....	56
Figure 21. Distribution porale dans le sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de l'horizon H5.....	57
Figure 22. Distribution porale dans le sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de l'horizon H6.....	59
Figure 23. Indice d'instabilité structural du sol soumis selon TC, TS et SD.....	60
Figure 24. Evolution temporelle de l'humidité du sol soumis au TC.....	62
Figure 25. Evolution temporelle de l'humidité du sol soumis au TS.....	63
Figure 26. Evolution temporelle de l'humidité du sol soumis au SD.....	65
Figure 27. Evolution temporelle de l'humidité du sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de la couche 1.....	66
Figure 28. Evolution temporelle de l'humidité du sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de la couche 2.....	67
Figure 29. Evolution temporelle de l'humidité du sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de la couche 3.....	68
Figure 30. Profil de distribution des taux de MO dans le sol soumis au TC.....	70
Figure 31. Profil de distribution des taux de MO dans le sol soumis au TS.....	72
Figure 32. Profil de distribution des taux de MO dans le sol soumis au SD.....	73
Figure 33. Profil de distribution de MO dans le sol selon TC, TS et SD.....	74
 La liste des photos	
Photo 1. Profil pédologique	24
Photo 2. Horizons anthropiques du sol soumis au TC.....	32
Photo 3. Horizons anthropiques du sol soumis au TS.....	34
Photo 4. Horizons anthropiques du sol soumis au SD.....	35

Introduction générale

Le travail du sol a pour but de créer un milieu favorable à la germination des graines et au développement des racines (Labreuche et al., 2007). Ainsi, le labour, par son action de retournement de la couche superficielle du sol avec une charrue à versoirs permet d'incorporer les résidus de récolte et les apports minéraux ou organiques, d'emmagasiner des eaux pluviales, de détruire les adventices et d'augmenter la porosité dans le sol (Derpsch et Friedrich, 2009).

Cependant, de nombreux travaux réalisés dans différentes zones climatiques ont révélés des problèmes communs aux sols soumis au travail conventionnel (TC). Dans ce sens, Monnier (1994) ; Labreuche et al., (2007) ; Derpsch et Friedrich, (2009) citent, en particulier, des problèmes liés au tassement du sol, à la chute de ses teneurs en matières organique et à la limitation de sa perméabilité hydraulique ce qui favorise l'érosion hydrique et éolienne des sols. Ils citent également le coût énergétique et financier du TC et ses effets négatifs sur l'environnement.

Pour pallier à ces problèmes, l'Agriculture a entamé une substitution graduelle mais lente de TC par des formes variées de préparation du sol sans retournement de la bande du sol (travail du sol sans labour TS et le semis direct SD). TS et SD ont été regroupées sous le terme de technique de travail du sol de conservation, ou Agriculture de Conservation, lorsqu'ils laissent plus de 30 % des résidus de la culture précédente en surface (Labreuche et al., 2007 ; Derpsch et Friedrich, 2009).

De ce fait, la présence d'un mulch en surface et la limitation des perturbations verticales du sol protègent le sol contre l'érosion éolienne et hydrique (Roger-Estrade et al., 2011). Elles limitent aussi les pertes de la matière organique et elles favorisent l'activité biologique des sols tout en permettant donc de réduire la charge de travail des agriculteurs sans diminuer pour autant le rendement des cultures (Derpsch et Friedrich, 2009 ; Roger-Estrade et al., 2011). Cependant, le développement de ces techniques s'est accompagné d'une utilisation croissante d'herbicides nécessaire au contrôle du développement des adventices qui n'est plus assuré, en partie, par le labour (Derpsch et Friedrich, 2009).

Depuis quelques années, l'agriculture de conservation est entrain de substituer de façon assez spectaculaire aux systèmes de production conventionnels. Elle s'étend actuellement sur près de 111 millions d'hectares dans le monde, dans des environnements et des climats très contrastés (Derpsch et Friedrich, 2009).

En Algérie, le développement de la technique de conservation du sol, en particulier le SD, est au stade embryonnaire. La plus part des études et travaux réalisés dans ce sens se concentrent sur le rendement, le contrôle des mauvaises herbes et le choix du semoir (Harrade, 2005; Bouzrara et al., 2011).

L'Algérie a réellement pris conscience de l'importance de SD sur la qualité des sols à partir de la «4.Rencontres Méditerranéenne du Semis Direct», qui a été tenu à Sétif en 2010. Ainsi, de nombreuses études ont été effectuées dans ce domaine mais elles se sont concentrées surtout sur l'effet des techniques de travail du sol sur certains paramètres du sol tels que la matière organique, la densité apparente, la porosité totale et l'humidité du sol (Bouzerzour et al., 2011). Cependant, les études de l'impact de SD sur la morphologie du sol et sa structure ont été très peu abordés (Kribaa, 2003 ; Souici, 2010).

C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente recherche qui a pour objet d'évaluer l'impact de trois techniques de travail du sol sur les caractéristiques pédologiques et sur le rendement agronomique d'un sol argileux situé en climat méditerranéen subhumide. Les techniques de travail du sol étudiées sont le travail conventionnel (TC), le travail superficiel ou minimum (TS) et le semi direct (SD). Les propriétés pédologiques étudiées sont la morphologie du sol, la densité apparente, le taux d'humidité, le taux de matière organique, la porosité totale et sa distribution. La culture utilisée est le blé dur et les composantes du rendement étudiées sont plants/m², nombre d'épis/m², nombre de grains/épi, nombre d'épillet/épi et le poids de mille grains.

Pour présenter les résultats de cette recherche, nous avons organisé ce document en trois chapitres.

- Le premier chapitre est une revue de la littérature internationale qui permet d'identifier les différentes techniques de travail du sol, leurs impacts sur les propriétés du sol et leurs conséquences sur le rendement du blé.

- Le deuxième chapitre présente la démarche expérimentale adoptée pour répondre aux objectifs de ce travail.

- Les résultats obtenus sont présentés et discutés dans le troisième chapitre.

Ce document se termine par une conclusion générale dans laquelle nous présentons les principaux résultats obtenus et proposons les perspectives de cette recherche.

Chapitre I. Synthèse bibliographique

Cette synthèse bibliographique traite quatre principaux points :

- Le premier point est consacré à la présentation des trois techniques de travail du sol, à savoir la technique conventionnelle de travail du sol (TC), la technique sans labour de travail du sol (TS) et le semis direct (SD).

- Le deuxième point traite du développement de la technique culturale de conservation du sol en diverses régions pédoclimatiques dans le monde et en Algérie.

- Le troisième point est une présentation des travaux de recherche menés sur l'effet des différentes techniques de travail du sol sur les propriétés physique, hydrique et chimiques du sol.

- Le quatrième point traite les techniques culturales de la mise en place du blé.

1. Les techniques de travail du sol

La préparation du sol est l'une des principales techniques culturales responsables du bon développement des cultures et garantissant en grande partie le haut rendement. Elle permet l'entretien du sol et la réorganisation de sa structure en vue d'accueillir une nouvelle culture dans les meilleures conditions agronomiques et économiques (Roger-Estrade et al., 2011).

Dans une étude de terminologie relative à la définition du concept « technique de travail du sol », Labreuche et al., (2007) révèlent que la technique de travail du sol s'identifie par deux écoles, une école française et une autre américaine.

L'école française identifie « technique de travail du sol » par les opérations de travail du sol et les itinéraires techniques. En fonction des opérations de travail du sol, les principaux critères de différenciation entre les techniques de travail du sol sont la profondeur de travail, l'existence ou non d'un retournement de la surface et le degré de mélange des horizons (tableau I).

Tableau I. Quelques opérations de travail du sol (Labreuche et al., 2007)

Opérations	Outils	Profondeurs (cm)	Enfouissement des résidus de récolte	Couverture du sol
Labour profond	Charrues à versoirs	35 à 45	Retourne ment et mélange	Incorporation Totale
Labour Superficiel	Charrues déchaumeuses à versoirs	15	Retournement et mélange	Incorporation Totale
Pseudo labour	Charrues à disques, Chisels, Décompacteurs,	15 à 40	Mélange	Forte incorporation
Décompactage	Décompacteurs	15 à 40	/	Aucune incorporation
Travail Superficiel	/	0 à 15	Mélange	Incorporation faible à moyenne
Déchaumage	Déchaumeurs (disques, dents), Chisels	-0-8 cm -8-15 cm	Mélange	Incorporation faible à moyenne
Reprise de labour	Pulvériseurs à disques, Chisels,	0-8 cm 8-15 cm	Mélange	Incorporation faible à moyenne
Préparation du lit de semence	Pulvériseurs à disques, Cultivateurs légers, Vibroculteurs, Outils animés	0-8 cm 8-15 cm	Mélange	Incorporation faible à moyenne

En fonction de l'itinéraire de travail, les techniques de travail du sol sont identifiées par l'opération de travail du sol la plus profonde et par l'objectif de l'itinéraire technique. Par exemple, pour la mise en place de l'orge de printemps, les agriculteurs adoptent deux itinéraires techniques. Le premier est l'itinéraire profond avec retournement du sol qui commence par une opération de déchaumage, puis un labour avec retournement du sol à 25 cm par une charrue à versoir, puis une reprise du labour par cultivateur lourd et il est terminé par un combiné de préparation du lit de semence - semis par herse rotative et semoir. Le deuxième est l'itinéraire profond sans retournement du sol où le chisel remplace la charrue à versoir (Labreuche et al., 2007).

Contrairement à l'école française, l'école américaine définit globalement « technique de travail du sol » en fonction du taux de couverture du sol par les résidus de cultures.

1.1. Technique de travail du sol conventionnelle

Elle est appelée parfois « travail du sol intensif » ou bien « travail du sol classique ». Cette technique est caractérisée par l'opération du labour profond avec retournement du sol à l'aide d'une charrue à versoirs, suivi par les diverses opérations de la préparation du lit de semences (Labreuche et al., 2007 ; Derpsch et Friedrich, 2009). Le but de cette technique est l'incorporation des résidus et des apports minéraux ou organiques, l'emmagasinement des eaux pluviales, l'éclatement des mottes d'argile par l'action du gel-dégel, la destruction des adventices, l'augmentation du contact entre la semence et les éléments structuraux, la fragmentation et l'accroissement de la porosité qui favorisent un réchauffement plus rapide au printemps (Pomares, 2001 ; Labreuche et al., 2007). Les inconvénients majeurs de cette technique sont la création d'une semelle de labour, la diminution des taux de matière organique, l'augmentation de la susceptibilité du sol au ruissellement et à l'érosion, des coûts d'opérations élevés et la dégradation de la structure du sol (Derpsch et Friedrich, 2009; Roger-Estrade et al., 2011).

Les Américains dénomment cette technique « Conventional tillage with mouldboard ploughing » où le taux de couverture du sol est inférieur à 15 % et la quantité totale de résidus est inférieure à 0,5 t/ha. Cette notion de technique peut définir un travail du sol sans labour (pseudo-labour, un décompactage). Elle représente la technique habituelle des régions très sensibles aux risques d'érosion aux États-Unis (Labreuche et al., 2007; Derpsch et Friedrich, 2009).

1.2. Technique de travail du sol sans labour

Cette technique est le synonyme des termes « travail du sol réduit », « travail minimum », « travail du sol superficiel » ou bien « travail du sol non labour » (Labreuche et al., 2007). Elle est caractérisée par un labour mais sans retournement de la bande du sol. De ce fait, deux pratiques se retrouvent sous le terme de « Travail du sol Sans Labour » (Figure 1).

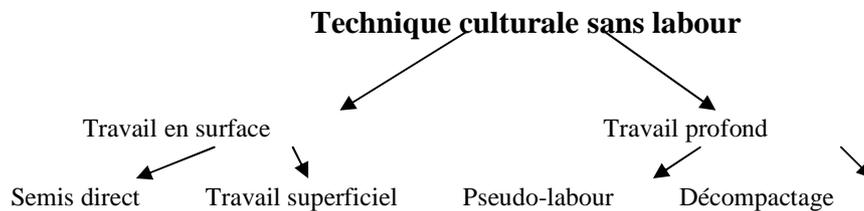


Figure 1. Les différentes formes de travail du sol sans labour (Labreuche et al., 2007).

D'une manière générale, les différents modes de préparation du sol inclus dans la technique de travail du sol sans labour sont:

- le travail superficiel est un travail mécanique en dessous de la zone de semis mais sur une profondeur limitée selon les conditions du milieu (entre 5 et 10 cm).
- le semis direct est une technique qui ne fragmente pas le sol sauf sur la ligne de semis. Il n'y a donc aucune forme de préparation et l'ouvre-sillon se déplace dans un sol intact en coupant lui-même les résidus de culture et le sol. Le succès de cette approche dépend en bonne partie de la capacité du semoir à maintenir une profondeur de semis adéquate malgré les variations des conditions de sol et des quantités de résidus.
- le pseudo-labour travaille le sol sur les 20 premiers centimètres au maximum, c'est-à-dire sur les horizons superficiels et sur l'ensemble de la surface (fragmentation pratiquement égale au labour).
- le décompactage fissure le sol sans mélanger les couches.

Les américaines regroupent dans la technique de travail du sol sans labour toutes les pratiques de travail du sol qui sont caractérisées, non seulement par le non retournement du sol, mais aussi par une couverture du sol par les résidus sur au moins 30% de la surface après le semis. Si la quantité de résidus du précédent cultural en surface est suffisante pour rester supérieure à 30% de couverture du sol, le travail du sol superficiel (mulch tillage) peut aussi être inclus dans le travail du sol de conservation. De plus, le semis direct est la pratique extrême du travail du sol de conservation (Labreuche et al., 2007).

1.3. Semis direct

Le semis direct constitue une pratique traditionnelle dans certains pays de la zone intertropicale, essentiellement dans les parties les plus humides (Razafimbelo, 2005 ; Derpsch et Friedrich, 2009). C'est un système conservatoire du sol où le sol n'est pas travaillé. Il consiste à planter une culture sans travail préalable du sol sur une ouverture dans le sol pour déposer la semence à la profondeur souhaitée. La couverture du sol peut être assurée par les résidus de récoltes précédentes ou par une couverture végétale vivante (cultures intercalaires ou dérobées) (Séguy, (1996) in Razafimbelo, 2005; Derpsch et Friedrich, 2009).

Harvey (2005) montre que la réussite du système de semis direct est mise en évidence après au moins deux ans en sol sableux et cinq ans en sol argileux. La raison principale est l'aération du sol. En travail du sol avec labour, l'aération se fait par l'action de retournement et fractionnement du sol. En situation de non travail du sol, l'aération se fait par les macropores qui sont créés par les vers de terre et les racines.

1.3.1. Inconvénients de semis direct

Le semis direct peut être réussi dans presque tous les types de texture du sol si l'équipement est adapté en conséquence et si les conditions de l'humidité du sol sont bonnes. Mais, certains types du sol, en particulier les sols argileux, sont plus difficiles à gérer. De plus, les limites du semis direct par rapport à la technique conventionnelle sont (Massicotte et al., 2000; Harvey, 2005):

- Utilisation accrue d'herbicides
- Nécessite une très bonne maîtrise de la technique de semis
- Réchauffement et ressuyage lent du sol (levée ralentie et irrégulière).
- Favorise les fusarioses
- Eviter toute atteinte à la structure du sol car tassement du sol non rattrapable
- Fortes variations des rendements selon conditions

1.3.2. Les variantes du semis direct

Il existe trois façons de faire le semis direct. Le choix de l'une ou de l'autre est déterminé par la culture à ensemercer, le type et la quantité de résidus, la texture et les conditions du sol (Massicotte et al., 2000; Harvey, 2005).

1.3.2.1. Semis direct sans travail du sol: Dans cette variante, il n'y a aucune forme de préparation du sol et l'ouvre-sillons se déplace dans un sol intact en coupant les résidus et le sol. Cette façon du semis est courante dans le cas du semoir de céréales principalement sur des sols sableux et limoneux avec une quantité modérée de résidus.

1.3.2.2. Semis direct avec travail du sol lors du semis: Dans ce cas, d'étroites bandes de sol sont travaillées vis-à-vis de chaque unité de semis par des coutres installés à même le semoir. Ce mode de semis convient aux céréales dans des conditions de sol difficiles sur une abondance de résidus de cultures.

1.3.2.3. Semis direct avec travail du sol en bandes avant le semis: Cette variante consiste à travailler le sol sur des bandes étroites lors de l'automne précédent ou au printemps quelques jours avant le semis. Elle ne s'applique qu'aux cultures semées en rangs à grands espacements.

2. Développement de la technique de conservation du sol dans le monde

Actuellement, toutes les techniques de travail du sol caractérisées par le non retournement de la bande superficielle du sol sont dénommées «techniques culturales de conservation du sol». Cette dernière s'étend sur près de 111 millions d'hectares dans le monde, dans des environnements et climats très contrastés (Derpsch et Friedrich, 2009).

Les principales causes de son développement rapide sont la conservation des sols, la conservation de l'eau, l'augmentation de la productivité des sols, la réduction des coûts du travail et le souci environnemental. Les pays leaders en technique de conservation du sol sont les États-Unis, la France, le Brésil, le Canada et l'Australie (Labreuche et al., 2007; Derpsch et Friedrich, 2009).

Les autres pays ont commencé à adopter la technique de conservation du sol après la conférence internationale tenue en octobre 2001 à Madrid (Derpsch et Friedrich, 2009). Les membres de l'organisation FAO sont d'accord, d'une part, pour identifier le terme «Technique de conservation du sol» comme terme générique des termes de travail du sol superficiel, le non labour, no tillage, et d'autre part, pour adopter ce dernier système comme un système de production agricole durable. L'adoption de ce système est motivée par des considérations à la fois agronomiques et environnementales, mais aussi économiques (Derpsch et Friedrich, 2009).

De ce fait, la FAO décompose la technique culturale de conservation du sol en trois éléments essentiels : la réduction du travail du sol avec l'absence de retournement des couches du sol et/ou implantation de cultures en semis direct, le maintien d'un couvert végétal permanent (mort ou vivant) et l'adoption d'une rotation suffisamment longue et variée (Derpsch et Friedrich, 2009).

En Algérie, le développement de la technique de conservation du sol, en particulier le semis direct, est au stade embryonnaire (Harrade, 2005; Bouzrara et al., 2011). Ces derniers montrent que la plus part des études et travaux se concentrent sur l'effet de ces techniques sur le rendement agricole, le contrôle des résidus, la rotation des cultures, le contrôle des mauvaises herbes et le choix du semoir. L'Algérie commence à prendre l'importance du semis direct sur la qualité des sols à partir de la 4^{ème} rencontre méditerranéen du semis direct, organisée dans le cadre des activités du Réseau grandes Cultures Méditerranéen (RCM), qui a été tenue à Sétif en 2010 (Bouzerzour et al., 2011). Ainsi, la majorité des études sont concentrées sur les paramètres de la matière organique, de la densité apparente, de la porosité et sur l'humidité du sol. Mais, les études de l'impact des techniques de travail du sol sur la morphologie du sol en particulier, l'état structural du sol, sont rare (Kribaa, 2003; Souici, 2010).

3. Effets des techniques de travail du sol sur les propriétés du sol

La compaction, le retournement et la fragmentation du sol ainsi que la répartition des résidus de la culture précédente dans le sol constituent les principales différences entre la technique conventionnelle du travail du sol, la technique de travail sans labour du sol et le semis direct. Ces aspects peuvent affecter profondément la modification des propriétés du sol.

3.1. Structure du sol

La structure du sol se définit comme étant l'ensemble des caractères liés à la disposition spatiale des éléments qui constituent le solum ainsi qu'à la nature et à l'intensité des liaisons qui existent entre eux. Cette organisation structurale commande, notamment, l'aération, la circulation de l'eau, le développement et l'état sanitaire des racines des végétaux (Holland, 2004).

Dans un sol cultivé, la structure évolue en permanence sous l'effet du climat, de la faune du sol, des racines et des actions anthropiques (techniques culturales, passage des engins

agricoles, succession des cultures). Ces actions entraînent soit une dégradation de la structure (diminution de la porosité structurale) soit une régénération de la structure (accroissement de la porosité structurale) (Girard et al., 2005). Les actions conduisant à la dégradation de la structure sont le tassement par les roues des engins agricoles ou la prise en masse sous l'effet du climat, dont la manifestation la plus visible est le phénomène de battance. Les processus menant à un accroissement de la porosité sont la fragmentation par les outils de travail du sol et l'action par le climat (alternances gel/dégel, humectation/dessiccation) ou par la faune du sol (verre de terre) (Girard et al., 2005; Roger-Estrade et al., 2011).

De ce fait, la caractérisation de la structure du sol nécessite une description morphologique d'un profil cultural. En conséquence, les principaux niveaux d'organisation structurale dans le profil cultural sont l'état interne des mottes et le mode d'assemblage des mottes. Une motte est le résultat de l'assemblage naturel de plusieurs agrégats entre eux. Elle a une taille moyenne de quelques centimètres. L'agrégat est l'unité fondamentale d'organisation de la structure. Il résulte de l'assemblage cohérent des particules élémentaires du sol (Gautronneau et Manichon, 1987).

L'effet des techniques de travail du sol sur l'évolution structurale du sol a fait l'objet de plusieurs études (Richard et al, 1999 ; Boizard et al., 2004 ; Roger-Estrade, 2004 ; Oorts, 2006; Vian, 2009).

Soane et Ball (1998) in Boizard et al.(2004) indiquent que la plupart de ces études sont des études qui privilégient soit les processus de fragmentation en comparant le semis direct et le labour conventionnel, le travail superficiel et le labour profond, le semis direct et le travail réduit, soit l'étude des processus de compactage en comparant des engins agricoles et leurs caractéristiques de charge ou de pneumatiques. Ils signalent que peu d'études prennent en compte l'ensemble des effets sur la structure qu'engendre l'activité agricole (tassements, fragmentation, retournement du sol, répartition des résidus de récoltes...).

Dans le premier cas, Roger-Estrade (2004) et Oorts (2006) concluent que, dans un sol labouré, la structure du sol est extrêmement hétérogène, elle est composée des terres fines, de mottes compactées de taille décimétriques, de résidus de cultures répartis le long de la bande de labour, de vides et de fissures issus de l'action de retournement de déplacement et de fragmentation de la charrue sur la couche de sol labourée. A l'inverse, la structure dans le sol

non labouré est moins hétérogène à cause de l'absence de l'enfouissement des résidus de récolte, du déplacement et de la fragmentation du sol.

Dans le second cas, Curmi (1988) et Boizard et al.(2004) montrent que le passage d'engins agricoles dégrade plus ou moins la structure du sol et entraîne un tassement localisé qui est en fonction de la pression exercée, du temps d'application, de l'humidité du sol et de l'état de compacité initial. En plus, ces derniers montrent aussi que les propriétés physiques des mottes non compactes (Γ) et des mottes compactes (Δ) sont différentes. La densité apparente des mottes (Δ) est supérieure à celle des mottes (Γ). Ainsi, les mottes (Γ) retiennent plus d'eau aux faibles succions par rapport aux mottes (Δ).

3.2. Stabilité structurale

Une bonne connaissance de la structure du sol à un moment donné, celui de l'observation, si elle est nécessaire n'est pas suffisante (Gautronneau et Manichon, 1987). La structure du sol évolue sous l'action de nombreux facteurs au premier rang desquels figure l'eau (Calvet, 2003 ; Girard et al., 2005). Les études comparatives entre le travail conventionnel et le semis direct montrent que le sol en semis direct est plus stable que le sol en travail conventionnel (Mrabet, 2001). Ces derniers montrent également qu'après 11 années d'expérimentation sur un sol argileux et en climat semi aride, le sol en semis direct présente une amélioration de la stabilité structurale (tableau II). Cette amélioration obtenue sous semis direct est provoquée par une augmentation de la teneur en matière organique.

Tableau II. Effet du travail du sol sur le taux d'agrégats stables à l'eau (%) après 11 années d'expérimentation (Bessam et Mrabet, 2001).

Profondeurs	0-25 cm	25-70cm	70-100cm
Semis direct	59	54	51
Travail conventionnel	58	48	44

Cette relation a fait l'objet de nombreuses études (Annabi, 2005). Ces travaux montrent que la stabilité des agrégats est corrélée à la teneur en carbone organique présent dans le sol.

Comme cette quantité augmente sensiblement en semis direct, les agrégats sont plus stables dans cette pratique culturale.

Le travail du sol intensif, par le biais de labour, dégrade les agents de liaison entre les macroagrégats et peut amener à l'éclatement des macroagrégats et à la libération des microagrégats dans le sol (Razafimbelo, 2005).

3.3. Densité apparente

La densité apparente constitue une première estimation de la porosité globale du sol. Elle est principalement contrôlée par les techniques de travail du sol, l'alternance du cycle humectation/ dessiccation, l'activité biologique et par le développement racinaire (Calvet, 2003; Girard et al., 2005).

Les études traitant de l'effet des techniques de travail du sol sur la densité apparente du sol montrent qu'il y a une diversification entre les résultats obtenus (Tourdonnet et al., 2007). Ces derniers montrent que les facteurs explicatifs de ces diversités sont la durée de l'expérimentation, l'horizon de sol considéré pour les mesures et la date de mesure.

Bescansa et al., (2006) estiment que l'augmentation de la porosité (diminution de la densité apparente) sous labour dans la couche travaillée (5-20cm) est due à l'action de retournement et de fragmentation du sol par la charrue. Pelegrin et al., (1990) et Richard, (2001) in Tourdonnet et al., (2007) n'observent pas de différence entre un sol non travaillé et un sol labouré depuis 3 ans, lorsque la densité est mesurée juste avant le labour alors que cette différence s'élève à 20% en pleine saison culturale. Ceci signifie que le compactage qui résulte de la récolte entraîne une diminution brutale de la porosité alors que la régénération climatique et biologique de la porosité est progressive.

En générale, la présence des résidus des récoltes et l'augmentation des teneurs en matière organique en surface sous le semis direct fait la différence de densité apparente et la porosité à celles de labour Guérif, (1994) et Kay et VandenBygaart, (2002).

3.4. Distribution des pores

Les travaux relatifs aux modifications du système poreux par les techniques de travail du sol dans le monde aboutissent à des résultats contradictoires. Cette contradiction est due aux choix des limites des tailles des pores de différentes classes de porosité (macro, méso, micropore) qui ne sont pas similaires d'une étude à l'autre (Tourdonnet et al., 2007). Par exemple, Kay et

VandenBygaart, (2002) et Heddadj et Cloarec, (2010) classent la porosité en macropores (diamètre supérieur à 30 μm) en mésopores (diamètre compris entre 0,2 et 30 μm) et en micropores (diamètre inférieur à 0,2 μm). D'autres auteurs considèrent que la taille des pores est déduite des caractéristiques de rétention d'eau des sols. Par exemple, Bescansa et al., (2006) considèrent qu'un potentiel matriciel de -33kPa correspond à des pores dont la taille est supérieure à 9 μm , -50kPa à 6 μm et 1500kPa à 0.2 μm . En conséquence, la macroporosité en travail du sol conventionnel est plus importante qu'en travail superficiel et semis direct. Par contre, Pagliai et al., (1995) in Tourdonnet et al., (2007) ne mesurent pas de différence de macroporosité (>50 μm) sur la profondeur de 0-10 cm entre des sols en travail simplifié et des sols labourés. Or, à 20-30cm de profondeur, le sol en travail simplifié présente 10% de macroporosité de plus que le sol labouré.

En plus, Anken et al., (2004) signalent une diminution de 25% du volume des macropores en semis direct à 5-8cm de profondeur.

3.5. Rétention en eau.

Dans le sol, la teneur en eau (θ) et le potentiel hydrique (pF) sont les deux variables permettant de caractériser l'eau dans le sol. Ces variables varient simultanément, mais chaque couple de points (θ et pF) dépend du type de sol dans lequel il est mesuré. Cette relation exprime les variations d'intensité des forces de capillarité et d'adsorption en fonction de la teneur en eau (Calvet, 2003; Girard et al., 2005).

Bescansa et al., (2006) estiment qu'aux faibles potentiels, les différences de teneurs en eau massique entre traitements de travail du sol peuvent être reliées à des différences de structure du sol. Dans ce sens, Carof, (2006) a montré que les propriétés de rétention en eau sont affectées par le travail du sol plus de trois ans après l'abandon du labour et un sol en semis direct retient plus d'eau qu'un sol labouré quel que soit le potentiel hydrique (pF). Ce dernier a mis en évidence le rôle des résidus de récoltes à la surface du sol en semis direct. Ces résidus réduisent le flux d'évaporation, limitent la remontée par capillarité de l'eau contenue en profondeur du sol et limitent le dessèchement du sol. A l'inverse, le dessèchement est très marqué dans l'horizon travaillé en technique de travail du sol conventionnel.

3.6. Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique est un paramètre communément utilisée pour exprimer la perméabilité d'un sol. Elle s'exprime par un coefficient caractérisant la vitesse à laquelle l'eau

s'infiltrer dans le sol selon son état hydrique. La conductivité hydraulique dépend donc de la texture, de la structure du sol, de la forme et de la taille des pores. Plus ces derniers augmentent et plus la conductivité hydraulique est susceptible d'augmenter. Elle dépend également de la continuité, donc de la morphologie de l'espace poral (Calvet, 2003 ; Girard et al., 2005).

Carof, (2007) conclut qu'il n'existe pas de consensus concernant les effets du semis direct sur la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol. Comparée à un sol travaillé, la vitesse d'infiltration de l'eau dans un sol en semis direct est soit plus élevée (Miller et al., 1998), soit similaire (Fuentes et al., 2004) ou soit plus faible (Lampurlanés et Cantero-Martínez, 2006).

Cette variabilité peut s'expliquer par les différences d'évolution du réseau poral au cours du temps entre un sol labouré et un sol en semis direct. Lin et al., (1999) trouvent une amélioration des macropores et en conséquence une augmentation de l'infiltration de l'eau.

Aux longues durées de l'application de semis direct, la réduction du nombre de macropores du sol après l'abandon du labour peut être contrebalancée par un accroissement de la quantité de galeries lombriciennes lors de la pratique (Heddadj et Cloarec, 2010). Ces derniers montrent que la création des macropores en semis direct est due à l'activité biologique, la macrofaune du sol n'étant pas perturbée par le labour mais stimulée par la présence de résidus de végétation en surface.

3.7. Matière organique

La matière organique du sol est composée d'éléments organiques morts (restes de racines, de plantes, excréments, exsudats...), d'organismes vivants (bactéries, champignons, faune du sol...) et d'humus qui est le produit final stable de la décomposition des éléments organiques sous l'action des organismes du sol. Elle est donc soit libre, soit particulière incluse ou non dans les agrégats et associée aux agrégats (Calvet, 2003 ; Girard et al., 2005).

La matière organique est un constituant fondamental du sol, elle contrôle en partie les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Ainsi, elle joue un rôle très important dans le maintien de la stabilité structurale du sol, la rétention et l'infiltration de l'eau. Elle favorise la diffusion de l'air, elle réduit l'érosion dans le sol et elle limite sa compaction (Calvet, 2003).

Plus récemment, des fonctions environnementales ont été attribuées aux matières organiques du sol comme le fait de contribuer à la lutte contre l'effet de serre additionnel en permettant le stockage du carbone dans les sols (Derpsch et Friedrich, 2009).

Le travail du sol conditionne fortement la dynamique des matières organiques, en particulier la minéralisation et son accumulation et la distribution verticale dans le sol. Les essais menés par Lal (1999) in Tourdonnet et al, (2007) sur les effets d'un système de labour conventionnel à un système de non labour montrent une augmentation de la teneur en matière organique dans les cinq à dix premiers centimètres du sol en semis direct (figure 2).

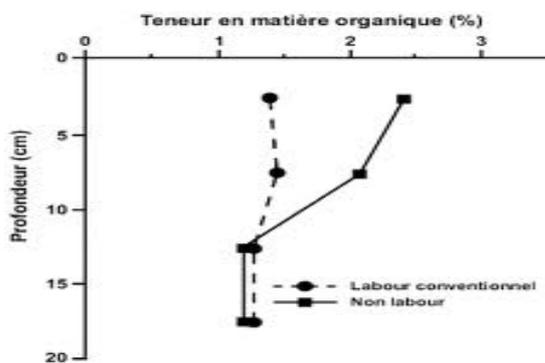


Figure 2. Comparaison de la teneur en matière organique entre un sol labouré conventionnellement et un sol non labour (Lal, 1999) in Tourdonnet et al, (2007).

Balesdent 2000), Razafimbelo (2005) et Carof (2006) montrent également que les stocks de matière organique sont en moyenne plus élevés en semis direct. Ces auteurs rapportent que dans certaines situations, l'accumulation de la matière organique en surface s'accompagne de sa diminution en profondeur. En plus, Oorts (2006) a montré que le semis direct présente des stocks de carbone et d'azote respectivement supérieurs de 5 à 15 % et de 3 à 10% à ceux mesurés sous le labour. De plus, ces concentrations de carbone diminuent avec la profondeur en semis direct alors qu'elles sont distribuées de façon homogène dans la couche labourée.

Cette importante teneur en matière organique dans le semis direct a été prouvée aussi par le travail de Bessam et Mrabet (2001) lors d'une expérimentation de 5 ans et de 11 ans dans un climat semi aride (tableau III).

Tableau III. Effet des techniques de travail du sol sur la teneur en matière organique (%) en fonction du temps (Bessam et Mrabet, 2001).

Travail du sol	Horizon 0-25cm		Horizon 25-70cm		Horizon 70-100cm	
	MO ₁	MO ₂	MO ₁	MO ₂	MO ₁	MO ₂
Non labour	2.31	1.8	1.42	1.3	1.23	1.1
Labour classique	1.45	1.43	1.45	1.21	1.22	1.02

MO₁ : Matière organique après 11 années d'expérimentation

MO₂ : Matière organique après 5 années d'expérimentation

3.8. Organismes du sol

Les organismes du sol, soit les microorganismes (les bactéries, les champignons), soit les macroorganismes (les nématodes, les protozoaires) sont fortement perturbés par le travail du sol (Doran, 1980) in Carof, (2006). Les modifications des conditions pédoclimatiques (la température, l'humidité, la matière organique) en semis direct sont favorables à une augmentation de l'activité et de la biomasse microbienne dans les premiers centimètres de sol (Roper et Gupta, 1995). Cependant, en semis direct, les champignons sont dominants dans les cinq premiers centimètres de sol alors par rapport à un sol labouré (Frey et al., 1999). En outre, la colonisation racinaire par les mycorhizes est plus élevée en sol non travaillé qu'en sol labouré (Anken et al., 2004).

Concernant les macroorganismes, la majorité des études ont été consacrées sur les vers de terre pour leurs rôles essentiels dans l'agrosystème. En effet, la quantité de vers de terre augmente fortement en semis direct par rapport à un sol travaillé conventionnellement (Anken et al., 2004). Carof, (2006) et Oorts (2006) expliquent cette augmentation en semis direct par l'absence de dommages occasionnés aux vers de terre à l'aide de la charrue et par la présence d'une litière en surface du sol.

La réduction du travail du sol est souvent bénéfique aussi aux autres macroorganismes tels que les microarthropodes, les insectes supérieurs et les myriapodes Carof, (2006).

4. Culture du blé

4.1. Le cycle de développement du blé

Il se caractérise par un développement strictement herbacé et s'étend du semis jusqu'à fin tallage (Boulal et al., 2007).

4.1.1. La phase semis – levée

La levée se fait réellement dès la sortie des feuilles à la surface du sol. Au sein d'un peuplement, la levée est atteinte lorsque la majorité des lignes de semis sont visibles. Durant la phase semis levée, l'alimentation de la plante dépend uniquement de son système racinaire primaire et des réserves de la graine.

Les principaux facteurs édaphiques qui interviennent dans la réalisation de cette phase sont la chaleur, l'aération et l'humidité.

4.1.2. La phase levée – tallage

La production de talles commence à l'issue du développement de la troisième feuille. L'apparition de ces talles se fait à un rythme régulier à celui de l'émission des feuilles. A partir des bourgeons situés à l'aisselle des talles primaires initiées à la base du brin maître, les talles secondaires peuvent apparaître et être susceptibles d'émettre des talles tertiaires. Le nombre de talles produites dépend de la variété, du climat, de l'alimentation minérale et hydrique de la plante, ainsi que de la densité de semis.

Quand le tallage est excessif, les besoins en eau sont très importants, alors que la plupart des talles restent stériles. La fin du tallage représente la fin de la période végétative, elle marque le début de la phase reproductive, conditionnée par la photopériode et la vernalisation qui autorisent l'élongation des entre-nœuds.

4.1.3. La phase montaison – gonflement

La montaison débute à la fin du tallage, elle est caractérisée par l'allongement des entre-nœuds et la différenciation des pièces florales. A cette phase, un certain nombre de talles herbacées commence à régresser alors que, d'autres se trouvent couronnées par des épis.

Pendant cette phase de croissance active, les besoins en éléments nutritifs notamment en azote sont accrus. La montaison s'achève à la fin de l'émission de la dernière feuille et des manifestations du gonflement que provoquent les épis dans la gaine.

4.1.4. La phase épiaison – floraison

Elle est marquée par l'éclatement de la gaine avec l'émergence de l'épi. C'est au cours de cette phase que s'achève la formation des organes floraux (l'anthèse) et s'effectue la fécondation. Cette phase est atteinte quand 50 % des épis sont à moitié sortis de la gaine de la dernière feuille. Elle correspond au maximum de la croissance de la plante qui aura élaboré les

trois quarts de la matière sèche totale et dépend étroitement de la nutrition minérale et de la transpiration qui influencent le nombre final de grains par épi.

4.1.5. La période de formation et de maturation du grain

Cette phase marque la modification du fonctionnement de la plante qui sera alors orientée vers le remplissage des grains à partir de la biomasse produite. Au début, le grain s'organise, les cellules se multiplient. Les besoins des grains sont inférieurs à ce que fournissent les parties aériennes (plus de 3/4 de la matière sèche sont stockés au niveau des tiges et des feuilles). Par la suite, les besoins augmentent et le poids des grains dans l'épi s'élève, alors que la matière sèche des parties aériennes diminue progressivement. Seulement 10% à 15% de l'amidon du grain peut provenir de réserves antérieures à la floraison. A l'issue de cette phase, 40 à 50 % des réserves se sont accumulées dans le grain qui, bien qu'il ait atteint sa taille définitive, se trouve encore vert et mou, c'est le stade «grain laiteux ». L'autre partie des réserves se trouve encore dans les tiges et les feuilles qui commencent à jaunir. Les réserves du grain proviennent en faible partie de la photosynthèse nette qui persiste dans les dernières feuilles vertes. Chez les variétés tardives, cette quantité est de 12 % contre 25 % chez les précoces. La majeure partie des réserves accumulées vient des tiges et les feuilles jaunissantes, mais non encore desséchées.

La phase de maturation succède au stade pâteux (45 % d'humidité). Elle correspond à la phase au cours de laquelle le grain va perdre progressivement son humidité en passant par divers stades. Elle débute à la fin du palier hydrique marqué par la stabilité de la teneur en eau du grain pendant 10 à 15 jours. Au-delà de cette période, le grain ne perdra que l'excès d'eau qu'il contient et passera progressivement aux stades « rayable à l'angle » (20 % d'humidité) puis, « cassant sous la dent » (15-16 % d'humidité).

4.2. Contraintes de céréaliculture en Algérie

La céréaliculture algérienne est confrontée à deux types principaux de contraintes à savoir des contraintes climatiques et des contraintes techniques (Kheyar et al, 2007).

4.2.1. Contraintes climatiques

L'adoption des pratiques d'intensification agricole par les agriculteurs algériens est rendue difficile par une pluviométrie globalement déficitaire, aléatoire, irrégulièrement répartie dans l'espace et dans le temps. A cela s'ajoutent les accidents climatiques tels que le gel et le sirocco.

Un manque d'eau ou stress hydrique précoce affecte principalement la croissance des racines, le développement des feuilles et des organes reproducteurs. Ceci se répercute sur le rendement économique de la culture qui peut baisser de plus de 80%. La sécheresse peut intervenir à n'importe quel moment du cycle de croissance du blé (Chenafi et al., 2006).

- Au début du cycle de croissance qui coïncide avec le démarrage de la culture (levée, tallage) et qui, par conséquence, réduit le nombre de plantes et de talles et donc la quantité de biomasse totale.

- A la fin du cycle, plus fréquente, qui affecte le remplissage des grains considèrent que les effets d'un stress hydrique aux stades épiaison et remplissage des grains sont plus pénalisants que ceux dont l'avènement aux stades tallage et montaison.

4.2.2. Contraintes techniques

Les insuffisances techniques liées à la production des céréales sont très nombreuses pour pouvoir être citées exhaustivement, mais les principales peuvent se résumer dans :

- la mécanisation insuffisante ou en mauvais état
- l'absence de maîtrise des techniques culturales
- Le caractère extensif de la production.

4.3. Les techniques culturales pour la mise en place du blé en Algérie

De manière générale, en fonction du climat les agriculteurs utilisent deux techniques de travail du sol pour la mise en place du blé (Kheyar et al, 2007). Une technique de travail du sol comprend un labour profond (avec la charrue) pour la céréaliculture pluviale et une technique de travail implique un labour superficiel (passages de chisel) pour la céréaliculture par pivot.

4.3.1. Pour la céréaliculture pluviale

La céréaliculture pluviale s'étend des zones bioclimatiques des plaines littorales et sublittorales dont la pluviométrie est supérieure à 600mm de pluie aux zones marginales recevant moins de 400mm de pluie (Kheyar et al, 2007). Dans cette sole céréalière, la préparation du sol est qualifiée également de labour classique (travail du sol conventionnel). Cette technique implique une série de passages d'outils de travail du sol avant le semis. Elle comprend un déchaumage, un labour profond avec retournement avec la charrue à soc, un épandage d'engrais de fond, une reprise du labour ou pseudo labour, des façons superficielles pour affiner la préparation et l'opération semis proprement dite. Cette technique est très peu évoluée, elle est utilisée par les agriculteurs comme une nécessité dont les objectifs sont la

lutte contre les mauvaises herbes, l'incorporation des résidus végétaux et de la fertilisation, l'emmagasinement de l'eau pluviale et la mise en place du lit de semence (Kheyyar et al, 2007).

.4.3.2. Pour la céréaliculture sous pivot

C'est la céréaliculture irriguée par pivots et dont l'eau ne constitue plus un facteur limitant en égard aux potentialités de la région saharienne. En plus, le sol dans ces régions est fragile, peu profond et exposé à la salinité (Daoud et Halitim, 1994). Pour toutes ces raisons, la préparation du lit de semence ne peut être envisagée qu'à l'aide d'outils à dents (chisel, cultivateur...) qui ne retournent pas le sol (Harrade, 2005).

4.4. Effet des techniques de travail du sol sur le rendement du blé

En Algérie, selon Harrade, (2005), les premiers résultats relatifs aux études comparatives du rendement du blé entre trois techniques de travail du sol (travail du sol conventionnel, travail du sol minimum et le semis direct) ont été obtenues par Mehdi, (2003) en céréaliculture irriguée par pivot et par D'Bichi et Laggoun, (2004) en céréaliculture pluviale.

Ces résultats montrent que le semis direct permet d'obtenir un meilleur rendement du blé suivi par le travail du sol minimum.

Ainsi, Mrabet (2001) explique cet avantage du rendement en semis direct par le stockage de l'eau de pluie qui est amélioré de 10 à 30 %. En plus, Caneill et Bodet (1991) montrent que l'écart de rendement du blé entre le semis direct et le labour dépasse 5 q/ha au profit du semis direct.

Par contre, dans un climat tempéré, les rendements du blé obtenus avec un travail superficiel du sol ou un semis direct sur un sol moyennement lourd et bien drainé sont très proches de ceux du travail conventionnel (Anken et al., 2004).

Conclusion

Même si le semis direct est une pratique ancienne, son utilisation reste relativement limitée. Les avantages agronomiques du semis direct par rapport au travail du sol conventionnel sont nombreux et considérables. En effet, le semis direct engendre:

- une accumulation des matières organiques en surface qui permet une concentration dans l'horizon de surface des éléments fertilisants et de l'activité biologique du sol,

- une homogénéisation de la structure du sol et une augmentation de la stabilité structurale après une période d'adaptation de quelques années variable en fonction des conditions du milieu,

- Une augmentation de la capacité de stockage de l'eau dans le sol,

- Des rendements au moins équivalents à ceux du travail du sol conventionnel.

Chapitre II. Matériel et méthodes

1. Le site d'étude.

Le site expérimental se situe dans la station expérimentale de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) à Oued Smar. Cette station qui se situe sur un terrain alluvial relativement plat (pente <03%) est délimitée par (04) quatre points A, B, C et D (Figure 3) dont les coordonnées sont les suivantes :

A: Y = 36° 42.568'N, X = 3° 9.587'E ;

B: Y = 36° 42.361'N, X = 3° 10.028'E ;

C: Y = 36° 42.129'N, X = 3° 9.613'E ;

D: Y = 36° 42.412'N, X = 3° 9.417'E.



Figure 3. Localisation du site expérimental à extrait de l'image google earth 2014.

La pluviométrie moyenne annuelle pour la période 1990 – 2005 (tableau) est de l'ordre de 565,5 mm/an et la température moyenne de 17,6 C° (Tableau IV). Comparativement à ces données, la

campagne agricole 2006-2007 se caractérise par une pluviosité annuelle de l'ordre de 640,6 mm (tableau IV), soit un excédent pluviométrique de 75 mm.

Tableau IV. Pluviométrie et température enregistrées pendant la période de l'expérimentation (2006/2007).

Mois	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mar	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Cumul
Pluviométrie (mm) 1990/2005	26,63	48,91	88,03	81,74	85,37	63,76	44,71	62,58	42,23	6,77	3,53	11,29	565,5
Pluviométrie (mm) 2006/2007	26	14,5	21	218,3	13,6	67,7	175,4	70,6	16	5	2	10,5	640,6
Température °C 1990/2005	23,5	19,9	14,8	12	10,7	10,9	13,3	14,7	18,6	22,6	25,2	26,4	
Température °C 2006/2007	23..3	21.4	17.5	12.3	11	13.5	12.6	15.8	19.3	22.7	25.4	26.2	

Le diagramme ombrothermique (figure 4) indique que le climat de la région est caractérisé par une saison humide, allant de novembre à avril, suivie d'une saison sèche entre mai et octobre.

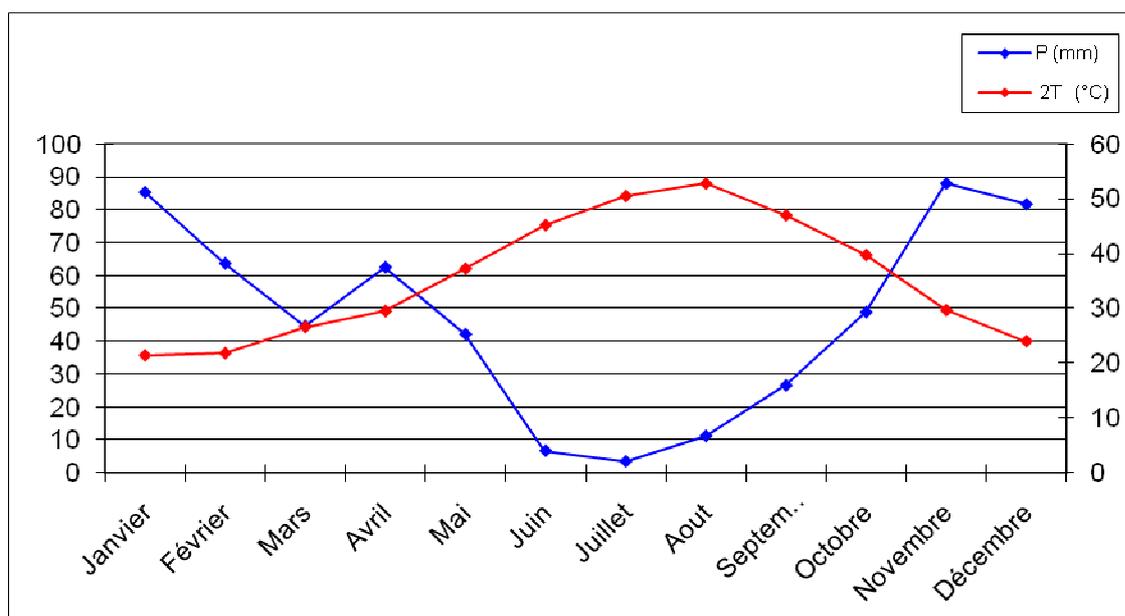


Figure4. Diagramme ombrothermique de Gaussen.

2. Matériel d'étude.

2.1. Le sol.

Selon l'étude Agropédologique de la Mitidja Est (Ecrèment, 1971), les sols de cette station appartiennent à la classe des sols peu évolués non climatiques d'apport alluvial vertiques

(C.P.C.S, 1967). Ce résultat est confirmé par la description morphologique d'un profil et les analyses de sols que nous avons réalisés sur le site expérimental.

2.1.1. Description pédologique de profil.

Données générales.

- Coordonnées géographiques : Longitude 03°9.573' Est ; latitude 36°42.319' Nord.
- Date de description: 17/08/2014
- Temps: ciel clair
- Topographie: terrain plat
- Charge caillouteuse : 2%
- Pente <2%

Description morphologique (photo1).

0-35cm ; sec, couleur 2.5 YR3/2, argilo- limoneuse, collant, peu compact, structure polyédrique subanguleuse, peu poreux, présence de quelque éléments grossiers de nature calcaire, fentes de retrait, nombreuses racines fines, bonne activité biologique, matière organique décelable, effervescence à HCl localisé sur les éléments grossiers. Transition nette et régulière.

35-80 cm ; sec, couleur 7.5 YR 4/2, texture argilo-limoneuse, structure grossière à massique, compact, présence de quelque éléments grossiers de nature calcaire, quelque racines fines, faible activité biologique, matière organique moyennement décelable, effervescence à HCl localisé sur les éléments grossiers.

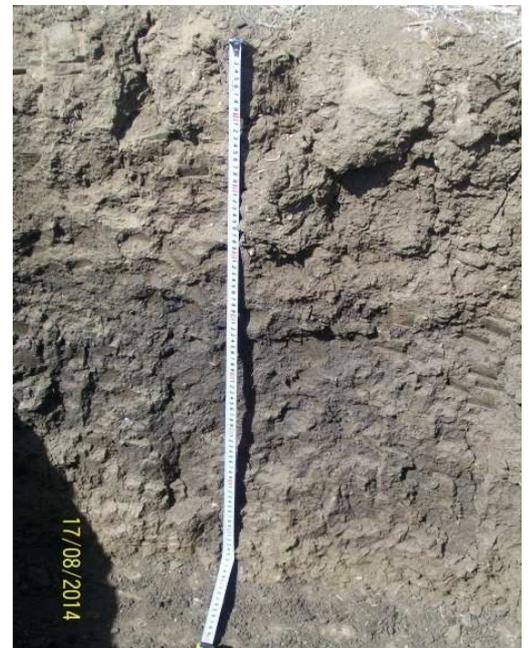


Photo1. Profil pédologique.

Résultats analytiques.

Les résultats des analyses physiques et chimiques de deux échantillons du sol sont présentés dans le tableau V. Le sol se caractérise surtout par une texture fine en surface (Clay loam), les valeurs de la CEC oscillent entre 15 et 18 C mole/Kg, la CEC est saturé en Calcium.

Ce sol est très peu de calcaire. Le pH est légèrement basique ($7,2 < \text{pH} < 7,8$) et la salinité est faible ($\text{CE}_{\text{pate saturé}} \approx 1 \text{ dS/m}$).

Tableau V. Résultats des analyses physiques et chimiques du profil pédologique.

Profondeurs (cm)	0-30	30-80
Argile %	39.5	31.8
Limon fin %	17.45	9.8
Limon grossier %	1.15	3.05
Sable fin %	31.20	29.95
Sable grossier %	10.7	25.40
Texture (USDA)	Clay loam	Sandy clay loam
pH	7,2	7,8
Conductivité électrique dm/m	0,8	0,85
Calcaire total %	1.1	1.3
Capacité d'échange cationique (Cmole/Kg)	18.57	15.32
Ca⁺⁺ (Cmole/Kg)	12.28	11.64
Mg⁺⁺ (Cmole/Kg)	4.35	2.14
Na⁺ (Cmole/Kg)	0.22	0.2
K⁺ (Cmole/Kg)	0.65	0.57

2.2. Le végétal.

Le végétal étudié est un blé dur de variété Chen's' originaire du Mexique. Il se caractérise par des épis blancs à roux pâle et par une hauteur de la plante à la maturité qui se situe entre 65 et 75 cm. Cette variété est adaptée aux zones de littoral, sublittoral et des plaines intérieures.

Ce blé est un précoce de tallage moyen à fort, il tolère au froid, il résiste à la verse et moyennement tolérant à la sécheresse.

3. Méthode d'étude.

3.1. Dispositif expérimental.

Le dispositif expérimental a été mis en place par l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) dans le cadre du projet «Agriculture de Conservation des sols» avec une rotation triennale en grande culture: blé/ bersim/ blé. La première année de l'expérience avait pour but de comparer les rendements et les composants du rendement du blé entre trois modes de

travail du sol. La deuxième année de l'expérience est consacrée à l'étude de l'impact des techniques du travail du sol sur les mauvaises herbes. La troisième année de la mise en place de ce dispositif expérimental fait l'objet de notre étude.

Il s'agit en fait d'étudier l'impact de trois techniques du travail du sol (Travail du sol conventionnel TC, Travail du sol superficiel TS et semis direct SD) sur les propriétés morphologique et analytiques (structure, densité apparente, rétentions en eau, la porosité et sa distribution, l'indice d'instabilité structurale, l'humidité du sol et la matière organique) et les composants du rendement du blé (le nombre de peuplement à la levée, l'hauteur des tiges au stade maturité, le nombre d'épis /m², le nombre de grains/épi, le nombre d'épillets / épi, le poids de mille grains et le rendement).

Le dispositif expérimental (figure 5) est constitué par quatre (04) blocs séparés l'un de l'autre par un espace de 2 mètres. Chaque bloc est subdivisé en (03) trois parcelles séparées l'une de l'autre par un espace de 1 mètre. De ce fait, chaque parcelle de chaque bloc est dédiée à une technique de travail du sol particulière distribuée d'une manière aléatoire. Au total, nous disposons d'un dispositif expérimental de type aléatoire à (01) un facteur et (04) quatre répétitions.

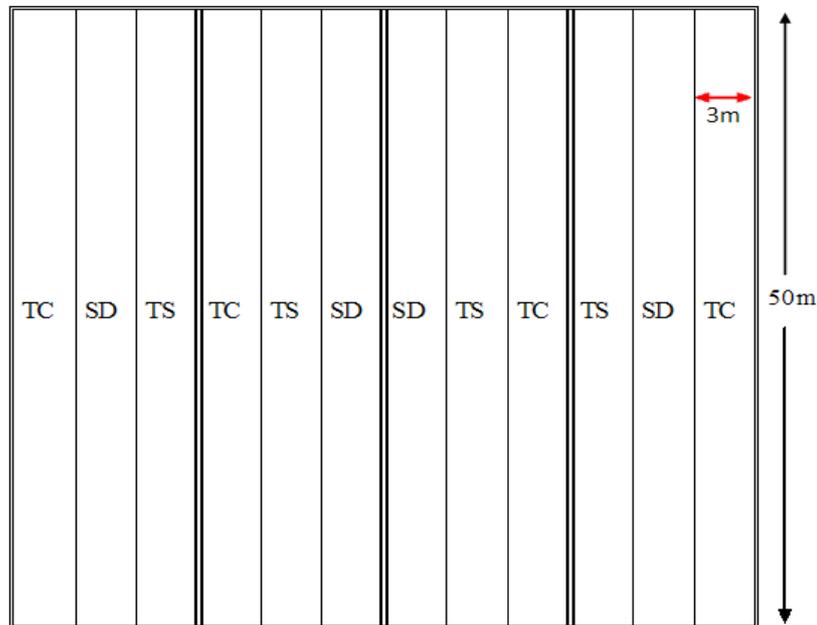


Figure 5. Schéma du dispositif expérimental

3.2. Les traitements sur le sol.

- **Travail du sol conventionnel (TC).**

Il commence par une opération de travail profond (30 cm) avec retournement du sol à l'aide d'une charrue à socs dès les premières pluies d'automne. Ce labour est suivi de plusieurs opérations de reprise avec un covercrop (10-20cm) et une herse rotative (5-7 cm de profondeur) puis d'un semis avec un semoir classique. Les caractéristiques techniques des outils utilisés sont indiquées en annexe.

- **Travail du sol superficiel (TS).**

Cette modalité est réalisée avec un outil à dents de type chisel à une profondeur de 20-25 cm. Elle est suivie par un passage de cultivateur (10-18cm) et de herse rotative (5-7cm) et se termine par un semis avec semoir classique. Les caractéristiques techniques des outils utilisés sont indiquées en annexe.

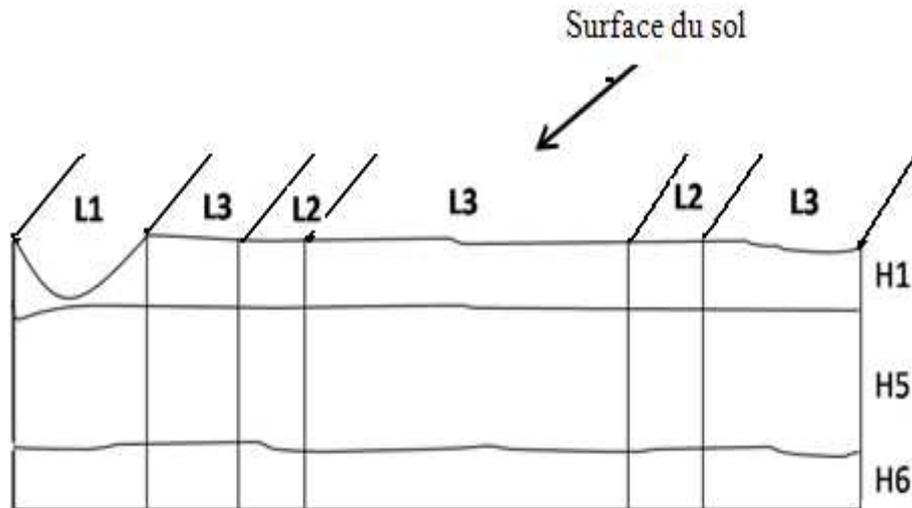
- **Semis direct (SD).**

Le semis direct est réalisé sur un mulch de la culture précédente (bersim) par un semoir de précision à 5cm de profondeur. Les caractéristiques techniques de ce semoir sont indiquées en annexe.

3.3. Etude des caractéristiques et des propriétés du sol.

3.3.1. Mode de description du profil cultural.

Après avoir creusé perpendiculairement au sens du travail du sol une fosse de 120 cm de largeur et de 40 cm de profondeur, nous délimitons les différentes stratifications (latérale et verticale) créées par les outils de travail du sol selon la méthode de Manichon, (1982) et qu'elle est détaillée par Gautronneau et Manichon, (1987).



Avec : **L1:** zones de passages de roues réalisées après la reprise de labour (visibles à la surface du sol) ; **L2:** zones de passages de roues issues des reprises de labour ; **L3:** zone non roulé depuis le labour.
H1: lit de semence ; **H5:** horizon labouré ; **H6:** ancien horizon labouré.

Figure 6. La caractérisation morphologique de la structure du sol.

La description de chaque compartiment est faite en se référant à l'état interne des éléments structuraux ou mottes et le mode d'assemblage qui est apprécié suivant des critères visuels et tactiles.

- **État interne des mottes :** les états internes des mottes définis selon l'effet des techniques de travail du sol.
 - **Γ:** état d'organisation des mottes provenant de l'agrégation de la terre fine sous l'effet des contraintes modérées et présentant une porosité importante.
 - **Δ:** état d'organisation où l'espace poral est nul et fortement affecté par l'action anthropique.
 - **Φ:** Proche de Δ, mais contient des amorces de fissures. Cet état structural résulte des effets climatiques (gel/dégel)
- **Mode d'assemblage des mottes :** trois états types sont déterminés :
 - **o:** la structure des mottes est fragmentaire (**F**), soudés facilement discernables (**SF**) et terre fine abondante (**tf**).

- **b:** la structure est massive (**M**) mais les éléments structuraux restent toutefois soudés facilement discernables (**SF**) et peu de terre fine.
- **c:** la structure massive (**M**) dont les éléments structuraux sont soudés difficilement discernables (**SD**) et pas de discontinuités structurales.

3.3.2. Modes de prélèvement des échantillons du sol.

Nous avons effectué deux modes de prélèvement du sol, un prélèvement au sein du profil cultural et un autre hors du profil cultural.

- L'échantillonnage au sein du profil cultural permet de relier l'organisation structurale du sol à ses propriétés physiques et hydriques. De ce fait, nous avons prélevé au sein des horizons de sol définis par la profondeur de travail des outils étudiés, des mottes de structures différentes sur lesquelles sont réalisées des mesures physiques (densité apparente, pF, porosité totale et sa distribution).

- L'échantillonnage au sein des parcelles est réalisé aux niveaux des couches du sol aux profondeurs 0-10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm. Cet échantillonnage a pour objectif le suivi de l'humidité du sol en période d'arrière cycle du blé (stade épiaison et remplissage des grains) et la détermination des taux de matière organique du sol et de l'indice d'instabilité structurale de la couche superficielle du sol.

3.4. Etude des composants du rendement du blé.

Afin d'expliquer les variations des propriétés du sol dues aux techniques de travail du sol, certaines composantes de rendement ont été notées: le nombre de pieds/m², le nombre d'épis/m², le nombre de grains/épis et le poids de 1000 grains. Le rendement est calculé selon la formule suivante:

$\text{Rendement (g/m}^2\text{)} = (\text{nombre d'épis/m}^2 \text{ * nombre de grains/épis * poids de 1000 grains}) / 1000.$

3.5. Les méthodes d'analyse au laboratoire.

Les analyses ont été effectuées au sein du département de Science du Sol de l'ENSA selon les méthodes indiquées dans le tableau VI.

Tableau VI. Méthodes d'analyses du sol

Analyses	Méthodes
Granulométrie	Internationale à la pipette de Robinson
Densité apparente	Au pétrole sur des agrégats centimétriques (2 à 3cm)
Densité réelle	Pycnomètre
pF	Appareil du Richard (1954) sur des agrégats centimétriques (2 à 3cm)
Stabilité structurale	Méthode Hénin 1956
Carbone organique	Walkey et Black (1934)

La porosité totale a été calculée selon la formule $Pt \% = (Dr - Da) / Dr * 100$ (**Pt** : porosité totale ; **Dr** : densité réelle ; **Da** : densité apparente).

L'application de différentes pressions sur les agrégats centimétriques au moyen de l'appareil de Richard (1954) permet la détermination des courbes caractéristiques d'humidité de chaque traitement. Les points retenus représentent différents états de l'eau dans le sol (Tableau VII).

Tableau VII. Signification agronomique de différents états de la rétention du sol en eau (Calembert, 1985).

pF	Signification agronomique
0	Saturation
1.6	Drainage rapide
1.9	Drainage lent
2.5	Bonne diffusion de l'eau
2.7	Capacité de rétention de sol
3.5	Humidité au point de flétrissement temporaire
4.2	Humidité au point de flétrissement permanent

Pour connaître la distribution de la taille des pores et leurs classements fonctionnels, on applique la loi de Jurin qui établit une relation entre l'énergie de rétention de l'eau et la taille des pores. La formule de base utilisée est la suivante : $H = (2 T \cos\theta) / (r \rho g)$

H : Pression appliquée en cm d'eau (hauteur d'ascension capillaire)

T : Tension superficielle de l'eau (75 dynes/cm à 20°C)

θ : Angle de raccordement eau/solide à 0°C, ce qui donne $\cos \theta = 1$ (eau mouillant parfaitement le matériel poreux)

r : Rayon de capillaire (cm)

p : Masse spécifique de l'eau = 1

g : Pesanteur (980 cm/s²)

Après substitution de ses constantes, elle prend une forme plus simple.

$$\Phi (\mu\text{m}) = 3060/H$$

Avec, **Φ** : Diamètre des pores (μm)

3.6. Le traitement des données.

Pour avoir une idée précise du degré de l'influence des outils de travail du sol sur les propriétés du sol et le rendement du blé, nous avons procédé à une analyse de variance (Test de Fisher) et un classement des moyennes en groupement homogènes (Test de Newman et Keuls) au seuil de 5% par le logiciel STATISTICA.

Chapitre III. Résultats et discussion.

1. Description des profils cultureux

La description du profil cultural repose sur un double partitionnement de la face à observer, une partition latérale (L) qui rend compte de l'effet des passages des roues et donc des contraintes locales de tassement, et une partition verticale qui met en évidence la succession des horizons anthropiques (H) plus ou moins importants selon l'itinéraire technique et le type d'outil utilisé (Manichon, 1982).

Cette description a pour objet, en premier lieu, de déterminer l'état structural du sol soumis à trois techniques de travail du sol (technique de travail du sol conventionnelle TC, technique de travail du sol superficielle TS et semis direct SD) et, en deuxième lieu, de délimiter les profondeurs de travail du sol.

1.1. Sol soumis au TC (photo 2)

Le profil cultural soumis au TC présente deux positions latérales, une position latérale L3 avec trois (03) horizons anthropiques (H1, H5 et H6) et une position latérale L1 avec un (01) horizon H5.

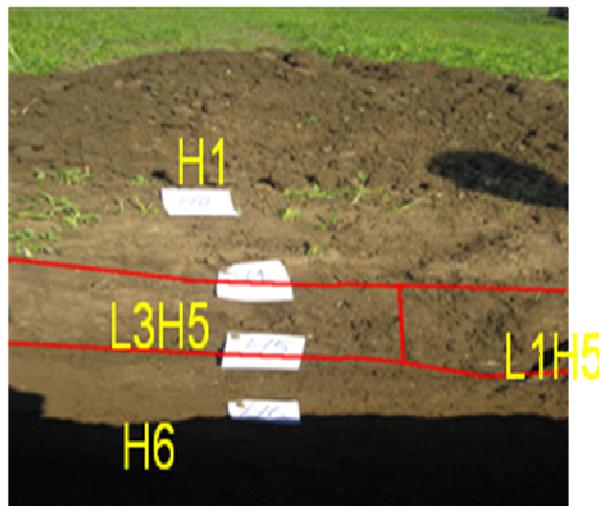


Photo 2. Horizons anthropiques du sol soumis au TC

La position latérale L3:

H1: 0-10 cm, frais, compact, structure polyédrique de taille 5-10 cm, porosité peu visible, éléments structuraux difficilement discernables, pas des taches d'hydromorphie, activité biologique bonne, matière organique en décomposition, racines de taille moyenne, saines, orientées obliquement entre les mottes, transition nette, irrégulière.

H5: 10-25 cm, frais, compact, structure polyédrique de taille >10cm, porosité peu visible, pas de trace d'hydromorphie, éléments structuraux facilement discernables, activité biologique moyenne, matière organique moyenne, racines de taille moyenne, saines, orientées verticalement et horizontalement entre les éléments structuraux, transition nette, irrégulière.

H6: 25-35 cm, frais, très compact, porosité peu visible, structure continue (massive), porosité non visible, faible activité biologique, pauvre en matière organique, racines de taille très fine orientées obliquement dans la masse de l'horizon.

La position latérale L1: elle est formée suite au passage des roues avant la reprise superficielle, cette partie présente un horizon anthropique H5. Ce dernier (H5) se caractérise par une structure massive, une porosité peu visible et par des racines très fines orientées obliquement.

Il ressort de cette description que le mode de préparation du sol conventionnel peut modifier l'état structural selon la succession des actions des outils de travail en 3 horizons anthropiques (H1, H5 et H6). En plus, l'horizon anthropique H5 résulte du retournement total de la bande du sol par la charrue et qui est non pas reprise. Il possède deux compartiments, le premier est un compartiment non compact (L3) qui se situe entre les roues du tracteur (compartiment L3H5) et l'autre est compact (L1H5) et il résulte de l'action des roues du tracteur lors du dernier ameublissement superficiel du sol. En effet, l'horizon labouré H5 se caractérise par une structure hétérogène. Le compartiment L3H5 présente une organisation structurale facilement discernable et une porosité faible de type Δ . L'autre compartiment (L1H5) présente une structure continue massive M et de porosité de type Δ .

L'horizon H1, qui est un lit de semence, se caractérise par des mottes difficilement discernables et une porosité faible de type Δ . Ces mottes résultent du retournement par la charrue à soc de la couche du sol compact puis à son fractionnement intense par le cover-crop et la herse rotative.

1.2. Sol soumis au TS (photo 3)

Le profil cultural présente une position latérale L3 avec trois (03) horizons anthropiques (H1, H5 et H6).

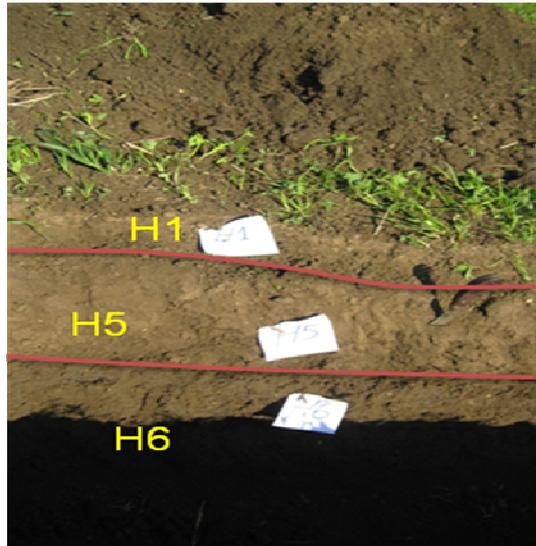


Photo 3. Horizons anthropiques du sol soumis au TS

H1: 0-8 cm, frais, meuble, structure subangulaire de taille 5 cm, poreux, bonne activité biologique, présence de quelques débris végétaux, racines de taille moyenne, saines et orientées verticalement, transition nette et irrégulière.

H5: 8-25 cm, sec, peu compact, structure polyédrique de taille 5-10 cm, éléments structuraux soudés et facilement discernables, forte porosité, activité biologique moyenne, faible taux en matière organique, racines de taille fine, saines, orientées verticalement, transition nette et irrégulière

H6: 25-35 cm, frais, compact, structure massive, porosité peu visible, faible activité biologique, pauvre en matière organique, racines de taille très fine, orientées obliquement dans la masse de l'horizon.

Il ressort de cette description que le profil en mode TS est constitué par de trois horizons anthropiques (H1, H5 et H6).

L'horizon H1 correspond au lit de semence. Les éléments structuraux sont fragmentés F et poreux Γ . L'origine de cette organisation est le retournement partiel de la bande du sol par le chisel et la fragmentation du sol par le cultivateur et la herse rotative.

Dans l'horizon H5, qui est un horizon labouré non repris par le cultivateur, les éléments structuraux sont soudés et facilement discernables SF avec une porosité de type Γ .

L'horizon H6, qui est la base de la couche du sol anciennement labourée, se caractérise par une structure massive M et par une faible porosité de type Δ .

1.3. Sol soumis au SD (photo 4)

En semis direct, le profil cultural présente une position latérale L3 avec trois (03) horizons anthropiques (H1, H5 et H6).

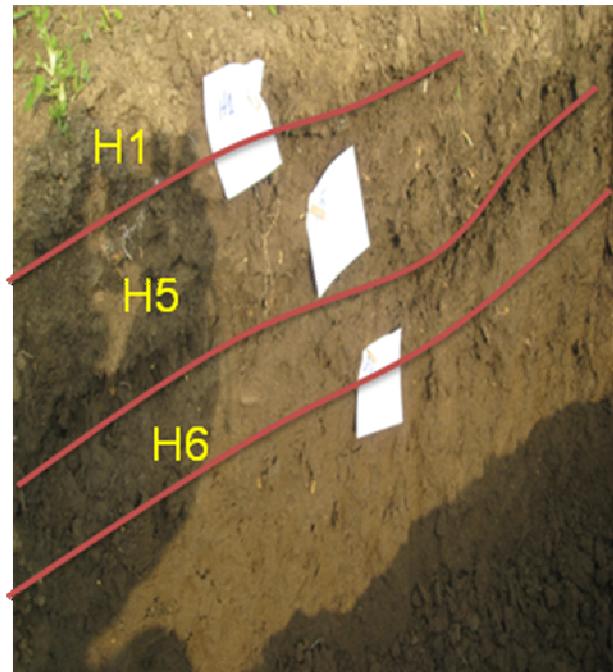


Photo 4. Horizons anthropiques du sol soumis au SD

H1: 0-10 cm, frais, meuble, abondance des débris des végétaux non décomposés, structure grumeleuse, les éléments structuraux sont facilement discernables, forte porosité, bonne activité biologique, racines de taille moyenne, saines, orientées verticalement dans l'horizon, transition nette, irrégulière.

H5: 10-20 cm, humide, compact, éléments structuraux difficilement discernables, bonne activité biologique, matière organique en décomposition, racines de taille moyenne, saines, orientées horizontalement et verticalement. Transition nette, irrégulière.

H6: 20-35 cm, frais, très compact, porosité peu visible, structure massive, faible activité biologique, pauvre en matière organique, racines de taille très fine, orientées obliquement dans la masse de l'horizon.

Le profil du sol soumis au SD se caractérise par trois horizons anthropiques (H1, H5 et H6).

L'horizon H1, qui correspond au lit de semence, se caractérise par une abondance de résidus de récolte, une organisation structurale facilement discernable SF et d'éléments structuraux poreux de type Γ .

Dans l'horizon H5, qui correspond à une ancienne couche labourée et qui est non travaillée depuis trois (03) années, les éléments structuraux sont soudés et difficilement discernables et la porosité est de type Δ .

L'horizon H6, base de l'horizon anciennement labouré, se caractérise par une structure massive M et par une faible porosité de type $-\Delta$.

1.4. Comparaison entre les techniques

Au terme de cette description, nous pouvons conclure que l'état structural est modifié par les actions des différents modes de préparation du sol.

Dans le sol soumis au TC, l'organisation structurale est modifiée, non seulement, d'un horizon à l'autre par la succession des outils de travail du sol (H1, H5 et H6) mais, elle est modifiée aussi au niveau du même horizon (H5) par la compaction des roues en deux compartiments (L3H5 et L1H5). En conséquence, l'organisation structurale est de type $O\Delta$ au niveau de l'horizon L3H5 et de type $C\Delta$ aux niveaux de H1, L1H5 et H6.

Dans le cas du mode TS, nous remarquons que l'effet de la succession des outils de travail est plus important que l'action des roues. Ceci est traduit par l'existence de trois horizons anthropique (H1, H5 et H6). L'organisation structurale aux niveaux de ces horizons est de type $O\Delta$ aux niveaux de H1 et H5 et elle est de type $C\Delta$ au niveau de l'horizon H6.

Dans le sol soumis au SD, nous observons qu'il n'y a pas d'effet des roues des engins sur la morphologie du sol et que l'organisation structurale est affectée seulement par l'accumulation des résidus de récolte qui n'ont pas été enfouis depuis les trois (03) années d'application de cette technique. En effet, l'organisation structurale est de type $O\Gamma$ au niveau de l'horizon de surface H1 et elle est de type $C\Delta$ aux niveaux des horizons H5 et H6.

Conclusion

De ce fait, nous pouvons dire que les différentes techniques de préparation du sol engendrent une hétérogénéité de l'état structural du sol. Dans le cas des modes de préparation du sol par TS et SD, cette hétérogénéité structurale varie verticalement en fonction de la succession des opérations du sol. Par contre, dans le cas du mode de préparation du sol TC, l'organisation structure est hétérogène verticalement et latéralement. Cette variation est due à l'action de succession des outils de travail du sol et aux passages des roues. Ces résultats sont similaires à ceux de Roger-Estrade et al (2004).

2. Densité apparente

La densité apparente est l'un des paramètres les plus évalués dans le cas des études de comparaison entre les techniques culturales. Elle constitue une propriété déterminante de la porosité et l'organisation structurale d'un sol cultivé.

2.1. Travail conventionnel TC.

La figure 6 montre que le TC favorise l'ameublissement de l'horizon H5 dans le compartiment L3H5 ($d_a = 1,4$) et à un moindre degré l'horizon de surface H1 ($d_a = 1,46$), l'horizon de profondeur H6 reste relativement tassé ($d_a = 1,5$). Cependant, cette technique provoque relativement un fort tassement de l'horizon H5 aux endroits (L1H5) des passages des roues du matériel agricole ($d_a = 1,56$).

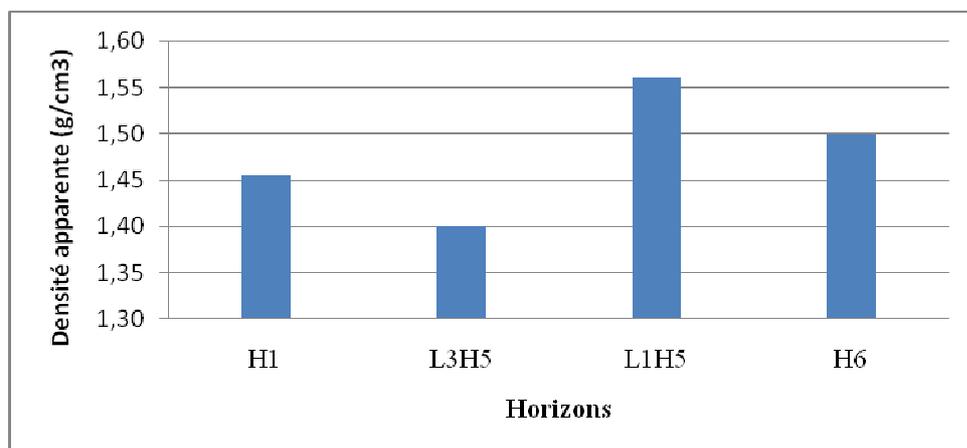


Figure 7. Densité apparente du sol soumis au TC

Ce résultat montre que le TC agit différemment sur la D_a des différents horizons. L'analyse de la variance et le test de l'homogénéité de Neuwman-Keuls confirment ce résultat et montrent que TC a un effet hautement significatif sur la densité apparente et classe les horizons du sol en quatre groupes homogènes L3H5, H1, H6, L1H5 (tableau VIII).

Tableau VIII. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de la densité apparente du sol soumis au TC.

Horizons	Densité apparente (g/cm ³)
H 1	1,46
L3H 5	1,40
L1H5	1,56
H6	1,5
probabilité	< 0,001
Signification	HS
Groupes homogènes	L3H5, H1, H6, L1H5

Il ressort de ces résultats que la densité apparente dans le sol soumis au TC varie d'un horizon à l'autre et qu'elle varie aussi dans un même horizon. Cette variation est provoquée par l'action des outils mais aussi par l'effet des passages répétés des roues qui tassent le sol. Ces résultats sont analogues à ceux obtenus par Curmi, (1988), Kay et Vanden Bygaart, (2002), Boizard et al., (2004), Roger-Estrade et al., (2004) et Bescansa et al., (2006).

2.2. Travail superficiel TS.

La figure 7 montre que TS affecte différemment D_a des différents horizons. Ainsi, il ressort que la plus faible D_a se situe au niveau de l'horizon H5 ($D_a = 1,41$), suivie par celle de l'horizon H1 ($D_a = 1,45$) et par celle de l'horizon de profondeur H6 ($D_a = 1,53$). Ce résultat signifie que TS affecte particulièrement les deux horizons superficielles.

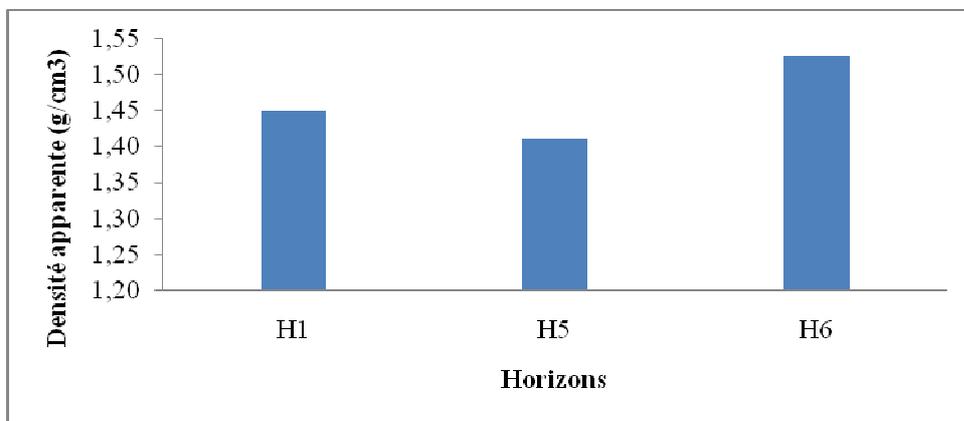


Figure 8. Densité apparente du sol soumis au TS.

Cependant, les statistiques (tableau IX) indiquent que malgré ces différences, le TS classe les différents horizons en deux groupes homogènes, le groupe représenté par H6 et le groupe constitué par H1 et H5. La différence entre ces deux groupes est hautement significative ($p < 0,001$).

Tableau IX. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de la densité apparente du sol soumis au TS.

Horizons	Densité apparente (g/cm³)
H 1	1,45
H 5	1,41
H6	1,53
probabilité	$< 0,001$
signification	HS
Groupes homogènes	H5-H1, H6

2.3. Semis direct SD.

La figure 8 montre que le SD favorise l'ameublissement des horizons de surface H1 ($D_a=1,39$) par rapport aux horizons de subsurface H5 ($D_a=1,46$) et de profondeur H6 ($D_a=1,50$).

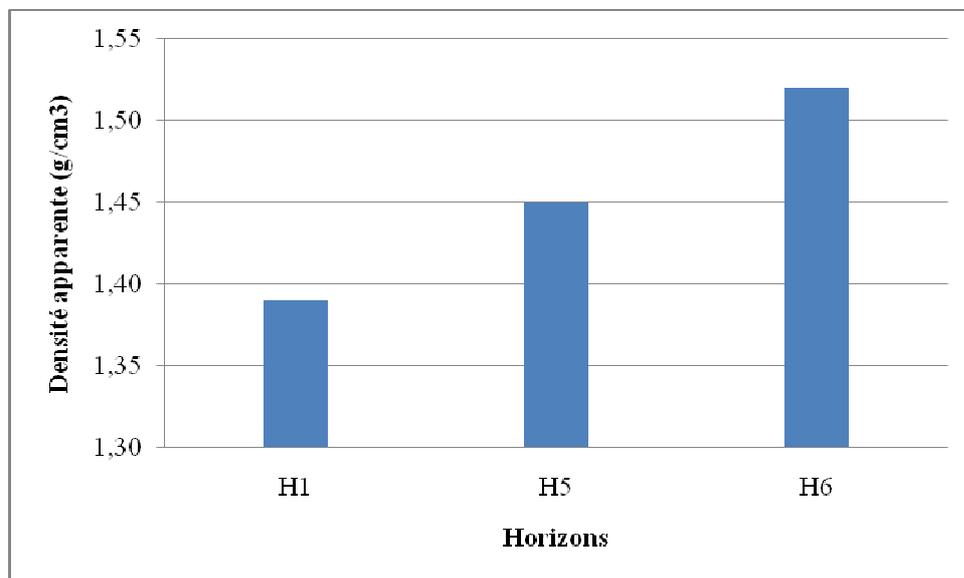


Figure 9. Densité apparente du sol soumis au SD

Ce résultat signifie que SD agit différemment sur D_a des différents horizons du sol. Il est confirmé par les statistiques (tableau X). Le tableau X révèle que SD a un effet hautement significatif sur ce paramètre et classent les trois horizons en trois groupes homogènes différents (H1, H5, H6).

Tableau X. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de la densité apparente du sol soumis au SD.

Horizons	Densité apparente (g/cm³)
H 1	1,39
H 5	1,46
H6	1,50
probabilité	< 0,001
Signification	HS
Groupes homogènes	H1, H5, H6

De ce fait, il s'avère que la D_a des horizons anthropiques soumis au SD est fortement influencée par cette technique comme le stipulent Bescansa et al., (2006). L'accumulation

des résidus de récoltes en surface favorisé par le non travail du sol en SD contribue également à la diminution de Da de la couche superficielle.

2.4. Comparaison entre les techniques.

Les résultats sont présentés dans le tableau XI et sur la figure 9.

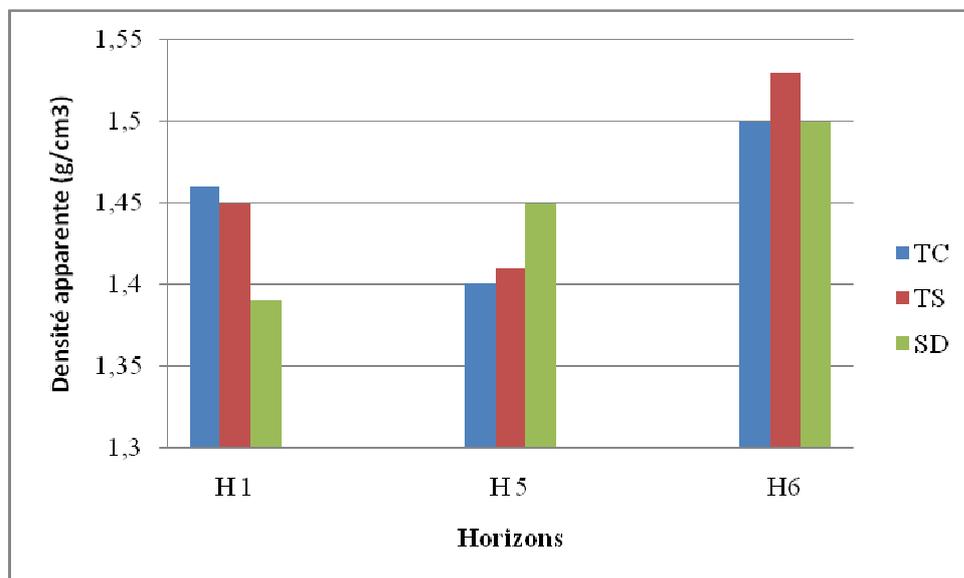


Figure 10. Densité apparente du sol soumis selon TC, TS et SD.

La figure 9 révèle que la densité apparente du sol est comprise entre 1,39 et 1,53g/cm³. Ainsi, il ressort que la différence de la densité apparente entre les trois techniques de travail du sol est remarquable aux niveaux de deux horizons de surface (H1 et H5).

Tableau XI. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de la densité apparente du sol soumis selon TC, TS et SD.

	TC	SD	TS	Probabilité	Signification	Groupes homogènes
H 1	1,46	1,39	1,45	<0,001	HS	SD, TS, TC
H 5	1,40	1,45	1,41	<0,001	HS	TC-TS, SD
H6	1,5	1,5	1,53	0,91	NS	/

L'analyse du tableau XI suggère les remarques suivantes:

- L'horizon H1: Les résultats regroupent les trois techniques de travail du sol en trois groupes homogènes et la différence entre les groupes est statistiquement très hautement significatives ($p < 0,001$). Ce résultat indique que, l'effet de SD sur Da de cet horizon est particulièrement remarquable ($D_a = 1,39$) par rapport à celui des deux autres techniques. Ce résultat signifie que SD favorise la diminution de Da par rapport aux deux autres techniques.

- L'horizon H5: Dans cette couche, les trois techniques sont également regroupées en deux groupes homogènes, un groupe représenté par la paire TS-TC et un autre par SD. De même, la différence entre ces deux groupes est statistiquement très hautement significative ($p < 0,001$). Ici aussi, nous pouvons dire que TS et TC ont pratiquement le même effet sur Da ($1,40 < Da < 1,41$). Par contre, l'effet de SD se traduit par une Da plus grande ($Da = 1,45$) que celle des deux autres techniques. De ce fait, nous pouvons conclure que SD est moins favorable à la diminution de Da dans cet horizon du sol que TS et TC.

- L'horizon H6: Les statistiques révèlent que les trois techniques utilisées n'ont pas d'effets particuliers sur la variation de Da ($1,50 < Da < 1,53$).

Conclusion

En conclusion, nous pouvons dire qu'il y a une similitude de comportement entre TS et TC. En effet, les effets de ces deux techniques sur la Da sont comparables quel que soit la couche de sol considérée. Par contre, le SD favorise, par rapport à TS et TC, la diminution de Da en H1 et son augmentation en H5. En fin, les trois techniques utilisées ne semblent avoir d'effets particuliers sur la variation de Da en H6. Les résultats obtenus sont similaires à ceux de Pelegrin et al., (1990) et Richard, (2001) in Tourdonnet et al., (2007).

3. Rétention du sol en eau.

L'eau dans le sol peut être caractérisée par sa teneur et/ou par sa disponibilité. Elle se répartit approximativement en eau fortement liée, immobile et non utilisable par les plantes et en eau faiblement retenue sous l'effet des forces capillaires utilisable par la plante.

La rétention du sol en eau sera caractérisée à différents pF.

3.1. Travail conventionnel TC.

La figure 10 montre que les courbes de rétention en eau présentent toutes une allure approximativement similaire sauf pour la courbe L1H5 qui se distingue entre les pF 1,6 et 2,5 par des taux d'humidité relativement plus forts. Cependant, malgré cette écart, les étendues entre les taux d'humidité les plus faibles et les plus forts d'un même pF sont très faibles (tableau XIII). En effet, ces étendues oscillent entre 0,3% pour le pF 4,2 et 4% pour le pF 0. Ce résultat signifie que les capacités de rétention d'eau des 4 couches sont approximativement les mêmes et que TC n'a eu qu'un faible impact sur elles.

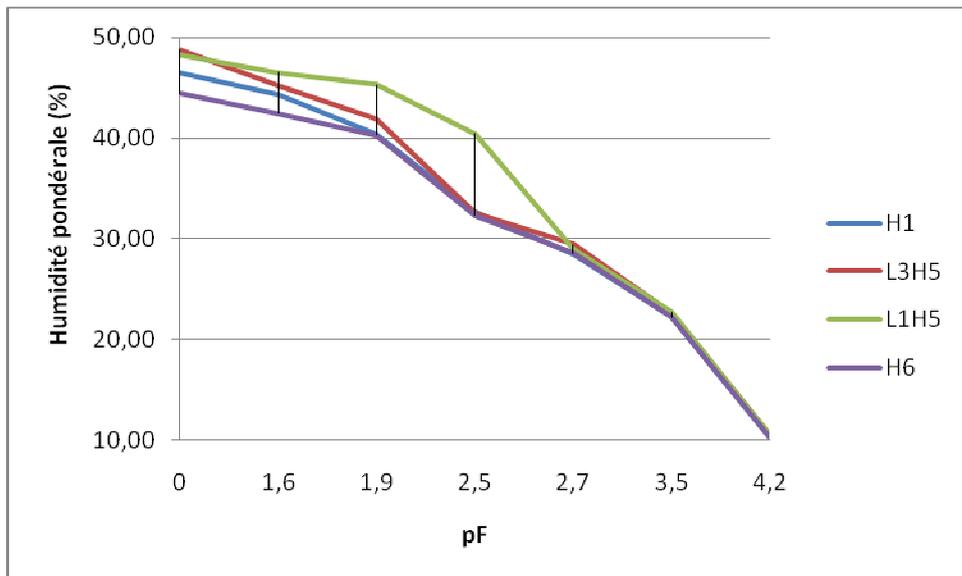


Figure 11. Courbes de rétention en eau du sol soumis au TC.

En revanche, l'analyse des données révèle que la différence de la rétention en eau du sol pour un pF donné peut être significative entre les horizons considérés. En effet, le test d'homogénéité de Newman et Keuls (tableau XII) regroupe les horizons anthropiques en différentes classes homogènes. Ainsi, le tableau XII révèle quatre types de classement en fonction des pF:

- Au faible pF ($0 \leq pF \leq 1,6$), quand tous les pores sont remplis d'eau et donc à saturation ou quand nous sommes proches de la saturation, les taux d'humidité se subdivisent en trois classes correspondant aux trois couches du sol (H5, H1 et H6). Il y a lieu de remarquer ici que le passage des roues n'a pas particulièrement affecté le taux d'humidité de H5 à ce pF.
- Au point de flétrissement (pF 4,2), il n'y a pas de différences entre horizons. Ceci signifie que les quatre compartiments du sol sont dotés du même volume porale (microporosité).
- Pour les pF qui se situent juste au-dessous de la capacité au champ ($1,9 \leq pF \leq 2,5$), la couche L1H5 constitue une classe à part entière. La couche L3H5 peut constituer une classe homogène, mais elle peut s'associer avec H6 et H1. A ce niveau, nous trouvons trois classes d'humidité homogènes. C'est la seule classe de pF où le passage des roues semble avoir affecté la porosité du sol de la couche H5.
- Pour les pF qui se situent juste au-dessus de la capacité au champ ($2,7 \leq pF \leq 3,5$), nous ne retrouvons que deux classes d'humidité, une classe représentée par la couche H5 et une autre par le couple H1-H6.

Tableau XII. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de la rétention en eau du sol soumis au TC.

Horizons	pF0	pF1.6	pF1.9	pF2.5	pF2.7	pF3.5	pF4.2
H1	46,49	44,33	40,41	32,67	28,51	22,24	10,34
L3H5	48,81	45,24	41,88	32,58	29,46	22,70	10,65
L1H5	48,25	46,48	45,28	40,43	29,02	22,72	10,65
H6	44,38	42,42	40,29	32,28	28,60	22,29	10,28
probabilité	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,49	0,002	0,25
signification	HS	HS	HS	HS	NS	HS	NS
Groupes homogènes	H6 H1 L1H5-L3H5	H6-H1 H1 L3H5 L1H5	H6-H1 L3H5 L1H5	H6-L3H5-H1 L1H5	/	H1-H6 L3H5-L1H5	/

3.2. Travail superficiel TS.

La figure 11 montre que les courbes de rétention en eau ont toutes une allure similaire sauf aux faibles potentiels où on remarque de légères différences de teneurs en eau qui se situent autour de 4%. En effet, ces différences oscillent entre 0,3 % pour les forts potentiels et 4,3% pour les faibles potentiels. Ce résultat suggère qu'à un pF donné, les trois couches du sol retiennent approximativement la même quantité d'eau et que TS n'a eu qu'un faible impact sur elles, surtout aux forts potentiels.

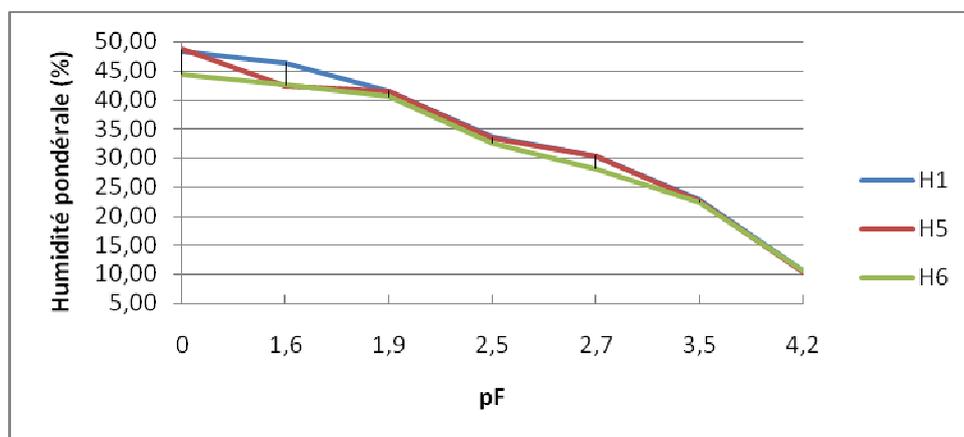


Figure 12. Courbes de rétention en eau du sol soumis au TS.

Cependant, malgré ces faibles différences, le test d'homogénéité de Newman et Keuls (tableau XIII) regroupe les horizons anthropiques en différentes classes homogènes.

- Quand le sol est frais ou humide ($pF \leq 2,7$), les taux d'humidité se subdivisent principalement en deux classes, l'une représentée par H6 et l'autre par le couple H1-H5 avec des différences statistiquement significatives entre ces groupes d'horizons. Cependant, les résultats montrent qu'au pF 1,6, le H5 s'associe avec le H6 pour former un groupe homogène.
- Quand le sol est sec ($pF \geq 3,5$), les trois couches du sol ont le même comportement vis-à-vis de la rétention d'eau.

Tableau XIII. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de la rétention en eau du sol soumis au TS.

Horizons	pF0	pF1.6	pF1.9	pF2.5	pF2.7	pF3.5	pF4.2
H1	48,21	46,32	41,53	33,48	30,34	22,75	10,59
H5	48,69	42,36	41,44	33,36	30,37	22,55	10,24
H6	44,35	42,53	40,56	32,52	28,08	22,41	10,40
probabilité	<0,001	<0,001	0,018	0,019	<0,001	0,33	0,30
signification	HS	HS	S	S	HS	NS	NS
Groupes homogènes	H6 H1-H5	H5-H6 H1	H6 H5-H1	H6 H5-H1	H6 H1-H5	/	/

3.3. Semis direct SD.

Comme pour les autres techniques de travail du sol, les courbes de rétentions d'eau à différents pF des sols soumis au SD sont approximativement similaires comme illustré par la figure 12. En effet, le tableau XIV indique que les écarts des taux d'humidité entre les couches ne dépassent guère le seuil de 6% aux faibles potentiels et ils sont inférieurs à 1% aux forts potentiels. Ce résultat suggère que SD ne favorise pas la rétention en eau dans un horizon par rapport à un autre.

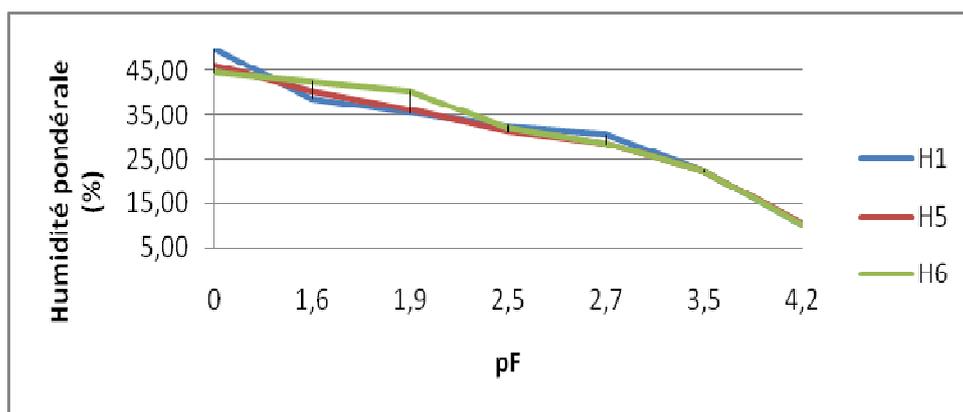


Figure 13. Courbes de rétention en eau du sol soumis au SD.

Cependant, malgré ces faibles différences entre les couches, le test de Newman et Keuls les regroupe en différentes classes homogènes selon le pF considéré (tableau XIV).

- Quand le sol est humide à saturé ($0 \leq pF \leq 1,9$), les différences des taux d'humidité oscillent entre 4% et 5,6%. Ces écarts, malgré qu'ils soient faibles, sont suffisants pour classer statistiquement les trois couches de sols en trois groupes homogènes (H1, H5, H6).
- Quand le sol est frais ou à la capacité au champ ($2,5 \leq pF \leq 2,7$), les écarts ne dépassent guère le seuil de 2%. Ici aussi, malgré cette faible différence de rétention d'eau, les statistiques subdivisent les couches en deux groupes homogènes, H6-H1 et H5 pour le pF 2,5 et H6-H5 et H1 pour le pF 2,7.
- Quand le sol est sec ($pF > 3,5$), la différence de rétention d'eau devient négligeable et les statistiques classent les trois couches dans un même groupe homogène.

Tableau XIV. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de la rétention en eau du sol soumis au SD.

Horizons	pF0	pF1.6	pF1.9	pF2.5	pF2.7	pF3.5	pF4.2
H1	49,92	38,65	35,36	32,48	30,53	22,29	10,40
H5	46,25	40,47	36,33	31,35	28,57	22,35	10,47
H6	44,37	42,49	40,44	32,14	28,44	22,51	10,35
probabilité	<0,001	<0,001	<0,001	0,017	<0,001	0,37	0,91
signification	HS	HS	HS	S	HS	NS	NS
Groupes homogènes	H6 H5 H1	H1 H5 H6	H1 H5 H6	H6-H1 H5	H6-H5 H1	/	/

Ces résultats suggèrent que l'impact des modes de travail du sol sur la rétention en eau par les différentes couches du sol soumises à différents potentiels ne concerne que la gamme de pF inférieure à 2,7. Aux forts potentiels, les trois couches du sol ont le même comportement quelle que soit la technique de travail du sol utilisée. Ce résultat signifierait que le volume porale constitué par les pores les plus fins du sol n'est pas affecté par le travail du sol.

3.4. Comparaison entre les techniques.

Pour comparer les effets des trois modes de travail du sol sur la rétention d'eau à différents pF, nous présentons les résultats couche par couche du sol.

❖ La couche H1: La figure 13 montre que les trois courbes de rétention d'eau ont la même allure et semblent se superposer à partir du pF 2,5. En effet, dans cette gamme de pF, l'écart maximal des taux d'humidité entre les trois modes de travail du sol est de 1% uniquement. Entre la capacité au champ et la zone de pré-saturation, TS et TC retiennent mieux l'eau que SD avec des écarts qui peuvent atteindre les 5% d'humidité. Toutefois, à saturation, les trois courbes ont tendance à se rapprocher l'une de l'autre avec une légère prédominance de SD sur TS et TC. A ce niveau, les écarts ne sont que de l'ordre de 3,4%.

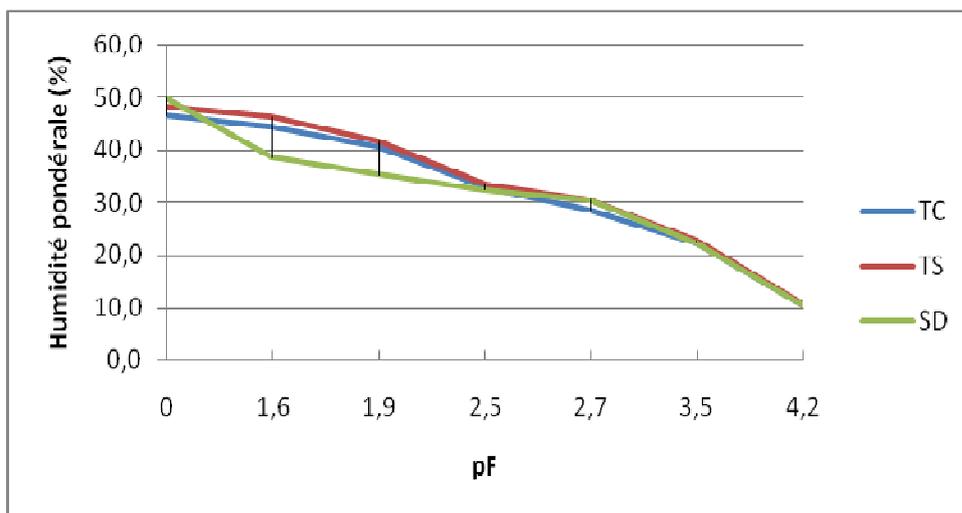


Figure 14. Courbes de rétention en eau du sol soumis selon TC, TS et SD au niveau H1.

Cependant, malgré ces faibles écarts, les statistiques (tableau XV) révèlent des différences significatives et classent les différents modes de travail du sol en groupes homogènes en fonction du pF considéré. Ces résultats suggèrent que:

- A saturation, la porosité totale est favorisée dans le sens SD > TS > TC avec des effets significatifs sur l'espace porale.
- A présaturation ($1,6 \leq pF \leq 1,9$), TC et TS se comportent de la même façon et semblent favoriser la rétention d'eau par rapport à SD.
- A la capacité au champ et quand le sol est frais, TS a un effet meilleure sur la rétention d'eau que SD et TC.

- Quand le sol est sec, les trois modes de travail du sol se retrouvent dans un même groupe homogène. Ceci signifie que les capillaires les plus fins ne sont pas affectés par le type de travail du sol.

Tableau XV. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de la rétention en eau du sol entre les trois traitements au niveau de l'horizon H1.

Horizons	pF0	pF1.6	pF1.9	pF2.5	pF2.7	pF3.5	pF4.2
TC	46,49	44,33	40,41	32,67	28,51	22,24	10,34
TS	48,21	46,32	41,53	33,48	30,34	22,75	10,59
SD	49,92	38,65	35,36	32,48	30,53	22,29	10,40
probabilité	<0,001	<0,001	<0,001	0,003	<0,001	0,022	0,43
signification	HS	HS	HS	S	HS	S	NS
Groupes homogènes	TC TS SD	SD TC-TS	SD TC-TS	SD-TC TS	TC TS-SD	TC-SD TS	/

❖ La couche H5: En fonction du pF choisi, les écarts d'humidité varient entre moins de 1% à environ 5% comme indiqué dans le tableau XVI. Ce résultat est bien traduit par la figure 14 qui montre que les courbes se superposent aux forts pF et qu'elles se différencient légèrement quand le sol s'humidifie.

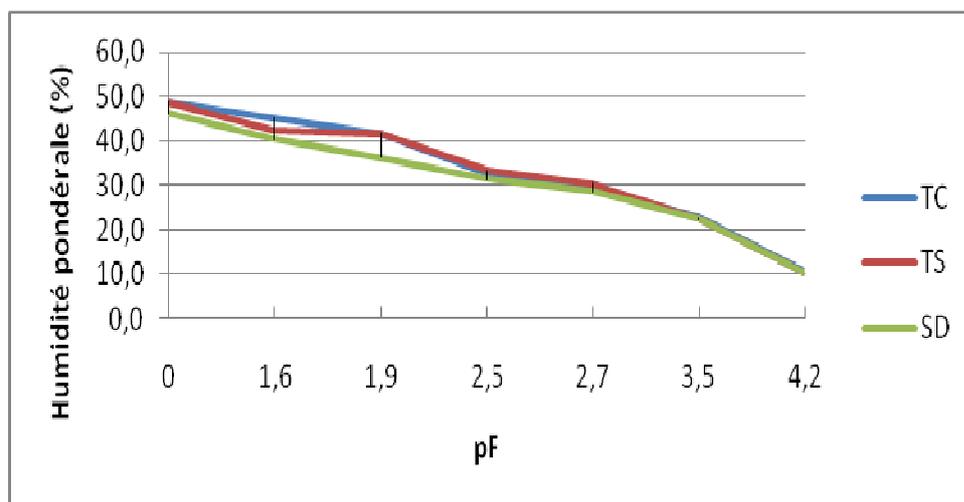


Figure 15. Courbes de rétention en eau du sol soumis selon TC, TS et SD au niveau H5.

Les statistiques (tableau XVI) suggèrent que ces courbes peuvent être subdivisées en trois catégories en fonction de l'humidité du sol, le sol sec et le sol frais à humide et le sol très humide à saturé.

- Quand le sol est sec ($pF \geq 3,5$), les trois modes de travail du sol sont classées dans le même groupe. Ceci signifie qu'à ces pF, la couche H5 retient la même quantité d'eau quelle que soit la technique de travail du sol utilisée.

- Quand le sol est frais à humide ($2,5 < pF < 2,7$), les trois modes de travail du sol sont classés dans trois groupes homogènes dans l'ordre décroissant $TS > TC > SD$, TS étant le mode de travail du sol le plus favorable à la rétention d'eau dans le sol.

- Quand le sol est humide à saturé ($pF < 2,5$), les trois modes de travail du sol sont classés en deux ou trois groupes homogènes en fonction du pF considéré. TC qui est parfois regroupé avec TS constitue le mode le plus favorable à la rétention de l'eau. En revanche, dans tous les cas, SD se place comme la technique la moins favorable.

Tableau XVI. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de la rétention en eau du sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de l'horizon H5.

Horizons	pF0	pF1.6	pF1.9	pF2.5	pF2.7	pF3.5	pF4.2
TC	48,81	45,24	41,88	32,58	29,46	22,70	10,65
TS	48,69	42,36	41,44	33,36	30,37	22,55	10,24
SD	46,25	40,47	36,33	31,35	28,57	22,35	10,47
probabilité	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,24	0,33
signification	HS	HS	HS	HS	HS	NS	NS
Groupes homogènes	TC-TS SD	TC TS SD	TC-TS SD	TS TC SD	TS TC SD	/	/

❖ La couche H6: Le tableau XVII révèle que les écarts d'humidité entre les trois modes de travail du sol sont tous inférieurs à 1% et ce quel que soit le pF considéré. Ce résultat est bien traduit par la figure 15 qui montre que les trois courbes se chevauchent.

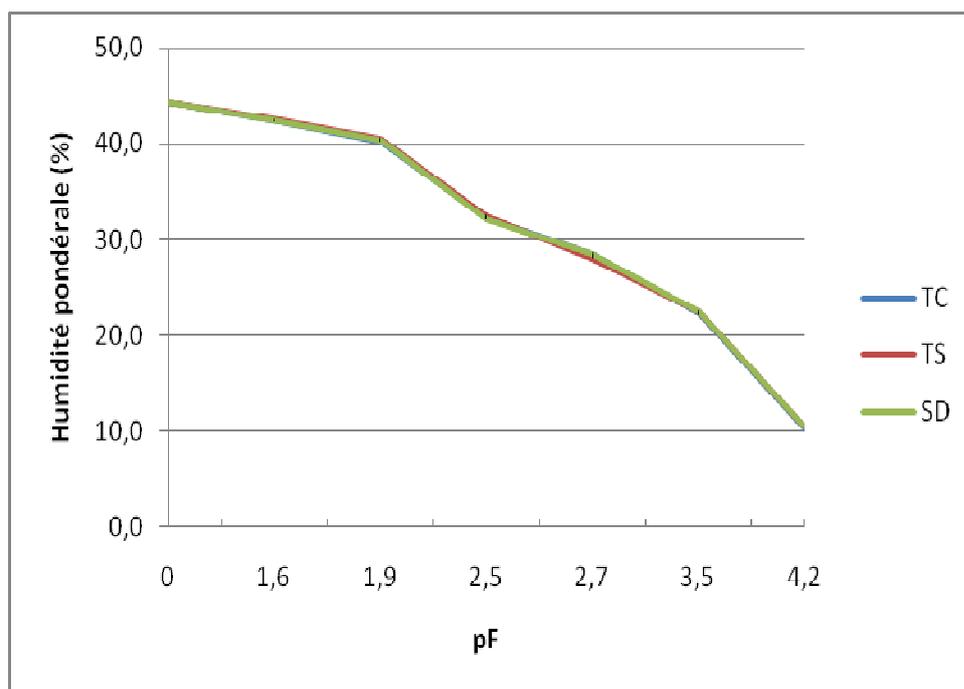


Figure 16. Courbes de rétention en eau du sol soumis selon TC, TS et SD au niveau H6.

Les statistiques confirment ce résultat et indiquent que les trois modes de travail du sol appartiennent à un même groupe homogène. Ce résultat signifie que, quelle que soit la technique utilisée, la rétention d'eau par H6 reste la même

Tableau XVII. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de la rétention en eau du sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de l'horizon H6.

Horizons	pF0	pF1.6	pF1.9	pF2.5	pF2.7	pF3.5	pF4.2
TC	44,38	42,42	40,29	32,28	28,60	22,29	10,28
TS	44,35	42,53	40,56	32,52	28,08	22,41	10,40
SD	44,37	42,49	40,44	32,14	28,44	22,51	10,35
probabilité	0,98	0,73	0,22	0,45	0,02	0,18	0,92
signification	NS						
Groupes homogènes	/	/	/	/	/	/	/

Conclusion

Il ressort de cette étude que l'impact de différentes techniques de travail du sol sur la rétention en eau est remarquable seulement pour les taux d'humidités à la saturation, la pré-saturation et à la capacité au champ ($0 \leq pF \leq 2,7$) correspondant, respectivement, de l'eau de gravité (non utilisable par les plantes) et en eau faiblement retenue (utilisable par les plantes) sous l'effet des forces capillaires. Ces résultats sont analogues aux résultats de Curmi, (1988).

Nous concluons que le non travail du sol en SD offre une accumulation des résidus de récolte en surface, cette couche de résidus conduit à une amélioration de la rétention du sol en eau. En effet, elle permet d'obtenir une meilleure saturation en eau, un bon drainage et augmente la capacité du sol à la rétention en eau. Ces avantages sont perdus au niveau de l'horizon H5 devant les autres techniques de travail du sol (TC et TS).

4. La porosité et sa distribution

D'une manière générale, le système porale peut être caractérisé par la porosité totale, par sa distribution en fonction de l'importance hydrique et par la dimension des pores (diamètre équivalent des pores).

La porosité du sol peut être subdivisée en trois catégories dont les dimensions varient d'un auteur à l'autre selon le type de sol. Dans notre cas, nous utilisons la classification qui correspond au fonctionnement hydrique du sol (Van oort, 1984 in Ould Ferroukh, 1994).

- **La macroporosité:** caractérise les pores les plus gros (diamètre $> 9,7 \mu\text{m}$), elle résulte de l'activité biologique, du gonflement-retrait interne du sol et de l'outil de travail du sol. Elle correspond aux pores responsables du drainage. Elle est dénommée porosité structurale.

- **La mésoporosité:** elle représente les pores moyens (diamètre $6,1$ à $9,7 \mu\text{m}$). C'est dans cette porosité que l'eau est retenue plus ou moins fortement par le sol (eau facilement mobilisable).

- **La microporosité:** il s'agit de pores de diamètre $< 6,1 \mu\text{m}$. Nous pouvons les comparer par analogie à la porosité texturale. Ils retiennent l'essentiel de l'eau fortement liée et jouent un rôle important dans la réserve en eau utilisable par la plante.

Les différentes classes de la porosité sont exprimées en pourcentage de la porosité totale.

4.1. Travail conventionnel TC.

La figure 16 montre que la microporosité occupe environ 50% de la porosité totale et ceux quel que soit l'horizon considéré (48 % $<$ microporosité $<$ 53%). De même, cette figure montre aussi que, hormis l'horizon L1H5, la distribution de la mésoporosité et de la microporosité est relativement homogène dans le profil. En effet, ces deux paramètres varient entre 35 et 42% pour la macroporosité et entre 8 et 11% pour la macroporosité. Au niveau de ces trois horizons, la distribution de la porosité est toujours dans le sens Microporosité%

>Macroporosité%> Microporosité%. En revanche, au niveau de l'horizon L1H5 qui correspond aux passages des roues, la distribution de la porosité est dans le sens Microporosité (49%) > Mésoporosité (30%) > Macroporosité (20%). Ce résultat signifie que le tassement du sol du aux passages des roues a affecté particulièrement la macroporosité qui est passée de 42% en L3H5 à 20% en L1H5 au profit de la mésoporosité qui est passée de 8% en L3H5 à 30% en L1H5. En revanche, la microporosité est restée constante. Ce résultat signifie que le tassement du sol du aux passages des roues modifie la macroporosité au profit de la microporosité uniquement dans l'horizon de subsurface L1H5.

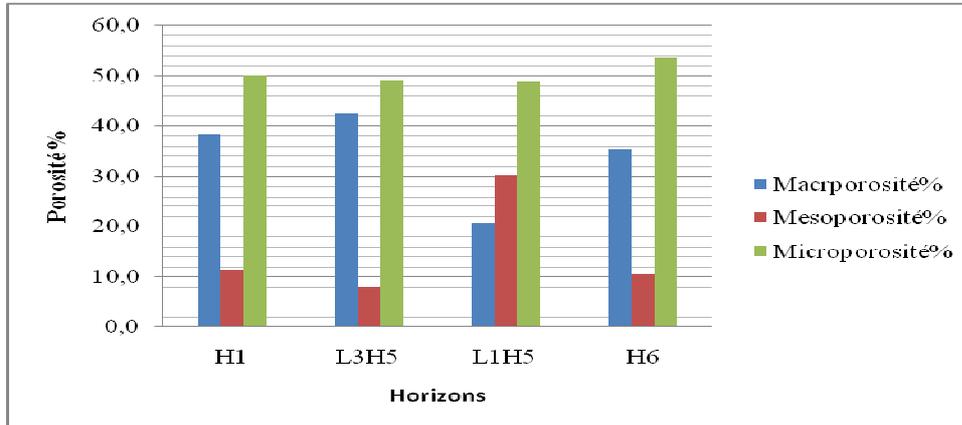


Figure 17. Distribution de la porosité dans le sol soumis au TC

Le test d'homogénéité de Newman et Keuls (tableau XVIII) regroupe les différents horizons en différentes classes selon la porosité considérée:

- La porosité totale: La porosité totale varie dans un intervalle compris entre 41% et 47%, soit une étendue maximale d'environ 6%, l'étendue minimale n'étant que de 2%. Malgré ces faibles étendues, chaque horizon est classé dans un groupe homogène à part. Ce résultat signifie uniquement que le TC a provoqué une modification statistiquement significative de la porosité totale au niveau de l'horizon H5. Dans les faits, TC a provoqué une chute de 6% de la porosité totale qui est passée de 47% en L3H5 à 41% en L1H5.

- La macroporosité: La macroporosité varie dans un intervalle compris entre 20% et 42%, avec une étendue maximale d'environ 12% et une étendue minimale de 3%. Les statistiques ont regroupé les horizons en trois groupes homogènes, le premier groupe est représenté par le couple H6-H1, le deuxième par L1H5 et le troisième par L3H5. Ce résultat signifie que TC a subdivisé la macroporosité de H5 en deux groupes homogènes, la différence entre eux étant statistiquement significative. En réalité, TC a provoqué une diminution de 22% de la macroporosité de H5 qui est passée de 42% en L3H5 à 20% en L1H5.

- La mésoporosité: Ici aussi, les statistiques ont regroupé les horizons en trois groupes homogènes. Le premier groupe est représenté par le couple H6-H1, le deuxième

par L1H5 et le troisième par L3H5. Cette mésoporosité varie dans un intervalle compris entre 8% et 30%, avec une étendue maximale d'environ 22% et une étendue minimale de 2%. Ce résultat signifie que TC a engendré une augmentation d'environ 22% de la mésoporosité en L1H5 au détriment de L3H5.

- La microporosité: La microporosité varie dans un intervalle compris entre 48% et 53%, soit une étendue maximale d'environ 5%, l'étendue minimale n'étant que de 1%. Le test statistique a regroupé les horizons en trois groupes homogènes représentés par H1, H6 et par le couple L1H5-L3H5. Ce résultat signifie que le tassement du à TC n'a pas provoqué de modification de la microporosité au niveau de la couche de subsurface (H5).

Tableau XVIII. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de la porosité totale et sa distribution dans le sol soumis au TC.

	Porosité Totale %	Macroporosité %	Mésoporosité %	Microporosité %
H1	45,2	38,2	11,5	50,3
L3H5	47,3	42,5	8,2	49,3
L1H5	41,8	20,8	30,3	48,9
H6	43,8	35,5	10,8	53,7
Probabilité	<0,001	<0,001	<0,001	0,04
Signification	HS	HS	HS	S
Groupes Homogènes	L1H5 H6 H1 L3H5	L1H5 H6-H1 L3H5	L3H5 H6-H1 L1H5	L1H5-L3H5 H1 H6

Au total, nous pouvons conclure que TC a provoqué une diminution de 6% de la porosité totale au niveau de H5 qui est passée de 47% en L3H5 à 41 % en L1H5. De même, l'effet de TC sur la porosité de H5 se traduit par une diminution de la macroporosité de L3H5 au profit de la mésoporosité de L1H5. En fin, TC n'a pas eu de conséquences statistiquement significatives sur la microporosité de L1H5 et L3H5.

4.2. Travail superficiel.

La figure 17 montre que les différentes classes de porosité occupent approximativement les mêmes proportions quel que soit l'horizon considéré. En effet, les volumes poraux occupés par les micropores ($P=52\%$), les mésopores ($7\% < p < 13\%$) et par les macropores ($34\% < p < 39\%$) sont relativement constants dans le profil. Cependant, il y a lieu de

remarquer que la moitié de la porosité totale est constituée de micropores (52%). La distribution de ces classes de porosité se fait toujours dans l'ordre Microporosité >Macroporosité> Mésoporosité. Ce résultat signifie que TS ne favorise pas dans un horizon donné le développement d'une classe de porosité sur une autre.

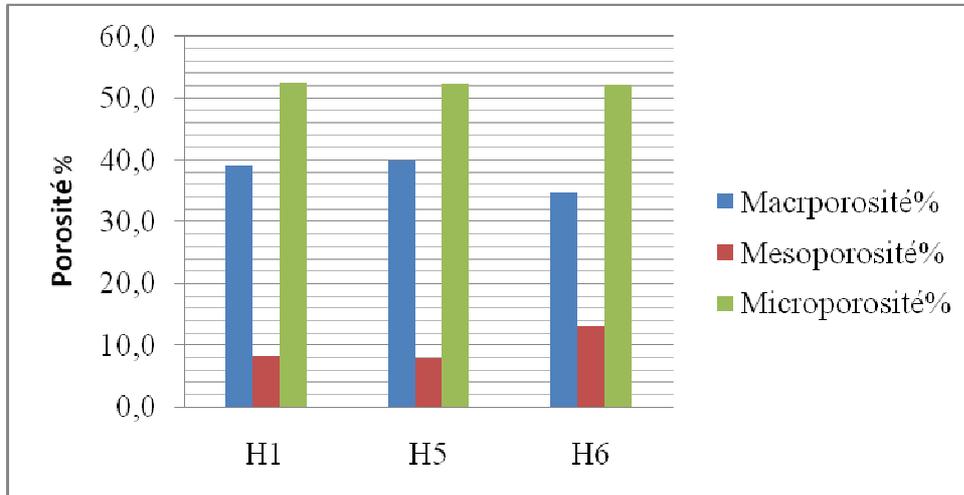


Figure 18. Distribution de la porosité dans le sol soumis au TS.

Le test d'homogénéité (tableau XIX) regroupe les horizons anthropiques en différentes classes:

- La porosité totale: La porosité totale varie entre 43 et 47% soit une étendue maximale de 4% et une étendue minimale de 1%. Malgré ces faibles écarts, le test d'homogénéité regroupe les horizons en 2 groupes homogènes, l'un représenté par le couple H1-H5 et l'autre par H6.

- La macroporosité et la mésoporosité: Ici aussi, malgré les faibles écarts entre un horizon et un autre (5% pour les macropores et 6% pour les mésopores), les horizons sont classés en deux groupes homogènes, l'un représenté par le couple H1-H5 et l'autre par H6.

- La microporosité: La microporosité est constante dans le profil et les calculs ne révèlent aucune différence significative entre eux. Les trois horizons appartiennent donc au même groupe.

Tableau XIX. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de la porosité totale et sa distribution dans le sol soumis au TS.

	Porosité Totale %	Macroporosité %	Mésoporosité %	Microporosité %
H1	46,0	39,2	8,3	52,5
H5	47,1	39,9	7,8	52,3
H6	43,8	34,8	13,1	52,1
Probabilité	<0,001	<0,001	<0,001	0,79
Signification	HS	HS	HS	NS
Groupes Homogènes	H6 H1-H5	H6 H1-H5	H5-H1 H6	/

4.3. Semis direct.

La figure 18 montre 50 % et 40% environ de la porosité des trois horizons est occupée respectivement par les micropores et les macropores. Cependant, il y a lieu de remarquer une légère décroissance de la macroporosité qui passe de 44% en H1 à 36% en H6. En revanche, la mésoporosité suit une évolution inverse et passe de 5% en H1 à 10% en H6. En ce qui concerne la microporosité, les résultats indiquent qu'elle est pratiquement constante dans les deux premiers horizons (50%) et qu'elle augmente très légèrement dans l'horizon H6 (53%). En l'absence des données de l'état porale initiale du sol, ce résultat laisse supposer que SD a favorisé le développement de la macroporosité au détriment de la microporosité.

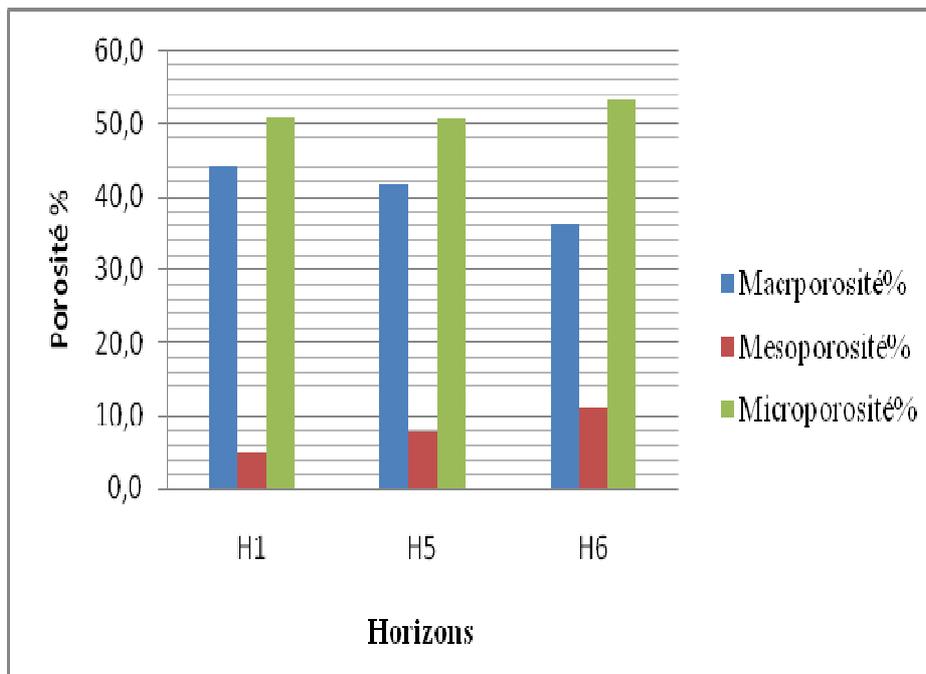


Figure 19. Distribution de la porosité dans le sol soumis au SD.

Le test d'homogénéité (tableau XX) regroupe les horizons anthropiques en différentes classes:

- La porosité totale, la macroporosité et la mésoporosité: Pour chacune de ces trois catégories de porosité, chaque horizon du sol représente une classe homogène à part. Ce résultat traduit une certaine hétérogénéité de ces trois classes de porosité dans le profil même si les différences maximales et minimales sont peu importantes (4% et 2% pour la porosité totale; 8% et 3% pour la macroporosité; 5% et 2% pour la mésoporosité).

- La microporosité: les taux de porosité forment deux groupes homogènes, l'un constitué par le couple d'horizons H5-H1 et l'autre par l'horizon H6. La différence entre ces groupes n'est que de 3% environ.

Tableau XX. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de la porosité totale et sa distribution dans le sol soumis au SD.

	Porosité Totale %	Macroporosité %	Mésoporosité %	Microporosité %
H1	47,8	44,1	5,0	50,9
H5	45,3	41,6	7,8	50,6
H6	43,7	36,0	10,9	53,2
Probabilité	<0,001	<0,001	0,002	0,04
Signification	HS	HS	S	S
Groupes Homogènes	H6 H5 H1	H6 H5 H1	H1 H5 H6	H5-H1 H6

4.4. Comparaison entre les techniques.

La comparaison de la porosité et de sa distribution entre les trois modes de travail du sol aux niveaux de trois horizons H1, H5 et H6 portera d'abord sur l'horizon de surface H1, ensuite sur l'horizon de subsurface H5 et, en fin, sur l'horizon de profondeur H6.

❖ L'horizon H1

La figure 19 révèle que quelle que soit la technique de travail du sol utilisée, la porosité totale de H1 est dominée par la microporosité qui représente 50% environ de la porosité totale. La macroporosité (entre 38% et 44% de la porosité totale) représente également une bonne part de la porosité totale. La mésoporosité, quant à elle, elle est la classe la moins représentée (5% à 11% de la porosité totale). Il ressort aussi que les étendues des taux de

porosité entre les trois traitements sont faibles. Elles sont de l'ordre de 3% pour la porosité totale, de 6% pour la macroporosité et la mésoporosité et de 2% pour la microporosité.

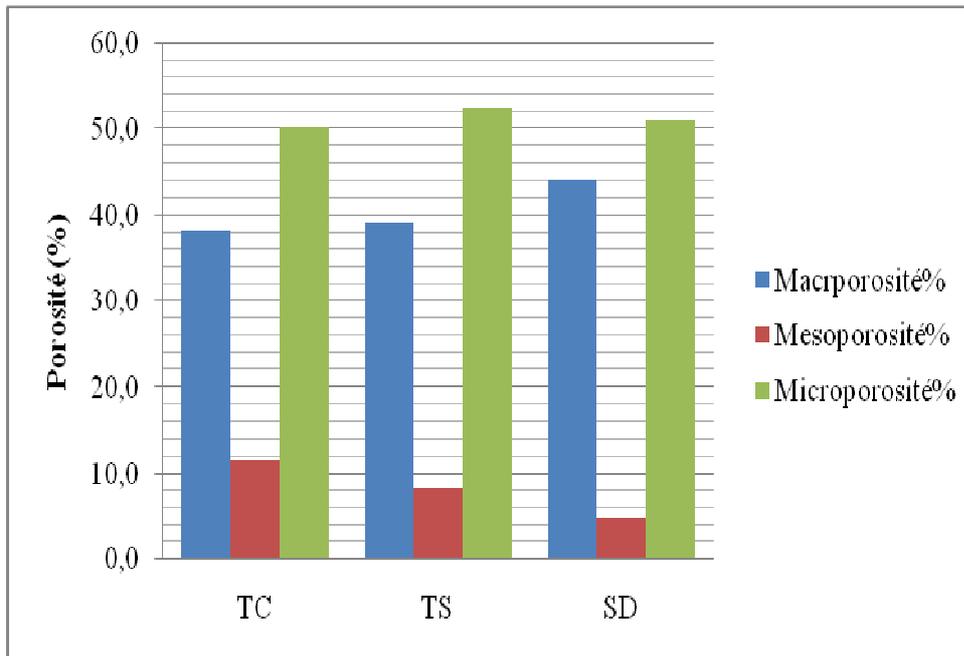


Figure20. Distribution de la porosité dans le sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de l'horizon H1

Malgré ces faibles écarts, le test d'homogénéité regroupe les modes de travail du sol en divers groupes homogènes (tableau XXI). Ainsi, la porosité totale et la mésoporosité sont classées dans trois groupes homogènes différents. Ce résultat signifie que l'effet des trois modes de travail du sol sur ces deux catégories de pores est différent, avec un avantage de SD sur la porosité totale et TC sur la mésoporosité. En ce qui concerne la macroporosité, le test statistique la range dans deux groupes homogènes différents, le groupe représenté par le couple TS-TC et le groupe SD. Ce résultat signifie que SD se démarque des deux autres techniques de travail du sol et qu'il favorise cette catégorie de porosité (44% en SD contre 38% pour TC et TS). En fin, pour la microporosité, les calculs indiquent que TC et SD appartiennent à un même groupe homogène, l'autre groupe étant représenté par TS. Remarquons que la différence entre ces deux groupes n'est en réalité que de 2%.

Ces résultats suggèrent que SD favorise la porosité totale et la macroporosité en H1, TC favorise la mésoporosité et TS la microporosité.

Tableau XXI. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de la porosité totale et sa distribution de dans le sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de H1.

	Porosité Totale %	Macroporosité %	Mésoporosité %	Microporosité %
TC	45,2	38,2	11,5	50,3
TS	46,0	39,2	8,3	52,5
SD	47,8	44,1	5,0	50,9
Probabilité	<0,001	<0,001	<0,001	0,01
Signification	HS	HS	HS	S
Groupes Homogènes	TC TS SD	TS-TC SD	SD TS TC	TC-SD TS

❖ Horizon H5 :

La figure 20 révèle que la porosité totale est prédominée par la microporosité ($\approx 50\%$) suivie par la macroporosité ($\approx 40\%$) et la mésoporosité ($\approx 8\%$). Les étendues des taux de porosité entre les trois modes de travail du sol sont faibles. Elles sont de l'ordre de 2% pour la porosité totale, de 3 % pour la macroporosité, de 1% pour la mésoporosité et de 3% pour la microporosité.

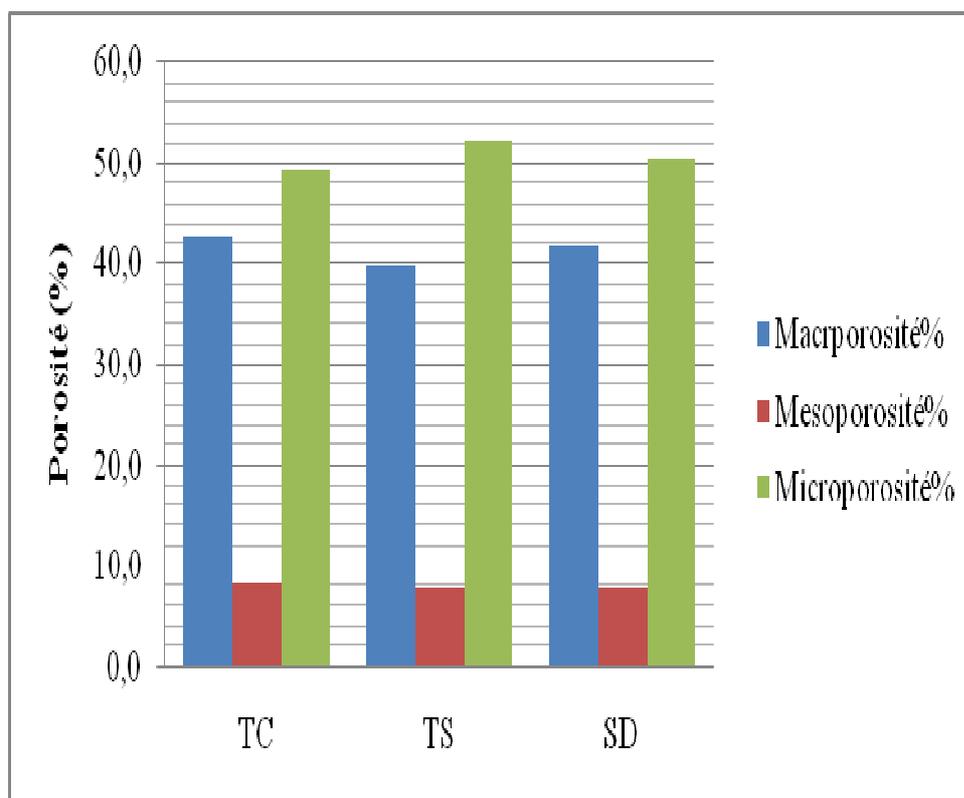


Figure 21. Distribution de la porosité dans le sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de l'horizon H5.

Les statistiques (tableau XXII) montrent que les trois techniques de travail du sol agissent différemment sur les classes de porosité. Ainsi, le test d'homogénéité regroupe les modes de travail du sol en divers groupes en fonction de la porosité.

- La porosité totale: Cette classe est subdivisée en deux groupes homogènes dans l'ordre de TC-TS > SD. Ce résultat suggère que SD est la technique qui favorise le moins la porosité totale.

- La macroporosité: Elle est classée en trois groupes homogènes dans l'ordre, TC > SD > TS. Ce résultat signifie que TC est la technique la plus favorable aux micropores dans la couche H5.

Ces résultats sont similaires à ceux de Kay et VandenBygaart, (2002); Bescansa et al., (2006). L'augmentation de porosité sous labour dans la couche travaillée est due à l'action de retournement et fragmentation du sol.

Tableau XXII. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de la porosité totale et sa distribution dans le sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de H5.

	Porosité Totale %	Macroporosité %	Mésoporosité %	Microporosité %
TC	47,3	42,5	8,2	49,3
TS	47,1	39,9	7,8	52,3
SD	45,3	41,6	7,8	50,6
Probabilité	<0,001	0,03	0,74	0,01
Signification	HS	S	NS	S
Groupes Homogènes	SD TC-TS	TS SD TC	/	TC-SD TS

❖ Horizon H6

La figure 21 révèle que la porosité totale est prédominée par la microporosité ($\approx 52-53\%$) suivie par la macroporosité ($\approx 34-36\%$) et la mésoporosité ($\approx 10-13\%$). Les étendues des taux de porosité entre les trois modes de travail du sol sont donc très faibles et sont inférieures à 3%.

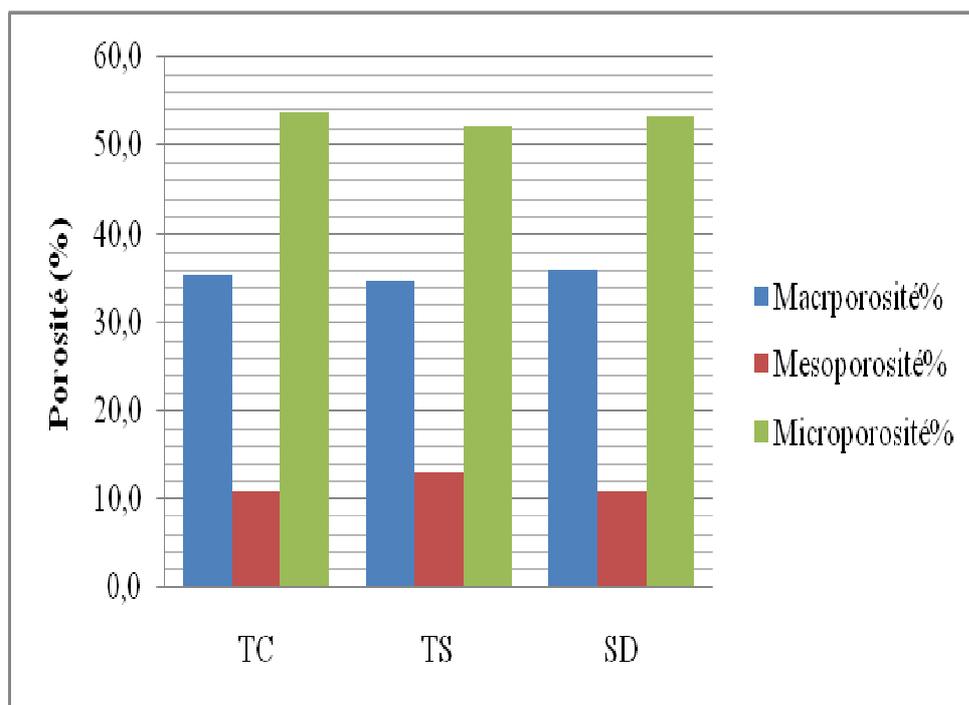


Figure 22. Distribution de la porosité dans le sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de l'horizon H6.

Le tableau XXIII indique que les trois techniques de travail du sol appartiennent à un même groupe homogène pour la porosité totale et pour la microporosité. Ce résultat suggère qu'aucune des trois techniques utilisées n'a un effet particulier sur ces deux classes de porosité de l'horizon H6. En revanche, ce tableau montre que SD favorise la mésoporosité et que TS est plutôt favorable à la macroporosité.

Tableau XXIII. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de la porosité totale et sa distribution dans le sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de H6.

	Porosité Totale %	Macroporosité %	Mésoporosité %	Microporosité %
TC	43,8	35,5	10,8	53,7
TS	43,7	34,8	13,1	52,1
SD	43,8	36	10,9	53,1
Probabilité	0,91	0,01	0,011	0,23
Signification	NS	S	S	NS
Groupes Homogènes	/	TC-SD TS	SD-TC TS	/

Conclusion

Les résultats obtenus permettent de dire que la technique de travail du sol a un effet sur la porosité totale et sa distribution dans le sol. Seulement, les différences entre les trois techniques de travail du sol sont toujours très faibles, elles sont de l'ordre de 3% en moyenne.

5. Indice d'instabilité structurale

L'indice d'Instabilité Structurale a été mesuré uniquement sur la couche de surface par la méthode Henin (1956). Ses résultats sont présentés par la figure 22 qui montre que la valeur la plus faible est enregistrée en SD (0,26) et la plus forte en TC (0,40).

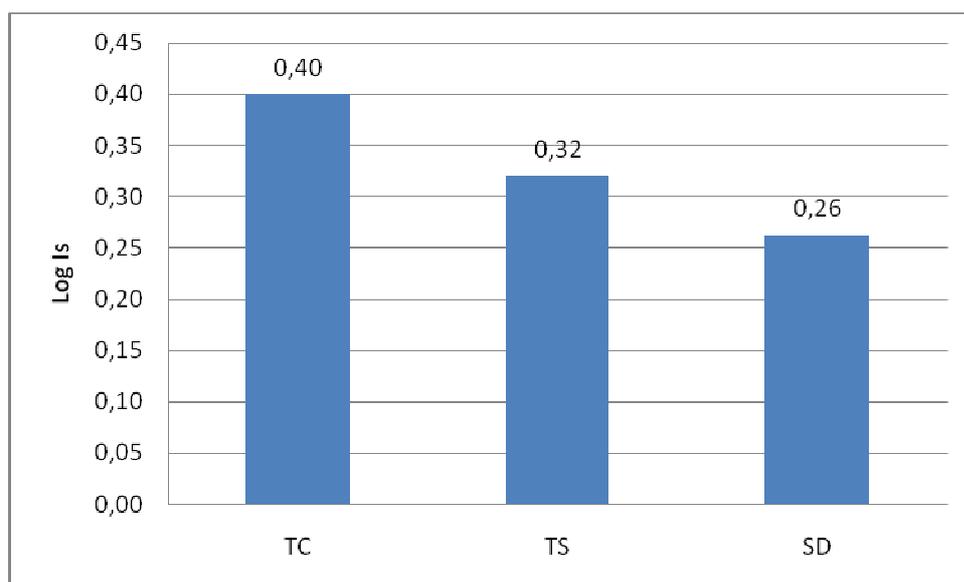


Figure 23. Indice d'instabilité structural du sol soumis selon TC, TS et SD.

Selon le tableau XXIV, la structure du sol étudié est très stable quel que soit la technique de travail du sol utilisée.

Tableau XXIV. Différente classes de stabilité structurale d'après Henin, (1956)

Stabilité structurale	Log Is
Très stable	<1
Stable	1-1,3
Stabilité médiocre	1,3-1,7
Instable	1,7-2
Très instable	>2

Malgré cela, les résultats (tableau XXV) indiquent que l'effet du travail du sol sur Is est statistiquement hautement significatif ($p < 0,001$) et classe cet indice en trois groupes homogènes. Ce résultat rejoint celui obtenu par Mrabet et al (2001).

Tableau XXV. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de l'indice d'instabilité structurale ($\log I_s$) du sol soumis selon TC, TS et SD.

	TC	SD	TS	Probabilité	signification	Groupes homogènes
Log Is	0,40	0,26	0,32	< 0,001	HS	SD, TS, TC

Conclusion

Il ressort de cette étude que la stabilité structurale du sol étudié est naturellement élevée. Ceci peut être dû, tout à la fois, à la texture argileuse.

Nous concluons que le meilleur indice d'instabilité structural est obtenu en SD à cause probablement de l'importante de l'accumulation des résidus de récolte en surface du sol.

6. Humidité du sol

Il s'agit d'étudier ici l'effet des modes de travail du sol sur l'évolution temporelle de l'humidité dans les trois couches du sol préalablement définies (0-10cm; 10-20cm; 20-30 cm). Nous avons effectué 5 mesures des taux d'humidité du sol en période d'arrière cycle du blé entre le 22 avril 2007 et le 31 mai 2007 à intervalle d'une dizaine de jours environ entre un prélèvement et un autre.

6.1. Travail du sol conventionnel TC.

La figure 23 et le tableau XXVI suggèrent les remarques suivantes:

- Quelle que soit la période considérée, le profil hydrique est toujours descendant. Ce résultat signifie que la couche de surface se dessèche plus vite que le reste du profil et que la remontée capillaire n'arrive pas à compenser les pertes dues à l'évaporation.

- Les trois couches se dessèchent assez rapidement durant la période du 22 avril (date 1) au 13 mai 2007 (date 3). Les pertes enregistrées lors de cette période sont de 10,6% pour la couche 1, 6,3% pour la couche 2 et de 5,6% pour la couche 3. A partir de cette date et jusqu'à la fin (date 5), le dessèchement perd de son intensité. En effet, pour les couches 1, 2 et 3, les pertes sont respectivement de 0,3%, 1,1% et 2,9%. Lors de cette période, les pertes d'eau sont relativement plus importantes pour les couches de profondeur qui sont un peu plus humide que la couche de surface.

- Entre la date 1 et la date 5, soit en 40 jours environ, le sol a perdu 10.9% d'eau dans la couche de surface, 7.4% dans la couche de subsurface et 8.5% dans la couche de profondeur.

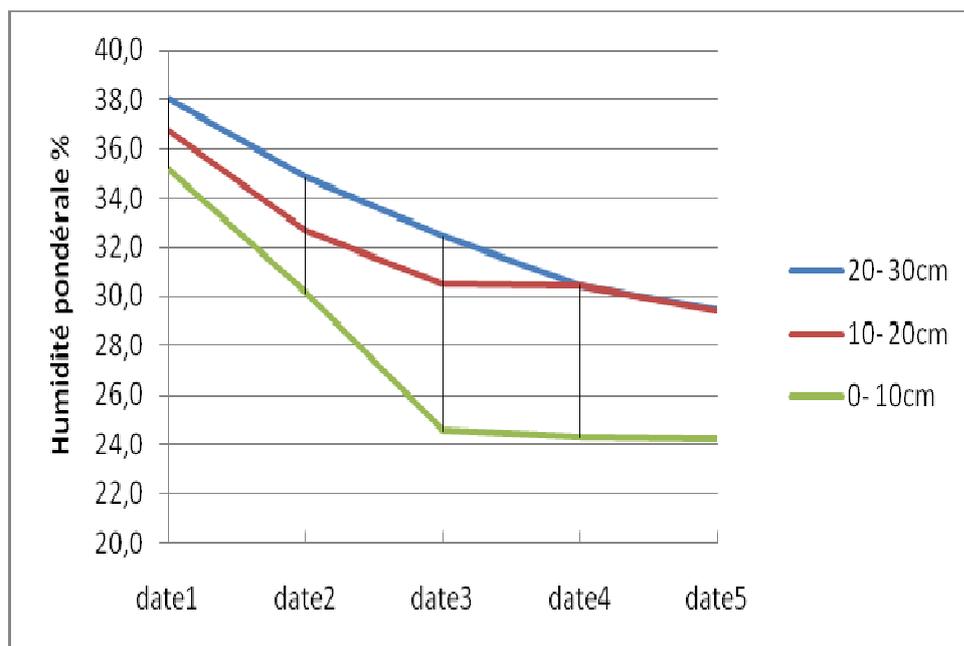


Figure 24. Evolution temporelle de l'humidité du sol soumis au TC.

L'analyse des données (tableau XXVI) révèle que la couche 1 constitue un groupe homogène à part entière quel que soit la date considérée. Ce résultat signifie que les différences des taux d'humidité entre cette couche et les deux autres sont statistiquement significatives. Par ailleurs, le tableau xxx montre aussi qu'entre la date 1 et la date 3, chaque couche constitue un groupe homogène et que leurs taux d'humidité sont statistiquement différents lors de cette période. En revanche, à partir de la date 4, les différences entre les taux d'humidité des couches 2 et 3 s'atténuent d'où le regroupement de ces deux couches dans la même classe. Ces résultats sont bien illustrés par la figure 23. .

Tableau XXVI. Analyses statistiques ($P < 0,05$) de l'évolution temporelle de l'humidité du sol soumis au TC.

	Date 1	Date 2	Date 3	Date 4	Date 5
Couche 1	35,2	30,1	24,6	24,3	24,3
Couche 2	36,8	32,7	30,5	30,4	29,4
Couche 3	38,0	34,8	32,4	30,4	29,5
Probabilité	0,004	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Signification	S	HS	HS	HS	HS
Groupes homogènes	Couche1 Couche2 Couche3	Couche1 Couche2 Couche3	Couche1 Couche2 Couche3	Couche1- Couche2 Couche3	Couche1- Couche2 Couche3

6.2. Travail du sol superficiel TS.

La figure 24 et le tableau XXVII déterminent les remarques suivantes:

- Quelle que soit la période considérée, le profil hydrique est toujours descendant et la couche de surface se dessèche plus vite que le reste du profil.

- Les trois couches se dessèchent assez rapidement durant la période du 22 avril (date 1) au 23 mai 2007 (date 4). Les pertes enregistrées lors de cette période sont de 10,7 % pour la couche 1, 6,6 % pour la couche 2 et de 8 % pour la couche 3. A partir de cette date et jusqu'à la fin (date 5), le dessèchement perd de son intensité. En conséquence, pour les couches 1, 2 et 3, les pertes sont respectivement de 0 %, 0,5 % et 0,6 %.

- Entre la date 1 et la date 5, le sol a perdu 10.7% d'eau dans la couche de surface, 7.1% dans la couche de subsurface et 8.6% dans la couche de profondeur.

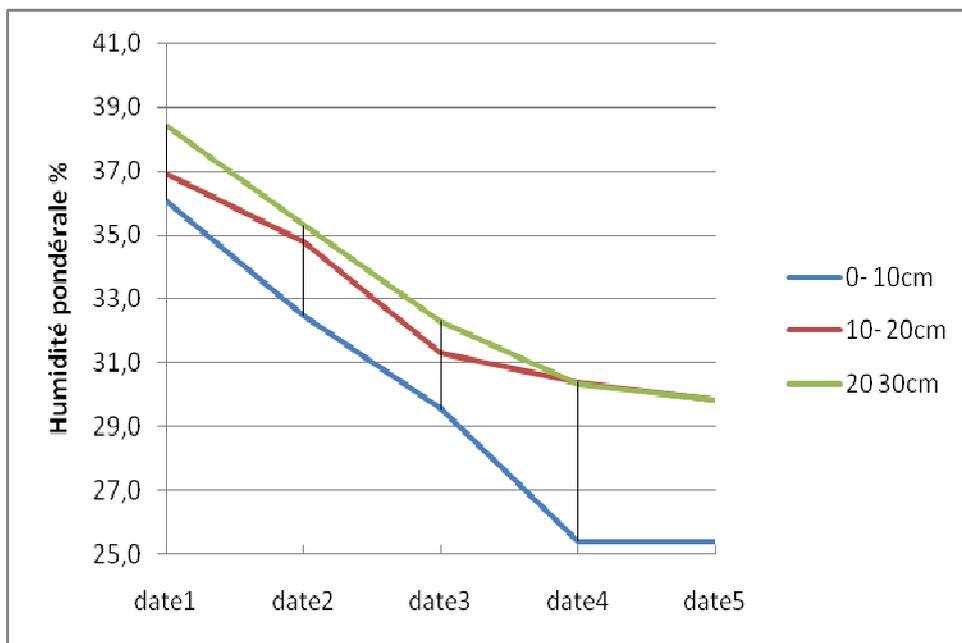


Figure 25. Evolution temporelle de l'humidité du sol soumis au TS.

L'analyse des données (tableau XXVII) révèle que la différence des taux d'humidité entre les couches du sol est statistiquement significative. Par ailleurs, le tableau xxx montre aussi que, en date 1, la couche 3 constitue un groupe homogène à part par rapport au couple constitué par les couches 1 et 2. Entre la date 2 et la date 5, la couche 1 constitue une classe homogène à part par rapport au couple constitué par les couches 2 et couche 3.

La figure 24 illustre bien ces résultats. .

Tableau XXVII. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de l'évolution temporelle de l'humidité du sol soumis au TS.

	Date 1	Date 2	Date 3	Date 4	Date 5
Couche 1	36,1	32,5	29,6	25,4	25,4
Couche 2	36,9	34,8	31,3	30,3	29,8
Couche 3	38,4	35,3	32,3	30,4	29,8
Probabilité	0,04	<0,001	0,02	<0,001	<0,001
Signification	S	HS	S	HS	HS
Groupes homogènes	Couche1- Couche2 Couche3	Couche1 Couche2- Couche3	Couche1 Couche2- Couche3	Couche1 Couche2- Couche3	Couche1 Couche2- Couche3

6.3. Semis direct SD.

La figure 25 et le tableau XXVIII suggèrent les observations suivantes:

- Quelle que soit la date de mesure, le profil hydrique est toujours descendant.
- Les trois couches se dessèchent lentement durant la période située entre le 22 avril (date 1) et le 02 mai (date 2). Les pertes enregistrées lors de cette période sont de 0,5 % pour la couche 1, 0,3 % pour la couche 2 et de 0,6 % pour la couche 3. A partir de cette date et jusqu'à la fin (date 5), le dessèchement est assez rapide. En effet, pour les couches 1, 2 et 3, les pertes sont respectivement de 7 %, 7,3 % et 8 %.
- Entre la date 1 et la date 5, le sol a perdu 7,6% d'eau dans la couche de surface et subsurface et 8,6 % dans la couche de profondeur.

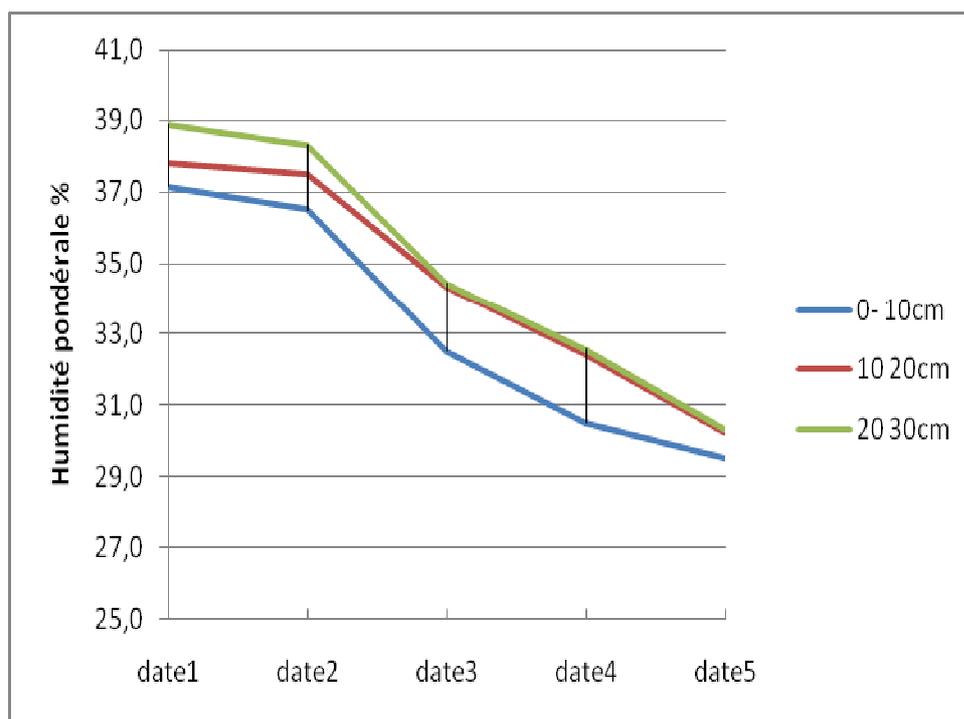


Figure 26. Evolution temporelle de l'humidité du sol soumis au SD.

L'analyse des données (tableau XXVIII) révèle que l'humidité du sol peut regrouper les couches du sol en deux groupes, un groupe se constitue d'une couche à part et l'autre par deux couches. En effet, entre la date1 et la date 2, la couche1 et la couche 2 constitue un groupe homogène. En revanche, à partir de la date 3, les différences entre les taux d'humidité des couches 2 et 3 s'atténuent d'où le regroupement de ces deux couches dans la même classe. Ces résultats sont bien illustrés par la figure 23. .

Tableau XXVIII. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de l'évolution temporelle de l'humidité du sol soumis au SD.

	Date 1	Date 2	Date 3	Date 4	Date 5
Couche 1	37,1	36,5	32,5	30,5	29,5
Couche 2	37,8	37,5	34,3	32,4	30,2
Couche 3	38,9	38,3	34,4	32,6	30,3
Probabilité	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Signification	HS	HS	HS	HS	HS
Groupes homogènes	Couche1- Couche2 Couche3	Couche1- Couche2 Couche3	Couche1 Couche2- Couche3	Couche1 Couche2- Couche3	Couche1 Couche2- Couche3

6.4. Comparaison entre les techniques.

Cette comparaison portera d'abord sur la couche de surface, ensuite la couche de subsurface et, en fin, sur la couche de profondeur.

- La couche de surface (1)

Le tableau XXIX et la figure 26 montrent que quelle que soit la période de prélèvement, le sol soumis au SD est plus humide que celui soumis au TS et à celui soumis au TC qui est le plus sec. De ce fait, nous pouvons dire que SD conserve mieux l'humidité du sol dans les horizons de surface que TS et TC.

Par ailleurs, les résultats révèlent que les pertes d'eau entre la date 1 et la date 5 sont de l'ordre de 7,6 % pour le SD, 10,7 % pour le TS et de 10,9 % pour TC. Ce résultat confirme bien que le SD conserve mieux l'eau du sol que les deux autres techniques.

Cet avantage serait dû à l'accumulation des résidus de récoltes qui ne sont pas enfouis dans le sol et qui constituent un mulch naturel. Ces résultats sont analogues à ceux de Mrabet, (2001) ; Razafimbelo (2005) et Carof,(2006).

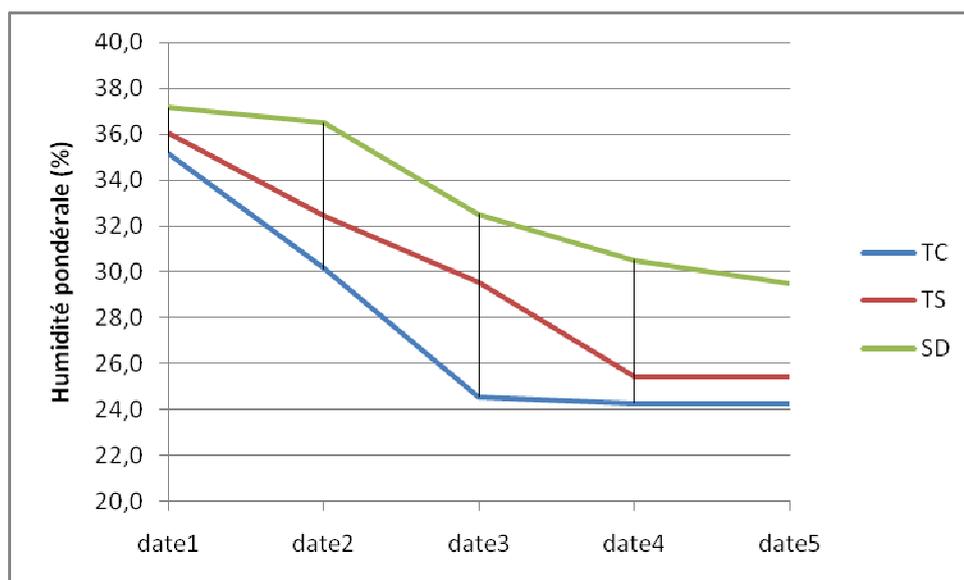


Figure 27. Evolution temporelle de l'humidité du sol soumise selon TC, TS et SD au niveau de la couche 1.

Les calculs statistiques (tableaux XXIV) font ressortir la particularité de chaque traitement en le considérant comme étant un groupe homogène à part entière et ce quelle que soit la période de prélèvement des échantillons.

Tableau XXIX. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de l'évolution temporelle de l'humidité du sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de la couche 1.

	Date 1	Date 2	Date 3	Date 4	Date 5
TC	35,2	30,1	24,6	24,3	24,3
TS	36,1	32,5	29,6	25,4	25,4
SD	37,1	36,5	32,5	30,5	29,5
Probabilité	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Signification	HS	HS	HS	HS	HS
Groupes homogènes	TC	TC	TC	TC	TC
	TS	TS	TS	TS	TS
	SD	SD	SD	SD	SD

- La couche de subsurface (2)

Le tableau XXX et la figure 27 montrent que quelle que soit la date de mesure de l'humidité du sol, le sol soumis au SD est plus humide que celui soumis au TS et à celui soumis au TC qui est le plus sec. De ce fait, nous pouvons conclure que SD conserve mieux l'humidité du sol dans la couche de subsurface que TS et TC.

Par ailleurs, les calculs révèlent que les pertes d'eau entre la date 1 et la date 5 sont relativement homogènes pour les trois techniques de travail du sol, elles sont de l'ordre de 7,1 % pour le SD, 7,6 % pour le TS et de 7,4 % pour TC.

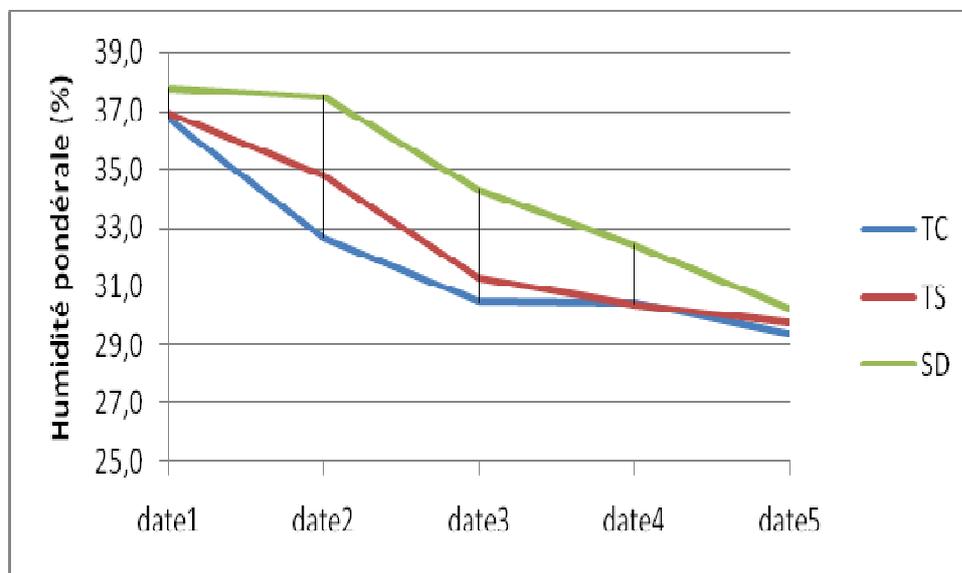


Figure 28. Evolution temporelle de l'humidité du sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de la couche 2.

Le tableau XXX révèle que les couches de subsurface se comportent de la même façon au début et à la fin des mesures, c'est-à-dire quand le sol est le plus humide ou quand il le plus sec. En revanche, lors des périodes intermédiaires, chaque mode de travail du sol constitue un groupe homogène à part entière, en particulier le SD.

Tableau XXX. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de l'évolution temporelle de l'humidité du sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de la couche 2.

	Date 1	Date 2	Date 3	Date 4	Date 5
TC	36,8	32,7	30,5	30,4	29,4
TS	36,9	34,8	31,3	30,4	29,8
SD	37,8	37,5	34,3	32,4	30,2
Probabilité	<0,06	<0,001	<0,001	<0,001	0,09
Signification	NS	HS	HS	HS	NS
Groupes homogènes	/	TC TS SD	TC TS SD	TC -TS SD	/

- La couche de profondeur (3)

Le tableau XXXI et la figure 28 montrent que quelle que soit la date de mesure de l'humidité du sol, le sol soumis au SD est plus humide que celui soumis au TS et à celui soumis au TC. Les pertes d'eau entre la date 1 et la date 5 sont pratiquement identiques pour les trois traitements ($8,5\% < H\% < 8,6\%$).

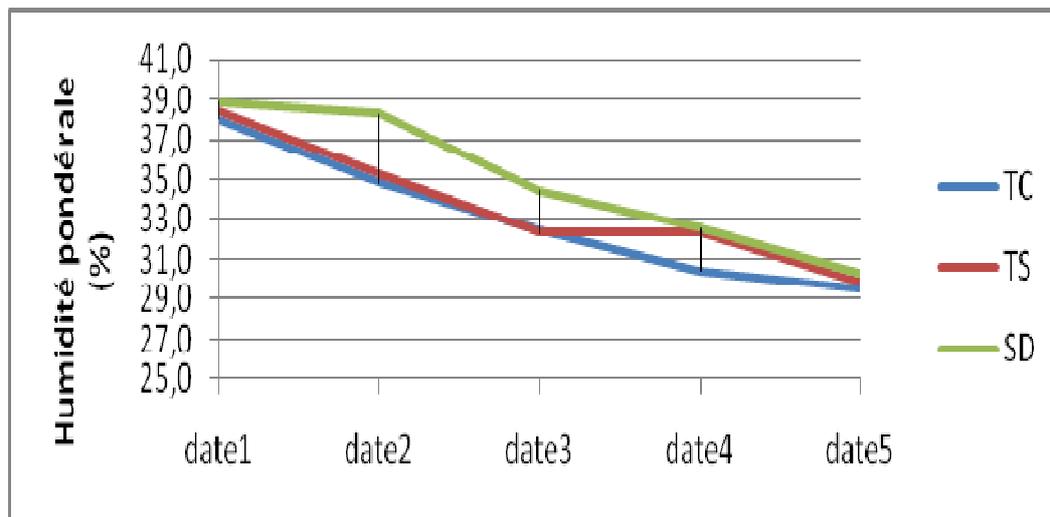


Figure 29. Evolution temporelle de l'humidité du sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de la couche 3.

A quelques détails près, le comportement de la couche de profondeur est analogue à celui de la couche de subsurface. En effet, les calculs (tableau XXXI) montrent qu'il n'existe pas de

différences significatives entre les taux d'humidité de cette couche quand le sol est le plus humide (Date 1) ou quand il est le plus sec (Date 5). Lors de ces deux dates, les trois modes de travail du sol constituent un seul groupe homogène. En revanche, lors des périodes intermédiaires, le SD se démarque de TC et TS lors des dates 2 et 3 et de TC lors de la date 4.

Tableau XXXI. Analyses statistiques ($p < 0,05$) de l'évolution temporelle de l'humidité du sol soumis selon TC, TS et SD au niveau de la couche 3.

	Date 1	Date 2	Date 3	Date 4	Date 5
TC	38,0	34,8	32,4	30,4	29,5
TS	38,4	35,3	32,3	32,3	29,8
SD	38,9	38,3	34,4	32,6	30,3
Probabilité	0,051	0,004	<0,001	<0,001	0,004
Signification	NS	HS	HS	HS	NS
Groupes homogènes	/	TC-TS SD	TS-TC SD	TC TS-SD	/

Conclusion

Il ressort de cette étude que, quelle que soit la période considérée, le profil hydrique du sol soumis aux trois modes de préparation du sol est toujours descendant. Ce résultat signifie que la couche de surface se dessèche plus vite que le reste du profil et que la remontée capillaire n'arrive pas à compenser les pertes dues à l'évaporation.

Par ailleurs, le SD conserve mieux l'eau du sol que les deux autres techniques, surtout au niveau de la couche de surface. En conclusion, lors de la période de sécheresse qui coïncide avec l'arrière cycle du blé, le SD offre une meilleure conservation de l'eau dans le sol que TC et TS.

7. Matière organique.

Il s'agit d'étudier l'action de l'enfouissement des résidus des récoltes par les différents modes de travail du sol. En conséquence, l'analyse de la teneur en matière organique est effectuée pour trois couches du sol en fonction de la profondeur du travail du sol (couche 0-10 cm, couche 10-20 cm et couche 20-30 cm).

7.1. Travail conventionnel TC

Les teneurs en matière organique des sols soumis au TC et les résultats de leurs statistiques sont présentés dans le tableau XXXII. Ce tableau indique que les taux de matière organiques sont faibles ($MO \% < 1,87$). Cependant, il indique une légère accumulation de la matière organique dans la couche médiane 10-20 cm ($MO \% = 1,87$) par rapport à la couche 20-30 cm ($MO \% = 1,41$) et à la couche 0-10 cm ($MO \% = 1,24$) qui est la moins bien pourvue en cet élément. Ce résultat, qui est illustré par la figure 29 révèle que le profil organique de ce sol est de type convexe. L'accumulation de la matière organique à 20 cm de profondeur sera liée au retournement total de l'horizon de surface par la charrue et par conséquent, les résidus de récolte sont incorporés à 20-25 cm de profondeur.

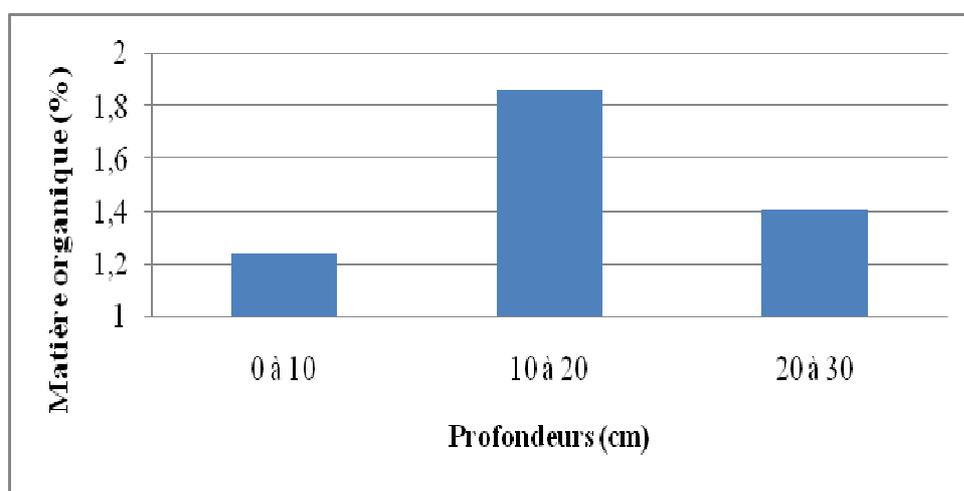


Figure 30. Profil de distribution des taux de MO dans le sol soumis au TC.

Les statistiques (tableau XXXII) révèlent que TC a un effet hautement significatif ($p < 0,001$) sur la distribution des taux de matière organique dans le sol. En effet, la couche du sol 10 - 20 cm possède la teneur la plus importante de la MO suivie par la couche 0- 10cm et enfin par la couche 20- 30cm.

bleau XXXII. Analyses statistiques ($p < 0,05$) des taux de la MO du sol soumis au TC.

Profondeurs (cm)	Matière organique (%)
Couche 0-10	1,24
Couche 10-20	1,87
Couche 20-30	1,41
probabilité	$< 0,001$
Signification	HS
Groupes homogènes	Couche 0-10; Couche 20 -30; Couche 10-20.

Il ressort de ce résultat que la répartition de la matière organique dans le profil est hétérogène. Ce résultat signifie que la TC a un effet significatif sur la répartition et l'accumulation de la matière organique dans le sol.

7.2. Travail superficiel TS

Le tableau XXXIII indique que dans le sol soumis à TS, la matière organique a tendance à s'accumuler d'une façon homogène dans les deux premières couches du sol (0–10 cm et 10–20 cm) avec des taux de l'ordre de 1,82%. Ces taux chutent brutalement dans la troisième couche (20 – 30 cm) et deviennent de l'ordre de 1,42 %. La figure 30 illustre bien ce résultat et montre clairement que la matière organique a tendance à s'accumuler d'une façon homogène dans la couche 0–20 cm au détriment de la couche de profondeur.

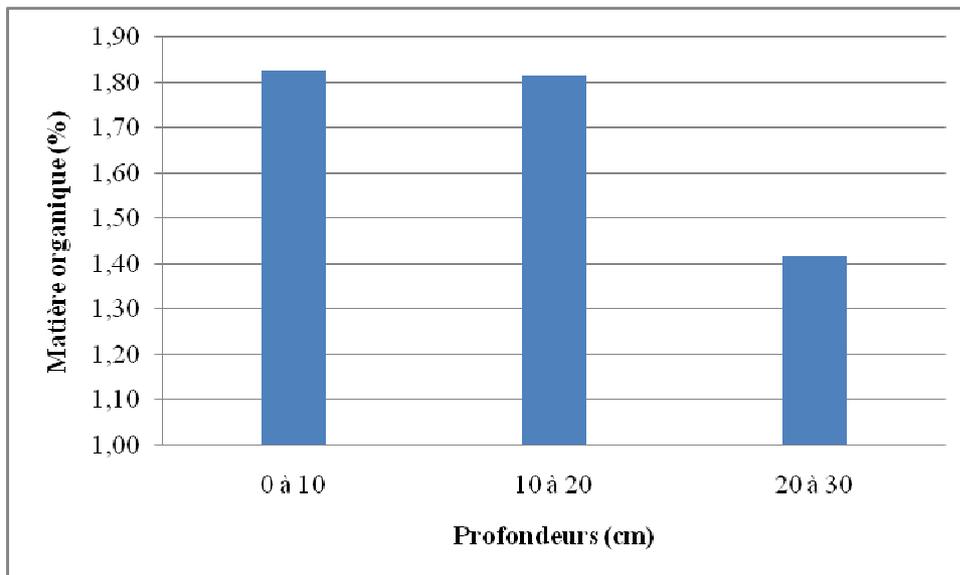


Figure 31. Profil de distribution des taux de MO dans le sol soumis au TS.

Ce résultat est bien confirmé par le test de Newman et Keuls (tableau XXXIII) qui regroupe les trois couches du sol en deux groupes homogènes. Le premier groupe est représenté par les couches 0–10 cm et 10–20 cm dans lequel le taux de MO est de l'ordre de 1,8% et le deuxième par la couche 20–30 cm dans lequel ce taux est de l'ordre de 1,4%.

Le tableau XXXIII montre que TS a un effet hautement significatif sur la distribution des taux de MO dans le profil ($p < 0,01$). Ces résultats indiquent donc que TS du sol affecte la distribution des taux de MO dans le sol. L'accumulation de MO dans les couches de surface et de subsurface serait probablement due à l'incorporation et du mélange des résidus de récoltes avec le sol par le chisel et le cultivateur.

Tableau XXXIII. Analyses statistiques ($p < 0,05$) des taux de MO du sol soumis au TS.

Profondeurs (cm)	Matière organique (%)
Couche 0-10	1,83
Couche 10-20	1,82
Couche 20-30	1,42
probabilité	< 0,001
signification	HS
Groupes homogènes	Couche 0 à10, couche 10 à 20, Couche 20 à 30

7.3. Semis direct SD

Le tableau XXXIV révèle une nette prédominance des taux de MO dans les couches de surface (MO% = 3,23) par rapport aux couches de subsurface (MO% = 1,40) et de profondeur (MO% = 1,43). Ce résultat, qui est bien illustré par la figure 31, signifie que la technique du semis direct favorise l'accumulation de la MO dans la couche superficielle du sol. Ce phénomène pourrait être expliqué par le fait que cette technique ne permet pas l'enfouissement des résidus de récoltes dans les couches de subsurface ou de profondeur du sol.

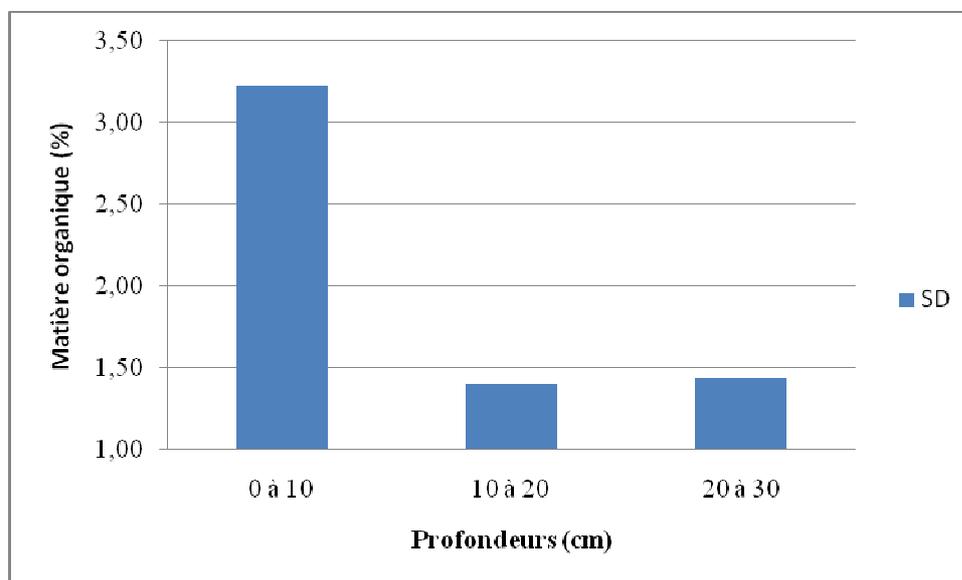


Figure 32. Profil de distribution des taux de MO dans le sol soumis au SD.

Par ailleurs, le test de Neuwman et Keuls (tableau XXXIV) regroupe les trois profondeurs en deux groupes homogènes. Le premier groupe est représenté par la couche de surface (0

– 10 cm) dans laquelle les taux de MO sont relativement forts (MO = 3,23%), le deuxième groupe regroupe les couches de subsurface (10–20 cm) et de profondeur (20–30 cm) dans lesquels les taux de MO sont de l'ordre de 1,4%. Les statistiques ont montré que la différence entre ces deux groupes est hautement significative ($p < 0,01$).

De ce fait, il ressort que SD favorise l'accumulation de la MO dans les couches de surface au détriment de celles de profondeur.

Tableau XXXIV. Analyses statistiques (0,05) du taux de MO du sol soumis au SD.

Profondeurs (cm)	Matière organique (%)
Couche 0-10	3,23
Couche 10-20	1,40
Couche 20-30	1,43
probabilité	<0,001
Signification	HS
Groupes homogènes	Couche 0 -10;Couche 10-20 -Couche 20-30

7.4. Comparaison entre les trois techniques

La figure 32 et le tableau XXXV présentent les résultats de la comparaison des taux de MO entre mêmes catégories d'horizons du sol soumis aux trois techniques de travail du sol.

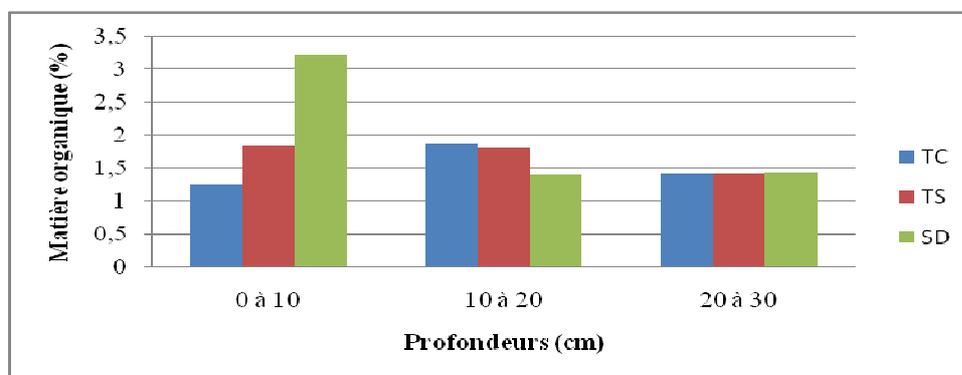


Figure 33. Profil de distribution de MO dans le sol selon TC, TS et SD.

Ces résultats indiquent que les pratiques culturales influencent différemment la distribution des taux de MO dans le profil :

- La couche 0–10 cm: Dans cette couche du sol, le test de Neuwman et Keuls a aboutit à trois groupes homogènes statistiquement différents les uns des autres ($p < 0,01$).

- Ce résultat signifie que les méthodes de travail du sol ont des effets différents sur l'accumulation de la MO selon la méthode considérée. Dans cette couche, le SD permet d'obtenir la meilleure teneur en MO. Ceci est dû à l'accumulation des résidus de récolte qui ne sont pas enfouis.

- La couche 10-20 cm: Dans cette couche du sol, le test de Neuman et Keuls a abouti à trois groupes homogènes statistiquement différents les uns des autres ($p < 0,01$). Ce résultat signifie que le TC, le TS et le SD ont un effet sur l'accumulation de la MO dans cette couche du sol. De ce fait, les techniques TC et TS permettent d'obtenir une meilleure teneur en MO. Cette différence serait due à l'effet de l'enfouissement des résidus de récoltes par TC et TS.

- La couche 20 – 30 cm: Dans cette couche du sol, le test de Neuman et Keuls a montré qu'il n'y a pas de différences significatives entre les trois méthodes de travail du sol.

Tableau XXXV. Analyses statistiques ($p < 0,05$) des taux de la MO dans le sol selon TC, TS et SD.

	TC	SD	TS	Probabilité	Signification	Groupes homogènes
Couche 0- 10cm	1,24	3,23	1,83	< 0,001	HS	TC, TS, SD
Couche 10-20cm	1,87	1,40	1,82	< 0,001	HS	SD, TS, TC
Couche 20-30cm	1,41	1,43	1,42	0,67	NS	/

Conclusion.

En conclusion, contrairement à TC et TS, SD favorise mieux l'accumulation de MO dans la couche superficielle.

8. Rendement du blé

Le rendement constitue un critère nécessaire pour évaluer l'intérêt agronomique d'une technique de travail du sol. La comparaison des rendements et des composantes de rendement du blé entre les trois techniques de travail du sol est illustrée par le tableau XXXVI.

Tableau XXXVI. Analyse statistique ($p < 0,05$) du rendement et des composantes du rendement du blé.

Paramètres Traitements	Plants/m ²	Hauteur (cm)	Epis/m ²	Grains/épi	Epillet/épi	Rendement qx/ha	Poids des 1000 grains (g)
SD	186.38	81.25	368.58	54.83	16.52	38.5	29.6
TS	133.23	80.2	359.83	54.53	17.12	35.21	29.42
TC	114.23	78.3	319.83	57.15	17.90	28.86	30.17
Signification	HS	NS	S	NS	NS	S	NS
Groupes Homogènes	SD TS-TC	/	SD TS TC	/	/	SD TS TC	/

L'analyse de ce tableau indique ce qui suit :

- **Le nombre de Plants par m²** : La densité des plants à la levée se fait dans le sens SD>TS>TC avec respectivement 186, 133 et 114 plants/m². Cependant, l'analyse de la variance à p< 0,05 montre des différences hautement significatives entre SD d'une part et TS et TC d'autre part. Ainsi, le test de Newman et Keuls classe les techniques de travail du sol en deux groupes homogènes dans l'ordre SD > TS = TC.

Ce résultat signifie que SD est plus favorable que les deux autres techniques de travail du sol. Il signifie aussi la différence entre TS et TC n'est pas statistiquement significative malgré une différence de l'ordre de 19 plants/m².

L'avantage de la levée des plants du blé en SD serai dû à l'effet de la matière organique qui s'accumule en surface et qui aura un effet favorable sur la rétention en eau dans le sol.

- **La hauteur des tiges au stade maturité** : Les résultats indiquent que les hauteurs moyennes des tiges au stade maturité se situent entre 81 cm pour SD et 78 cm pour TC. L'écart moyen entre les trois techniques de travail du sol étant inférieur à 3 cm, l'analyse de la variance à p< 0,05 n'a détecté aucun effet statistiquement significatif entre ces trois techniques de travail du sol sur la hauteur des tiges du blé au stade de maturation. D'ailleurs, le test de Newman et Keuls classe ces trois techniques dans le même groupe. Pour ce paramètre, nous pouvons écrire SD = TS = TC.

- **Le nombre d'épis par m² (Epis/m²)** : Les résultats indiquent que le nombre d'épis par m² se fait dans l'ordre SD > TS > TC avec respectivement 368, 359 et 319 épis/m². Il y a lieu de remarquer que la différence du nombre d'épis par m² entre SD et TS n'est que de 9 épis tandis qu'entre TS et TC, elle est de l'ordre de 40 épis. Ce résultat signifie que TC est le moins favorable à la formation des épis par rapport à SD et TS.

Cependant, malgré la faible différence entre SD et TS, l'analyse de la variance (p < 0,05) révèle que les différences entre les trois techniques du sol pour ce paramètre sont

statistiquement hautement significatives. Le test statistique classe ces techniques de travail du sol en trois groupes homogènes classés dans l'ordre $SD > TS > TC$.

Cet avantage du nombre d'épis en SD est le résultat d'une meilleure levée des plants du blé par rapport à TS et TC.

- **Le nombre de grains par épi :** Les résultats révèlent que les nombres de grains par épis sont très proches les uns des autres ($54 < \text{nombre grains/épi} < 57$) avec un léger avantage au profit de TC. Les statistiques confirment ce faible écart (différences non significatives) et classent les trois techniques de travail du sol dans le même groupe ($SD = TS = TC$).

Ce résultat suggère qu'aucune des trois techniques de travail du sol n'a d'effet significatif sur le nombre de grains par épi par rapport aux deux autres.

- **Le nombre d'épillets par épi:** Les résultats indiquent que les nombres moyens d'épillets par épi sont très proches les uns des autres et qu'ils se situent entre 16 et 17.

Les statistiques confirment ce faible écart (différences non significatives) et regroupe les trois techniques de travail du sol dans la même classe ($SD = TS = TC$).

Ce résultat suggère qu'aucune des trois techniques de travail du sol n'a d'effet significatif sur le nombre d'épillets par épi.

- **Le poids de mille grains (PMG) :** TC présente le poids le plus élevé avec 30,17 g suivi par SD avec 29,6 g et en dernier par TS avec 29,42 g. Les valeurs obtenues par les différents traitements sont donc très rapprochées, l'écart maximum n'étant que de 0,75 g soit moins de 1 gramme. De ce fait, les statistiques n'ont révélé aucune différence statistiquement significative entre les trois techniques et les ont classées dans un même groupe ($SD = TS = TC$). Ce résultat signifie que quelle que soit la techniques de travail du sol choisie, PMG restera toujours le même.

- **Le rendement en qx/ha):** SD permet d'obtenir le rendement le plus élevé avec 38,5 qx/ha. Il est suivi par TS (35,21 qx/ha) et TC (28,86 qx/ha). Nous constatons que l'écart entre le meilleur rendement (SD) et le plus faible rendement (TC) est de l'ordre de 10 qx/ha. Cet écart est de l'ordre de 3 qx entre SD et TS et de 7 qx entre TS et TC. Les statistiques confirment ces forts écarts de rendements entre les trois techniques qui seront classées en trois groupes homogènes dans l'ordre $SD > TS > TC$.

Conclusion

Il ressort de cette étude que les différences entre les effets des modes de travail du sol se sont exprimées essentiellement par le nombre des plants/ m^2 , le nombre d'épis/ m^2 et le rendement en grains. L'effet favorable du semis direct sur ces composantes du rendement peut être expliqué par une meilleure humidité du sol lors de la levée des plants. Cette humidité est due à la conservation de la matière organique dans la couche superficielle du sol, ce qui

influe sur le nombre d'épis/m² à la montaison et par conséquent sur le rendement du blé. Ces résultats sont proches de ceux de Mrabet, (2001). Nous concluons que le semis direct engendre le meilleur rendement (qx/ha) par rapport au travail du sol superficiel et le travail du sol conventionnel.

9. Discussion générale

Dans le sol soumis au TC, les conséquences agronomiques de la succession des opérations de travail du sol (laboure avec la charrue et la préparation du lit de semence avec le cover-crops et la herse rotative) et les passages répétés des roues de tracteur sont remarquables sur les propriétés du sol par ses actions du retournement complète de la bande du sol, de la fragmentation et de la compaction du sol (Roger-Estrade et al, 2004 ; Labreuche et al., 2007). En conséquence, ce type de travail du sol induit une accumulation des résidus de récolte au niveau de l'horizon de labour (H5) et une hétérogénéité verticale (entre les horizons H1, H5 et H6) et latérale (dans l'horizon du labour H5) dans le profil du sol. C'est cette différence des taux de matière organique qui serait à l'origine de la bonne organisation structurale de type OΔ au niveau de L3H5 et une mauvaise organisation de type CΔ aux niveaux de H1, H6 et L1H5. Cette organisation structurale est confirmée par les valeurs de la densité apparente, de la porosité totale et de la rétention en eau (pF). De ce fait, le compartiment L3H5, qui résulte du retournement de la bande du sol sans compaction est riche en résidus organiques et présente donc une supériorité de la porosité totale, de la macroporosité, de la saturation en eau, du drainage rapide et lent et la capacité de rétention en eau. Or, l'autre compartiment (L1H5) qui est également riche en résidus organiques et compact (L1H5) engendre une diminution de 5% de la porosité totale et 22 % de la macroporosité par rapport à L3H5. Le drainage rapide et lent de L1H5 ont également chutés par rapport à ceux de L3H5.

Dans le sol soumis au TS, les effets des actions de retournement partiel avec le chisel et le fractionnement du sol avec le cultivateur et la herse rotative permettent d'obtenir un mélange des résidus de récolte avec le sol engendrant une bonne structure de type OΔ aux niveaux de deux horizons de surface (H1 et H5) et une mauvaise structure de type CΔ au niveau de H6 (Roger-Estrade et al, 2004 ; Labreuche et al., 2007). Ceci peut expliquer l'augmentation de la porosité totale (4%), de la macroporosité (5%), de la saturation en eau (4%) et la capacité de rétention en eau (2%) dans les deux horizons de surface (H1 et H5).

SD favorise l'accumulation des résidus de cultures précédentes dans l'horizon de surface H1 et de ce fait, une bonne organisation structurale de type O Γ et une mauvaise organisation structurale de type CΔ aux niveaux de H5 et H6 (Roger-Estrade et al, 2004) qui sont eux, très peu pourvu en matière organique. Ce phénomène peut expliquer les augmentations de la

porosité totale (4%), de la macroporosité (8%), de la saturation en eau (3%), du drainage rapide et lent (3 et 1%) et de la capacité de rétention en eau (3%).

La comparaison entre les trois modes de préparation du sol montre que, en SD, l'accumulation des résidus de récoltes en H1 joue un rôle important dans l'amélioration des propriétés physiques, hydriques et chimiques du sol, notamment sur la densité apparente, la porosité totale, la macroporosité, la saturation en eau, le drainage rapide et lent, la capacité de rétention en eau et la teneur du sol en matière organique (Roger-Estrade et al, 2004 et Carof, 2006). Toutefois, cet avantage est perdu devant TC et TS surtout au niveau de l'horizon H5 à cause, probablement, de la faible activité biologique dans H5 pendant les 3 années de non labour. Même si l'indice d'instabilité des sols étudiés est partout faible, la teneur en matière organique dans le sol soumis au SD a engendré une légère amélioration de la stabilité structurale par rapport à TS et TC.

Le changement de l'organisation structurale du sol, la matière organique, la porosité et sa distribution, la rétention en eau par les techniques de travail du sol affectent aussi la modalité de dessèchement du sol surtout en période de fin cycle du blé. Cette dernière est plus importante en TC qu'en TS et en SD. C'est à cause de l'accumulation des résidus de récolte en surface que l'évaporation est réduite et que la remontée de l'eau par capillarité est limitée. De ce fait, SD conserve l'eau mieux que les deux autres techniques. Ce résultat va dans le même sens que celui de Mrabet (2001) ; Bessam et Mrabet, (2001) et Carof, (2006).

En ce qui concerne le rendement agronomique et en regard des résultats obtenus, il apparaît que les trois modes de travail du sol ont des effets différents sur le rendement du blé en raison probablement de modifications des paramètres physiques et hydriques des sols Bessam et Mrabet, (2001). Cette étude a montré que l'effet des techniques de travail du sol s'est manifesté sur l'ensemble des composants des rendements mesurés, surtout sur la densité des peuplements, le nombre d'épis/m² et le rendement en matière sèche.

L'importance du peuplement en plants/ m² dans le SD peut s'expliquer par une humidité favorable à la levée des plants. Cette humidité est due à la conservation de la matière organique dans la couche superficielle du sol, ce qui influe sur le nombre d'épis/m² et par conséquent sur le rendement du blé. Les résultats obtenus restent très proches de ceux Bessam, Mrabet, (2001) et Carof, (2006). Ainsi, tous les résultats obtenus lors de cette étude montrent que l'action des outils de travail du sol affecte en premier lieu la matière organique et la structure du sol. Ces deux paramètres affectent à leur tour les autres paramètres physiques et hydriques et par conséquent le rendement du blé.

Conclusion générale

L'objectif de cette recherche était de comparer l'effet de trois techniques de travail du sol sur les caractéristiques morphologiques et analytiques du sol et sur les composantes du rendement du blé dur au terme de trois campagnes agricoles. Les trois techniques de travail du sol utilisées sont le travail conventionnel (TC), le travail superficiel (TS) et le non travail du sol ou semi direct (SD). L'expérimentation a été menée sur un sol peu évolué d'apport alluvial argilo-limoneux de la station expérimentale de l'ITGC à Oued Smar (Alger).

Les résultats obtenus se résument comme suit :

- La structure du sol varie selon la technique utilisée. Ainsi, la structure sous TS est de type $O\Delta$ en H1 et H5 et de type $C\Delta$ en H6, sous SD, elle est de type $O\Gamma$ en H1 et de type $C\Delta$ en H5 et H6. Sous TC, la structure est de type $C\Delta$ en H1, L1H5 (passage des roues) et H6 et de type $O\Delta$ en L3H5. De ce fait, SD ($O\Gamma$) est plus favorable à la structuration de H1 que TS ($O\Delta$) et TC($C\Delta$). Cependant, au niveau de la couche H5, TS et TC ($O\Delta$) sont mieux structurant que SD ($C\Delta$). En revanche, la structure de H6 ($C\Delta$) est toujours la même quelle que soit la technique utilisée.
- SD favorise par rapport à TS et TC la diminution de la densité apparente et l'augmentation de la porosité totale en H1. Les résultats ont révélé un effet contraire en H5. Cependant, les résultats ont montré aussi que les trois techniques utilisées n'engendrent pas d'effets particuliers sur la variation de la porosité totale et de la densité apparente de H6.
- SD favorise la macroporosité et défavorise la mésoporosité en H1 par rapport à TS et TC. En revanche, en H5 et H6, SD engendre une diminution de la macroporosité et de la mésoporosité par rapport au TC et TS. Les trois techniques de travail du sol n'ont pas d'effet particulier sur la microporosité. Le volume porale des micropores est prédominant (50 % environ).
- SD permet d'obtenir une meilleure saturation en eau, un bon drainage et il augmente la capacité au champ de H1. Ces avantages sont perdus au niveau de l'horizon H5 devant les autres techniques de travail du sol (TC et TS).
- La stabilité structurale de la couche superficielle du sol est bonne sous les trois techniques de travail du sol mais avec un léger avantage au profit de SD.

- Les résultats ont montré que, quelle que soit la technique de travail du sol utilisée, le profil hydrique du sol est toujours descendant. De même, les résultats ont montré que SD conserve mieux l'eau du sol que TC et TS.

- SD engendre un meilleur rendement (38,5 qx/ha) que TS et TC.

Cependant, cette étude a montré que malgré des différences statistiquement significatives au sein d'un même paramètre pédologique soumis aux trois techniques de travail du sol, en pratique, les écarts entre ces paramètres sont souvent très faibles pour leur donner un sens agronomique. Toutefois, il ressort de cette étude que SD a eu un impact nettement plus important que celui de TS et TC sur l'accumulation de la matière organique, la conservation de l'eau dans le sol et sur le rendement du blé.

Cette étude, qui a été menée durant trois années consécutives, mérite d'être poursuivie encore pour mettre mieux en relief les effets de chaque technique de travail du sol sur les propriétés et caractéristiques des sols.

Références bibliographiques

Annabi M., 2005. Stabilisation de la structure d'un sol limoneux par des apports de composts d'origine urbaine : Relation avec les caractéristiques de leur matière organique. Thèse doct.INA, El harrach, Alger 237p.

Anken T., Weisskopf P., Zihlmann U., Forrer H., Jansa J. et Perhacova K., 2004. Long-term tillage system effects under moist cool conditions in Switzerland. *Soil and Tillage Research*, 78, pp. 171-183.

Balesdent J., Chenu C. et Balabane M., 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research*, 53, 215-230.

Bescansa P., Imaz M. J., Virto I., Enrique A. et Hoogmoed, W. B., 2006. Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain. *Soil and Tillage Research*, 87, 19-27.

Bessam F. et Mrabet R., 2001. Time influence of no tillage on organic matter and its quality of a vertic Calcixeroll in a semiarid area of Morocco. In: Proceedings of international congress on conservation agriculture, 1-5 October 2001, Madrid (Spain), vol. 2, pp. 281-286

Boizard H., Richard G., Defosse P., J. Roger Estrade J et Boiffin J., 2004. Etude de l'effet à moyen et long terme des systèmes de culture sur la structure d'un sol limoneux-argileux du Nord du Bassin Parisien. *Étude et Gestion des Sols*, Volume 11, 1, 2004 - pages 11 à 20

Boulal H., Zagouane, O., El Mourid, M., Rezgui, S., 2007. Guide pratique de la conduite des céréales d'automne (blé et orge) dans le Maghreb (Algérie, Maroc et Tunisie). ITGC-INRAA-ICARDA, 176p.

Bouzzara, S., Ould Ferroukh, M.E.H., Bouguendouz, A., 2011. Influence du semis direct et des techniques culturales simplifiées sur les propriétés d'un sol de la ferme pilote Sersour (Sétif). *Option Méditerranéennes : Série A, Séminaire Méditerranéennes*, n.96, p 123-129.

Bouzerzour H., Irekti H., Vadon B., 2011. 4 Rencontres Méditerranéennes du Semis Direct. Saragoza : CIHEAM/ATU-PAM/INRAA/ITGC/FERT.

Calembert J, 1985. Cours de physique du sol.Fac.Sc.Agro.Gembloux,57p

Calvet R., 2003.Le sol propriétés et fonction, Tome I : Constitution et structure phénomènes aux interfaces. Ed France Agricole, 456 P.

Caneill J et Bodet J.M., 1991. Simplification du travail du sol et rendement des cultures. Conséquences sur les systèmes de cultures, *Perspectives Agricoles*, n°161, septembre, p 54-62.

Carof M., 2006. Fonctionnement de peuplement en semis direct associant blé tendre d'hiver à différentes plantes de couverture en climat tempéré. Thèse de doctorat : Institut National Agronomique Paris-Grignon, 115 p.

Chennafi H., Bouzerzour H., Aidaoui A. et Saci A., 2006. Yield response of durum wheat (*triticum durum*) cultivar waha to deficit irrigation under semi arid growth conditions. *Asian J Sci.*, 5: 854-860.

Curmi P., 1988. Structure, espace poral du sol et fonctionnement hydrique. Analyse de quelques cas concrets. *Science du sol*, vol. 26/3, pp. 203-214. In Association Française pour l'Etude du Sol. www.afes.fr - 2010

CPCS, 1967. Commission de Pédologie et de Cartographie des sols. Edition 1967, 100p. In Association Française pour l'Etude du Sol. www.afes.fr - 2010

Daoud et Halitim., 1994. Irrigation et salinisation au Sahara algérien. *Sécheresse N°3*, Vol. 5. pp 151-160.

D'Bichi A.N.L. et Laggoun C.E., 2004. Essais comparatifs semis direct semis classique sur la culture de blé. *Mém. Ing.*, INA EL Harrach, Alger, pp. 65.

Derpsch R. et Friedrich T., 2009. Development and Current Status of No-till Adoption in the World. 18th Triennial Conference of the International Soil Tillage Research Organization (ISTRO), Izmir, Turkey.

Ecrément Y., 1971. Etude agropédologique da la mitidja. DEMRH, 130p.

Fuentes J. P., Flury, M. et Bezdicek D. F., 2004. Hydraulic properties in a silt loam soil under natural prairie, conventional till, and no-till. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 1679-1688.

Frey S.D., Elliott, E.T. et Paustian K., 1999. Bacterial and fungal abundance and biomass in conventional and no-tillage agroecosystems along two climatic gradients. *Soil Biology and Biochemistry* 31:573-585.

Gautronneau Y. et H. Manichon., 1987. Guide méthodique du profil cultural, Paris/Lyon.

Girard M.C., Walter C., Rémy J.C., Berthelin J. et Morel J.L., 2005. *Sols et Environnement*, Dunod Editions, Paris, 804 p.

Guérif J., 1994. Influence de la simplification du travail du sol sur l'état structural des horizons de surface : Conséquences sur leurs propriétés physiques et leurs comportements mécaniques. In Monnier, G., Thevenet, G., Lesaffre, B. (eds.), *Simplification du travail du sol*, Vol. 65, INRA éditions, Paris (France), pp. 13-33.

- Harrad F., 2005.** Contribution à l'établissement d'un itinéraire technique pour la mise en place du blé dans les zones sahariennes (Adrar) effet de succession des outils aratoires sur le développement de la plante. Th. Magister. INA, El-harrach
- Harvey J.M., 2005.** Le semis en semis direct, l'unique opération de travail du sol. Colloque en Agroenvironnement. Conseil des productions végétales du Québec.
- Heddadj D. et Cloarec M., 2010.** Impact des techniques culturales sans labour sur le fonctionnement biophysique des sols. Options Méditerranéennes. A no. 96- IV Rencontres Méditerranéennes du Semis Direct, 131-145.
- Holland J.M., 2004.** The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 103, 2004, p. 1-25.
- Kay B.D. et Vanden Bygaart A.J., 2002.** Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil and Tillage Research*, 66, 107-118.
- Kribaa., 2003.** Effet de la jachère sur les sols en céréaliculture pluviale dans les zones semi-arides méditerranéennes. Cas des hautes plaines sétifiennes en Algérie. Thèse de Doctorat d'état en Sciences Agronomiques, INA El –Harrach, Alger, 121p.
- Labreuche J., Viloingt T., Caboulet D., Daouze J.P., Duval R., Ganteil A., Jouy L., Quere L., Boizard H. et Roger-Estrade J., 2007.** La pratique des TCSL en France. Terminologie des pratiques de travail du sol. Développement des TCSL et modifications du système de culture. ADEME.
- Lampurlanés J. et Cantero-Martínez C., 2006.** Hydraulic conductivity, residue cover and soil surface roughness under different tillage systems in semiarid conditions. *Soil and Tillage Research*, 85, 13-26.
- Lin H. S., McInnes K. J., Wilding L. P. et Hallmark C. T., 1999.** Effects of soil morphology on hydraulic properties: I. Quantification of soil morphology. *Soil Science Society of America Journal*, 63, 948-954.
- Mahdi M., 2003.** Contribution à l'étude de la technique de semis direct sous pivots. Mém. Ing., INA El Harrach, Alger, pp. 60.
- Manichon H., 1982.** L'action des outils sur le sol : Appréciation de leurs effets par la méthode du profil cultural. In Association Française pour l'Etude du Sol. www.afes.fr – 2010.
- Massicote D., Denis J., Lamarre G., 2000.** Guide des pratiques de conservation en grande cultures- le semis direct- Feuille 2-C. Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec.
- Monnier G., 1994.** Introduction à la simplification du travail du sol. INRA (Les Colloques n° 65) ed, Paris.

Mrabet R., 2001. Le Semis Direct : Une technologie avancée pour une agriculture durable au Maroc. MADREF/DERD/PNTTA. Transfert de technologie en agriculture, (76): 1- 4.

Miller J.J., Sweetland N.J., Larney F.J. et Volkmar K.M., 1998. Unsaturated hydraulic conductivity of conventional and conservation tillage soils in southern Alberta. Canadian Journal of Soil Science, 78, 643-648.

Oorts K., 2006. Effect of tillage system on soil organic matter stocks and C and N fluxes in cereal cropping systems on a silt loam soil in Northern France, these phd, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris.

Pomares C., 2001. Evaluation des concentrations en nitrate du sol sous deux travaux de sol et culture de maïs. Mémoire Maitre Science en Sciences de l'eau. Université du Québec, 148p.

Razafimbelo T., 2005. Stockage et protection de carbone sous systèmes en semis direct avec couverture végétale des Hautes Terres malgaches. Thèse de Doctorat, ENSAM, Montpellier.

Richard G., Boizard H., Roger-Estrade J., Boiffin J. et Guerif J., 1999. Field study of soil compaction due to traffic in northern France: pore space and morphological analysis of the compacted zones. Soil and Tillage Research, 51, 151-160.

Roger-Estrade J., Richard G., Caneill J., Boizard H., Coquet Y., Defossez P. et Manichon H., 2004. Morphological characterisation of soil structure in tilled fields: from a diagnosis method to the modelling of structural changes over time. Soil and Tillage Research, 79, 33-49.

Roger-Estrade J., Labreuche J. et Richard G., 2011. L'effet de l'adoption des techniques culturales sans labour (TCSL) sur l'état physique des sols : Conséquence sur la protection contre l'érosion hydrique en milieu tempéré. Cah. Agric., Vol 20, n°3, p 186-193.

Roper M. M. et Gupta V.V., 1995. Management practices and soil biota. Australian Journal of Soil Research, 33, 321-339.

Tourdonnet S., Chenu C., Straczek A., Cortet J., Félix I., Gontier L., Heddadj D., Labreuche J., Laval K., Longueval C., Richard G. et Tessier D., 2007. Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturales Sans Labour (TCSL) en France. Qualité du sol et biodiversité. ADEME

Souici S., 2010. Effets des différents traitements culturaux sur les propriétés physiques d'un sol limono-argileux cultivé en blé dur. Thèse de Magister en Sciences Agronomiques, ENSA El -Harrach, Alger, 113p.

Vian J.F., 2009. Comparaison de différentes techniques de travail du sol en agriculture biologique : effet de la structure et de la localisation des résidus sur les microorganismes du sol et leurs activités de minéralisation du carbone et de l'azote, PhD thesis, AgroParisTech, Paris.

Annexe I: Caractéristiques du matériel aratoire utilisé.

1. Charrue à soc réversible 1/2 tours, elle est caractérisé par :

- Nombre de socs : 2 ;
- Commande : Retournement semi-automatique ;
- Type : porté ;
- Profondeur de travail : 25 à 30 cm ;
- Largeur de travail : 75,5 cm

2. Chisel : ses caractéristiques sont les suivantes :

- Largeur de travail : 2.10 m ;
- Nombre de dents : 9 ;
- Type : porté ;
- Profondeur de travail : jusqu'à 25cm.

4. Roto Herse, elle se caractérise par:

- Largeur de travail : 300 cm ;
- Diamètre de la cage roulante : 30 Cm ;
- Type : porté ;
- Poids : 400 Kg.

5. Cover-crop, pour la reprise du labour nous avons utilisé le Cover-crop qui se caractérise par :

- Largeur de travail : 180 cm ;
- Type : traîné ;
- Nombre de disques : $8 \times 2 = 16$;
- Diamètre de disque : 610mm ;
- Poids : 640 Kg.

6. Semoirs : Deux types de semoirs ont été nécessaires pour mener à bien les essais.

- **Pour le semis classique ; nous avons utilisée un semoir en ligne : le AGRIC PSM 30 dont les caractéristiques sont les suivantes :**

- Largeur de travail : 300 cm ;
- Nombre d'éléments distributeurs : 19 ;
- Distance entre deux organes d'enterrage : 17cm ;
- Type : semi porté ;
- Système de distribution : à cannelures ;

- **Pour le semis direct ;** le semoir de semis direct est une machine permettant un semis régulier, en lignes équidistantes et à une profondeur uniforme sans labour et a travers un couvert végétal. Le semoir que nous avons utilisé de type SEMEATO SHM 13, il possède deux systèmes de distribution à cannelures, un système pour les graines de grande et moyenne dimension et un système pour les petites graines.

La distance entre le berceau et le cylindre distributeur est réglable comme pour le semoir en ligne en fonction de la grosseur des graines.



Les caractéristiques de ce semoir sont les suivantes :

- Largeur de travail : 240 cm
- Nombre d'éléments distributeurs : 13
- Distance entre rang 17 cm;
- Type : Semi porté ;
- Volume de la trémie : 270L ;
- Poids : 1 870 Kg ;
- Système de distribution : à cannelure.

Annexe II. Résultats des analyses du sol.

1. Densité apparente, densité réelle, porosité totale et sa distribution.

- Sol soumis au TC.

Horizons	Da	Dr	Pt%	Macropores %	Mésopores %	Micropores %
H1	1,46	2,67	45,3	39,6	10,2	50,2
H1	1,48	2,67	44,6	37,5	12,4	50,1
H1	1,45	2,67	45,7	38,1	11,4	50,5
H1	1,46	2,67	45,3	37,6	12,1	50,3
L3H5	1,4	2,67	47,6	43,8	8,3	47,9
L3H5	1,4	2,67	47,6	42,3	8,8	48,9
L3H5	1,42	2,67	46,8	41,4	7,2	51,4
L3H5	1,41	2,67	47,2	42,6	8,4	49,0
L1H5	1,56	2,67	41,6	18,2	30,6	51,2
L1H5	1,58	2,67	40,8	21,6	27,5	50,9
L1H5	1,53	2,67	42,7	20,9	32,6	46,4
L1H5	1,55	2,67	41,9	22,4	30,5	47,1
H6	1,5	2,67	43,8	37,3	10,6	52,1
H6	1,52	2,67	43,1	35,0	10,7	54,3
H6	1,5	2,67	43,8	34,1	11,0	54,9
H6	1,48	2,67	44,6	35,6	10,9	53,5

- Sol soumis au TS.

Horizons	Da	Dr	Pt%	Macropores%	Mesopores%	Micropores%
H1	1,44	2,67	46,1	40,11	8,83	51,07
H1	1,44	2,67	46,1	38,94	8,57	52,49
H1	1,44	2,67	46,1	38,84	8,00	53,16
H1	1,45	2,67	45,7	38,77	7,96	53,27
H5	1,42	2,67	46,8	38,92	7,72	53,36
H5	1,4	2,67	47,6	40,72	7,37	51,91
H5	1,42	2,67	46,8	38,33	9,03	52,65
H5	1,41	2,67	47,2	41,47	7,05	51,48
H6	1,52	2,67	43,1	36,56	12,14	51,31
H6	1,5	2,67	43,8	35,85	12,04	52,11
H6	1,52	2,67	43,1	33,10	13,73	53,17
H6	1,48	2,67	44,6	33,82	14,49	51,69

- Sol soumis au SD.

Horizons	Da	Dr	Pt %	Macropores %	Mesopores %	Micropores %
H1	1,39	2,67	47,94	43,92	6,11	49,97
H1	1,4	2,67	47,57	44,58	3,34	52,08
H1	1,4	2,67	47,57	44,73	5,26	50,01
H1	1,39	2,67	47,94	43,26	5,10	51,64
H5	1,46	2,67	45,32	41,14	9,08	49,78
H5	1,46	2,67	45,32	40,61	7,23	52,16
H5	1,46	2,67	45,32	41,70	7,95	50,35
H5	1,46	2,67	45,32	43,14	6,77	50,10
H6	1,5	2,67	43,82	36,56	12,14	51,31
H6	1,52	2,67	43,07	34,78	11,29	53,93
H6	1,5	2,67	43,82	35,01	12,67	52,32
H6	1,49	2,67	44,19	37,56	7,40	55,04

2. Les teneurs en eau massique aux différents pF.

- Sol soumis au TC.

Horizons	pF0	pF1,6	pF1,9	pF2,5	pF2,7	pF3,5	pF4,2
H1	46,74	44,11	40,83	32,23	28,5	22	10,12
H1	46,43	44,52	40,41	32,78	28,28	22,36	10,04
H1	46,43	44,18	40,38	32,8	28,72	22,45	10,68
H1	46,37	44,5	40	32,88	28,53	22,15	10,5
L3H5	49,12	45,54	40,41	32,38	29,21	22,6	10,88
L3H5	49,33	45,15	42,02	32,95	29,55	22,64	10,62
L3H5	48,33	45,2	42,38	32,73	30	22,92	10,62
L3H5	48,44	45,05	42,7	32,26	29,07	22,64	10,48
L1H5	47,27	46,46	45,5	40,63	29,44	22,82	10,75
L1H5	48,16	46,68	45,2	40,08	29,82	22,83	10,82
L1H5	48,62	46	45,2	40,57	28	22,66	10,12
L1H5	48,96	46,77	45,23	40,45	28,83	22,55	10,92
H6	44,95	42,3	40,1	32	28,32	22,3	10,21
H6	44,25	42,48	40,68	32,3	28,64	22,37	10,06
H6	44,05	42,38	40,22	32,43	28,68	22	10
H6	44,28	42,5	40,15	32,38	28,75	22,5	10,86

- Sol soumis au TS.

Horizons	pF0	pF1,6	pF1,9	pF2,5	pF2,7	pF3,5	pF4,2
H1	48,67	46,38	41,58	33,45	30,1	22,81	10,72
H1	48	46	41,88	33,37	30,15	22,7	10,43
H1	48,11	46	41,64	33,55	30,55	22,54	10,62
H1	48,05	46,89	41	33,53	30,55	22,94	10,6
H5	48,66	42,64	41,34	33,64	30,66	22,1	10,07
H5	48,35	42,6	41,1	33	30,22	22,13	10,65
H5	48,33	42	41,8	33,64	30,18	22,95	10
H5	49,4	42,19	41,53	33,16	30,4	23	10,24
H6	44,52	42,6	40,5	32,2	28,11	22,4	10,82
H6	44,62	42,66	40,38	32,23	28,07	22,47	10,06
H6	44,08	42,14	40,63	32,8	28,12	22,4	10
H6	44,17	42,73	40,73	32,85	28	22,38	10,7

- Sol soumis au SD.

Horizons	pF0	pF1,6	pF1,9	pF2,5	pF2,7	pF3,5	pF4,2
H1	50,0	38,7	35,6	32,8	30,4	22,7	10,9
H1	49,5	38,7	35,0	32,1	30,7	22,3	10,3
H1	50,1	38,7	35,5	32,2	30,1	22,0	10,0
H1	50,1	38,4	35,4	32,9	30,9	22,2	10,4
H5	46,5	40,6	36,1	31,5	28,3	22,2	10,2
H5	46,0	40,7	36,2	31,4	28,8	22,4	10,1
H5	46,3	40,1	36,5	31,5	28,6	22,3	10,8
H5	46,3	40,5	36,6	31,0	28,6	22,6	10,8
H6	44,5	42,6	40,5	32,2	28,1	22,4	10,8
H6	44,6	42,7	40,2	32,6	28,7	22,5	10,0
H6	44,4	42,5	40,5	32,5	28,2	22,5	10,5
H6	44,0	42,2	40,6	31,3	28,8	22,7	10,1

3. Indice d'instabilité structural (Log Is).

Blocs	TC	TS	SD
1	0,40	0,32	0,25
2	0,42	0,32	0,26
3	0,41	0,32	0,27
4	0,37	0,32	0,27

4. Evolution temporelle de l'humidité du sol.

- Sol soumis au TC.

Profondeurs (cm)	Blocs	date 1	date2	date 3	date 4	date 5
0-10	1	35,2	30,11	24,89	24,12	24,31
0-10	2	35,52	30,41	24,64	24,7	24,45
0-10	3	35,4	29,62	24,46	24,15	24,04
0-10	4	34,64	30,45	24,3	24,18	24,22
10-20	1	37,52	33,84	30,52	30,55	29,35
10-20	2	36,34	32,62	30,65	30,47	29,56
10-20	3	36,87	32,1	30,45	30,5	29,2
10-20	4	36,3	32,1	30,33	30,79	29,55
20-30	1	38,34	35	32	30,55	29,3
20-30	2	36,12	35,64	32,58	30,3	29,34
20-30	3	39,4	35,28	32,63	30,71	29,85
20-30	4	38,25	33,4	32,52	30,2	29,47

- Sol soumis au TS.

Profondeurs (cm)	Blocs	date 1	date2	date 3	date 4	date 5
0-10	1	36,13	32,53	29,5	25,24	25,46
0-10	2	36,67	32,64	29,44	25,6	25,51
0-10	3	35,6	32	29,61	25,5	25,57
0-10	4	35,95	32,7	29,75	25,32	25,13
10-20	1	37,82	34,46	31	30,38	29,11
10-20	2	37,35	34,82	31,94	30,62	29,85
10-20	3	36,4	34,15	30,47	30,42	30,17
10-20	4	36,15	35,64	31,82	30,14	30
20-30	1	39,45	35,41	30,75	32,74	29,6
20-30	2	38,7	35,28	32,68	31,25	30,11
20-30	3	37,4	34,69	33,57	32,84	29,34
20-30	4	38,18	35,81	32,23	32,52	30,28

- Sol soumis au SD.

Profondeurs (cm)	Blocs	date 1	date2	date 3	date 4	date 5
0-10	1	37,33	36,32	32,4	30,1	29,14
0-10	2	36,51	36,78	32,22	30,81	29,5
0-10	3	37,28	36,27	32,72	30,87	29,84
0-10	4	37,46	36,6	32,72	30,33	29,62
10-20	1	38,19	37,49	34,35	32,54	30,42
10-20	2	37,62	37,28	34,62	32,61	30,33
10-20	3	37,6	37,36	34,12	32,4	30,18
10-20	4	37,83	37,88	34,17	32,13	30
20-30	1	38,46	38,6	34,64	32,64	30,61
20-30	2	39,28	38,42	34,78	32,6	30,14
20-30	3	38,38	38,46	34,12	32,3	30,16
20-30	4	39,4	37,7	34,17	32,7	30,46

5. Matière organique.

Profondeurs (cm)	Blocs	TC	TS	SD
0-10	1	1,12	1,84	3
0-10	2	1,19	1,84	3,5
0-10	3	1,36	1,89	3,1
0-10	4	1,29	1,74	3,3
10-20	1	1,85	1,81	1,27
10-20	2	1,81	1,8	1,39
10-20	3	1,86	1,82	1,37
10-20	4	1,95	1,83	1,57
20-30	1	1,4	1,42	1,39
20-30	2	1,42	1,4	1,42
20-30	3	1,44	1,46	1,48
20-30	4	1,38	1,39	1,43

Annexe III. Rendement du blé et ses composantes.

- Le nombre de Plants par m².

Blocs	1	2	3	4
TS	135	120,3	140	137,6
TC	115,3	125,6	125	91
SD	213,3	175,6	196	160,6

- Le poids de mille grains (PMG).

Blocs	1	2	3	4
SD	30,2	29,8	30	28,4
TS	30,8	30,2	28,3	28,4
TC	32,2	30,8	28,3	29,5

- Le rendement en (qx/ha).

Blocs	1	2	3	4
SD	33,7	42,7	42,4	35,2
TC	30	28	28,28	29,17
TS	35,73	36,84	34,15	34,13

- **La hauteur des tiges au stade maturité.**

Blocs	1	2	3	4
TS	79,2	80,6	80,6	80,4
TC	79,6	79	79,2	75,4
SD	82,4	79,8	81,4	81,4

- **Le nombre d'épis par m² (Epis/m²).**

Blocs	1	2	3	4
TS	368,66	347,66	398,33	324,66
TC	330,33	347	310,66	291,33
SD	384,33	357,66	401	331,33

- **Le nombre d'épillets par épi.**

Blocs	1	2	3	4
TC	18	17,8	17,6	17,3
TS	18,4	16,9	17,2	17,6
SD	16,5	16,4	17,3	15,9

- **Le nombre de grains par épi.**

Blocs	1	2	3	4
TC	58,9	56,4	53,3	49,5
TS	58,6	57,2	55,5	57,3
SD	56,7	53,2	58,1	51,3