



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة

Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie

Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat LMD en Sciences de l'eau et
Agroéquipement

Thème

Analyse du comportement physico-mécaniques des sols compactés et non compactés sous l'action de deux techniques culturales et conséquences sur le développement des céréales.

Présenté par : MEBARKI Mohammed Nadhir

Devant le jury :

Président : LATATI Mourad (Professeur, ENSA El Harrach)

Directeur de thèse : FEDDAL Mohamed Amine (Maitre de conférences « A », ENSA El Harrach)

Examineurs :

MOHAMMEDI Zekari (Maitre de conférences « A », ENSA El Harrach)

BERRAYAH Mohammed (Maitre de conférences « A », université Ibn Khladoun, Tiaret)

Année universitaire : 2021/2022

Table de matière

Résumé

Abstract

المخلص

Liste des abréviations

Liste des Figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... 1

Chapitre 01 : Synthèse bibliographique

1. Problématique de la production céréalière en Algérie	5
1.1 Une lourde facture alimentaire	5
1.2 La production céréalière en Algérie	6
1.3 Les contraintes techniques liées à la production des céréales en Algérie.....	9
2. Le compactage et ses principales causes dans les sols agricoles	10
3. Rétrospective sur les techniques de travail du sol	14
3.1 La technique conventionnelle	16
3.2 L'agriculture de conservation.....	18
4. Effet des techniques de travail du sol sur les propriétés physiques et mécaniques du sol	20
4.1 Effet du travail du sol sur la masse volumique apparente, la porosité et la taille des pores.....	22
4.2 Effet des techniques de travail du sol sur l'humidité du sol.....	23
4.3 Effet des opérations de travail du sol sur la résistance pénétrométrique.....	24
5. Relation entre le travail du sol, le compactage et les propriétés du sol	25

5.1	Effet de la résistance pénétrométrique sur le développement racinaire	26
5.2	Effet du compactage des sols sur les rendements des céréales.....	28
	Conclusion bibliographique et objectifs de l'expérimentation.....	33

Chapitre 02 : L'étude de compactage des sols agricoles au laboratoire

	Introduction	37
2.1.	Matériels utilisés	37
2.1.1.	Matériel végétal	37
2.1.2.	L'unité expérimentale	38
2.1.3.	L'outil de compactage.....	39
2.2.	Méthodologie.....	40
2.2.1.	Première étape : préparation des échantillons du sol	40
2.2.2.	Deuxième étape : détermination taux de germination des trois variétés du blé dur	40
2.2.2.	Troisième étape : le remplissage des pots	42
2.2.3.	Quatrième étape : le suivi de la culture.....	43
2.2.4.	Méthode de détermination de la longueur des plantes et racines.....	44
2.2.5.	Méthode de détermination de la densité racinaire	44
2.2.6.	Choix des paramètres et indices.....	45
2.3.	Résultats et interprétations.....	45
2.4.	Etude de la compressibilité du sol au laboratoire	54
2.5.	Résultats et discussion	55
2.6.	Interprétation des résultats.....	55
	Conclusion.....	56

Chapitre 03 : Analyse de l'effet combiné du compactage et du travail du sol sur le comportement physico-mécanique d'un sol argileux et conséquences sur le développement de l'orge

Introduction et objectif de l'essai	58
3.1. Présentation du site expérimental	58
3.2. Matériel et méthodes	62
3.2.1. Présentation du protocole expérimental	62
3.2.2. Matériels d'étude	63
3.2.3. Conduite et suivi de l'étude expérimentale	66
3.3. Techniques et méthodes de mesure	71
3.3.1. Détermination de l'humidité du sol	71
3.3.2. Détermination de la résistance pénétrométrique	72
3.3.3. Détermination de la porosité	73
3.4. Méthodologie des mesures liées à la culture	74
3.4.1. Détermination de taux de levée et taux de tallage	75
3.4.2. Détermination des hauteurs et les diamètres des tiges	75
3.4.3. Détermination de la densité racinaire	76
3.4.3. Détermination du rendement estimé	77
3.5. Résultats et discussion	77
3.5.1. Effet combiné des techniques de préparation du sol et le compactage sur le comportement physico-mécanique du sol	77
3.6. Analyse statistique	87
3.6.1. L'analyse statistique de l'évolution de l'humidité, la porosité et la résistance pénétrométrique en fonction de la technique culturale et le tassement du sol	87

3.6.2. La relation entre Rp, H% et n%	88
3.8. Effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur le développement de la plante	91
3.8.1. Effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur le taux de levée et le nombre d'épis / ²	91
3.8.2. Effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur la longueur et le diamètre des tiges	92
3.8.3. Effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur le nombre des grains par épis et le poids de 1000 grains	94
 <i>Chapitre 04 : Analyse du comportement d'un sol argileux limoneux sous l'action de trois techniques de mise en place d'un blé dur (Triticum Durum) dans la zone de la Mitidja</i>	
Introduction	97
4.1. Caractéristiques du site d'essai	97
4.1.1. Description et localisation du site expérimental	97
4.1.2. Conditions climatiques de la campagne d'essais.....	97
4.1.3. Caractéristiques pédologiques des parcelles d'essais	97
4.2. Protocole expérimental suivi	98
4.3. Les techniques de travail du sol étudiées.....	99
4.3.1. Travail conventionnel TC	99
4.3.2. Travail minimum TM	99
4.4. Résultats et Discussion	100
4.4.1. Variation de l'humidité de sol en fonction de la profondeur et du stade du blé dur pour les trois techniques (TC, TM, SD).....	100
4.4.2. La variation de la porosité en relation avec la profondeur et les stades de développement du blé dur	101

4.4.3. Variation de la résistance pénétrométrique en fonction de la profondeur et du stade de développement du blé dur pour les trois techniques culturales.....	103
4.4.4. Relation entre « Rp » et « n ».....	105
4.4.5. La relation entre l'humidité et la porosité.....	105
4.4.6. Effet des techniques culturales sur la densité racinaire.....	106
4.4.7. La variation de la teneur relatif en eau.....	107
4.4.8. Variation de la matière sèche en fonction des stades végétatifs	109
4.4.9. L'influence des techniques culturales sur les composantes de rendement	111
Conclusion.....	115
Conclusion générale	117
Références bibliographiques	121
Les Annexes	

Remerciement

*Je tiens d'abord à remercier **Allah**, de m'avoir donné la santé, le courage et la patience pour terminer ce travail.*

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à toute ma famille : A mes chers parents qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui. Je ne vous remercierai jamais assez pour votre présence et votre dévouement.

*J'ai beaucoup de plaisir à remercier mon directeur de thèse Monsieur **FEDDAL Mohammed Amine** qui m'a accompagné depuis quatre ans, avec sa confiance, sa complémentarité, sa disponibilité, son enthousiasme et ses idées pour que cette thèse puisse être menée à bien. Ce travail est marqué de son empreinte : j'en retire un profond respect et une grande fierté.*

*Je tiens aussi à remercier Monsieur **LATATI Mourad**, Professeur à l'ENSA, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.*

*Je tiens à remercier Monsieur **MOHAMMEDI Zekari**, maître de conférence « A », à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de el harrach, et Monsieur **BERRAYAH Mohammed**, maître de conférence « A », à université Ibn Khaldoun de Tiaret, qui ont accepté d'examiner mon travail de thèse et contribuer sans doute à son enrichissement.*

*Je tiens à remercier le directeur de l'ITGC de Oued Smar, **M. Mustapha Bouhaouchine** pour avoir mis à notre disposition tous les moyens nécessaires pour mener à bien cette expérimentation.*

Je souhaite remercier mes frères-collègues M. ECHCHERKI SMAIN et M. YACHI Abdelouahid, mes amis depuis onze ans, pour leurs soutiens et encouragements.

Je souhaite remercier tous mes collègues du Génie Rural, en particulier ceux du machinisme agricole pour leurs soutiens et encouragements. Je profite de cette thèse pour remercier tous mes enseignants de l'ENSA et du département Génie Rural de l'ENSA. Que tous ici reçoivent l'expression de ma profonde et sincère gratitude

Résumé

Cette étude a pour but d'évaluer l'effet du compactage et les différents systèmes de travail du sol sur les paramètres physico-mécaniques, et les conséquences sur le développement de l'orge (*Hordeum vulgare*) et du blé dur (*Triticum turgidum L. var. durum*) semés dans un climat méditerranéen dans différentes textures du sol. Pour répondre à cet objectif, trois essais sont réalisés au laboratoire de résistance des matériaux et à la station expérimentale situés à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique, et à l'Institut Technique des Grandes Cultures de Oued Smar. Les résultats des essais montrent clairement qu'il y a un effet significatif du compactage sur le développement du blé dur et de l'orge, le développement du système racinaire et inversement proportionnel au degré de compactage, la valeur de la densité racinaire du blé passe de (3.5g/dm^3) sur un sol non compacté en (2g/dm^3) sur un sol compacté. L'analyse des résultats des paramètres physico-mécaniques du sol montre qu'il y a un effet significatif du compactage par passages des roues sur le sol, la porosité a diminué fortement dans les sols labourés dans les horizons superficiels. La résistance pénétrométrique atteint des valeurs maximales (3500 kpa) après les passages des roues du tracteur dans les sols labourés, contrairement en semis direct, la résistance à la pénétration augmente légèrement après compactage, sa valeur ne dépasse pas (2100 kpa). Les résultats de la teneur en eau montrent que le semis direct avoir une meilleure rétention d'eau par rapport au travail conventionnel, l'humidité du sol varie en diminuant légèrement en semis direct, et fortement en travail conventionnel au niveau du premier horizon des sols compactés. Les résultats montrent aussi que le compactage et la technique culturale ont un effet sur le développement de la plante, le système racinaire se développe bien dans les sols labourés non compactés, les rendements estimés de l'orge dans les sols compactés (29.9 qx/ha) sont les plus faibles, et les meilleurs rendements (39.7 qx/ha) ont été obtenus dans les sols labourés non compactés. Le rendement du blé est le meilleur en travail conventionnel (86qx/ha), et sur les parcelles de travail minimum, le rendement obtenu est de (74 qx/ha). Les analyses statistiques montrent que la densité racinaire est fortement corrélée avec la résistance. Dans les sols humides, le risque de compactage devient de plus en plus grand. En conséquence, cette étude a bien confirmé l'effet de compactage dû aux passages des engins agricoles et les techniques de travail du sol sur les paramètres physico-mécaniques des sols et les rendements des céréales.

Mots clés : Compactage, techniques culturales, sol, système racinaire, le rendement.

Abstract

The goal of this study is to see how compaction and different tillage strategies affect the physico-mechanical characteristics of the soil and how that affects the development of barley (*Hordeum vulgare*) and durum wheat (*Triticum turgidum L. var. durum*) seeded in different soil textures in a Mediterranean environment. To achieve this goal, three experiments were being conducted at the materials resistance laboratory and the experimental station at the High National Agronomic School, as well as the Technical Institute for Field Crops in Oued Smar. The test results clearly show that compaction has a significant effect on the development of durum wheat and barley, as well as the development of the root system. The value of the root density of wheat passes from ($3.5\text{g}/\text{dm}^3$) on uncompacted soil to ($2\text{g}/\text{dm}^3$) on compacted one and is inversely proportional to the degree of compaction. The results of the physico-mechanical parameters of the soil demonstrate that compaction by wheel passages has a substantial influence on the soil, and the porosity of the soils tilled in the superficial horizons was massively reduced. The penetrometer resistance reaches maximum values (3500 kpa) when the tractor's wheels pass through the plowed soils, whereas in direct seeding, the resistance to penetration increases after compaction and does not exceed the value of direct seeding (2100 kpa). The results of the water content demonstrate that direct sowing retains more water than conventional tillage. At the level of the first soil horizon, soil moisture varies marginally in direct seeding and dramatically in conventional tillage. The results also show that soil compaction and cultivation technique have an impact on plant development, that the root system develops well in uncompacted plowed soils, that the estimated yields of barley in compacted soils (29.9 qx/ha) are the lowest, and that the best yields (39.7 qx/ha) are obtained in uncompacted plowed soils. Wheat yields are the highest in conventional tillage plots (86 qx/ha), and lowest in minimum tillage plots (74 qx/ha). Root density is closely connected with penetrometer resistance. Compaction becomes more prevalent in wet soils. As a result, our study has established the impact of compaction caused by agricultural machinery and tillage procedures on soil physico-mechanical parameters and grain yields.

Keywords: Compaction, cultivation techniques, soil, root system, yield.

الملخص

الهدف من هذه الرسالة هو تقييم آثار انضغاط التربة وأنظمة الحراثة المختلفة على مسامية التربة، المخزون المائي للتربة ومقاومتها للاختراق ، والعواقب المترتبة على نمو الشعير والقمح في مناخ البحر الأبيض المتوسط في قوام التربة المختلفة.

الاختبارات التي أجريت في مختبر و في المزرعة المركزية تابعين للمدرسة الوطنية العليا للفلاحة بالحراش، وفي المعهد التقني للزراعات الواسعة في واد السمار ، أظهرت النتائج بوضوح أن هناك تأثيراً كبيراً للضغط على تطوير القمح الصلب ، وتطور الجذور الذي يتناسب عكسياً مع درجة الضغط ، حيث تتغير قيمته من (3.5 غ/ دسم³) في التربة العادية إلى (2 غ / دسم³) في التربة المضغوطة. في التربة الرطبة ، يزداد خطر الانضغاط. و في ظروف الحقل المفتوح ، كان لممرات المختلفة للجرار تأثير على التربة ، خاصة على المسامية والرطوبة ومقاومة قياس الاختراق. بعد الضغط بواسطة العجلات فوق التربة انخفضت مسامية التربة بشكل حاد في التربة المحروثة ، و إنخفضت قيمتها من (40٪) إلى (22٪) في الطبقات السطحية للتربة. تصل مقاومة مقياس الاختراق إلى القيم القصوى بعد تمرير عجلات الجرار على التربة المحروثة في الظروف الرطبة بقيمة 3500 كيلو باسكال، أما في البذر المباشر تزداد مقاومة الاختراق بشكل طفيف بعد الضغط ، ولا تتجاوز قيمتها 2100 كيلو باسكال. تحتفظ التربة في تقنية البذر المباشر بالمياه بشكل أفضل مقارنة بالتربة المحروثة بعد الضغط. و تختلف رطوبة التربة قليلاً في البذر المباشر ، وبقوة في الحراثة التقليدية على مستوى الطبقة السطحية ، حيث تتغير قيمتها من (17٪) إلى (7٪). إن ضغط عجلات الآلات الزراعية و تقنيات الزراعة لها تأثير على نمو النبات. تطورت الجذور بشكل كبير في الأراضي المحروثة وغير المضغوطة ، التربة في تقنية البذر المباشر وغير المضغوطة كانت النتائج المقدره هي الأقل ب 29.9 قنطار في الهكتار الواحد. ، وتم الحصول على أفضل إنتاجية في الأراضي المحروثة وغير مضغوطة ب بقيمة 39.7 قنطار في الهكتار الواحد. تم تطور الجذور بدرجة عالية في الأرض المحروثة مقارنة بالأرض المحروثة التي تعرضت للضغط. كنتيجة، أثبتت دراستنا تأثير الضغط الناجم عن الآلات الزراعية و مختلف تقنيات خدمة التربة و الحرث على الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية للتربة و تأثيرها على إنتاج الحبوب.

الكلمات المفتاحية: ضغط التربة، التقنيات الزراعية ، التربة ، نظام الجذور ، المحصول.

Liste des abréviations

TC	Travail conventionnel
TM	Travail minimum
NT	Non travail
CP	Préparation avec chisel
AC	Agriculture de conservation
MP	Travail avec charrue à soc
Rp	Résistance à la pénétrométrie
SNC	Sol non compacté
SCT	Sol compacté totalement
SCP	Sol compacté en profondeur
SCS	Sol compacté en surface
ITGC	Institut technique des grandes cultures
SD	Semis direct
MAP	mono-ammonium-phosphate-granule.
NPK	azote P= phosphor : K= potassium
n%	Porosité du sol
Da	Densité apparente
Dr	Densité réelle
PMG	Poids de mille grains
FAOSTAT	Food and Agriculture Organization of United Nations – Statistic Division

Liste des Figures

Figure 1: Évolution de la production céréalière entre 1961 et 2011.	6
Figure 2: Les principales causes du compactage des sols dans les champs agricoles	11
Figure 3 : (A) : Effet de la charge sur l'essieu sur la profondeur de compactage. (B) : L'effet de l'humidité du sol sur la profondeur de compactage.....	13
Figure 4: Divers outils de travail du sol : (a) charrue réversible tri-socs. (b) Strip tiller	15
Figure 5: Pratiques de non-labour : (a) NT vs. CT et (b) semoir de maïs NT.....	16
Figure 6: Articles publiés sur les effets du travail du sol et gestion sur les propriétés hydrauliques du sol et les propriétés pertinentes variabilité spatio-temporelle. (a) Série chronologique d'articles trouvés par an ; et (b) les principales revues sources.....	21
Figure 7: pot en plexiglass réalisé par logiciel Solidworks 2016.....	38
Figure 8: Pots en plexiglas	39
Figure 9: la presse hydraulique	39
Figure 10 : taux de germination des trois variété du blé	41
Figure 11: sol non compacté	42
Figure 12: sols compactés en surface	43
Figure 13 : la serre agricole de l'essai expérimental	43
Figure 14 : mesure de la densité racinaire.....	44
Figure 15: la variation de la hauteur des tiges du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (<i>variété mohamed ben bachir</i>).....	45
Figure 16 : la variation de la longueur des racines du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (<i>variété mohamed ben bachir</i>).....	46

Figure 17 : la variation de la densité racinaire du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété <i>mohamed ben bachir</i>)	47
Figure 18: la variation de la hauteur des tiges du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété <i>boutaleb</i>).....	48
Figure 19: la variation de la longueur des racines du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété <i>boutaleb</i>).....	49
Figure 20: la variation de la racinaire du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété <i>boutaleb</i>)	50
Figure 21: la variation de la hauteur des tiges du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété <i>bousselam</i>).....	51
Figure 22: La variation de la longueur des racines du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété <i>bousselam</i>).....	52
Figure 23: la variation de la racinaire du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété <i>bousselam</i>)	53
Figure 24: la variation de la densité apparente en fonction de la teneur en eau.....	55
Figure 25 : Situation géographique de l'institut technique des grandes cultures (ITGC) Oued Smar	59
Figure 26: Le diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN (La région de Dar El-Beida)	59
Figure 27 : les précipitations enregistrés l'année 2020-2021	60
Figure 28: Triangle des textures USDA	61
Figure 29: Semence de la variété Fouara	66
Figure 30: schéma du dispositif expérimental.....	67
Figure 31: parcelle non compactée en travail conventionnel	68
Figure 32: parcelle après compactage	69
Figure 33: Semis avec le semoir en ligne.....	69

Figure 34: Herbicide total à base de glyphosate 36 SL.....	70
Figure 35: Prélèvement des échantillons du sol pour déterminer l'humidité du sol	72
Figure 36: Pénétrromètre statique.....	73
Figure 37: détermination de taux de tallage de l'orge sur terrain	75
Figure 38 : Détermination des hauteurs et les diamètres des tiges.....	76
Figure 39: Enlèvement des racines.....	76
Figure 40: Détermination du rendement	77
Figure 41: variation de l'humidité du sol en relation avec la profondeur et le compactage au stade de levée	78
Figure 42: variation de l'humidité du sol en relation avec la profondeur et le compactage au stade de tallage	79
Figure 43: variation de l'humidité du sol en relation avec la profondeur et le compactage au de stade de l'épiaison	79
Figure 44: variation de porosité du sol en relation avec la profondeur et le compactage au stade levée	81
Figure 45: variation de porosité du sol en relation avec la profondeur et le compactage au stade tallage.....	81
Figure 46: variation de porosité du sol en relation avec la profondeur et le compactage au stade épiaison	82
Figure 47: variation de porosité du sol en relation avec la profondeur et le compactage au stade maturation.	82
Figure 48: variation de la pénétrrométrie du sol en relation avac la profondeur et le compactage au stade levée	84
Figure 49: variation de la pénétrrométrie du sol en relation avac la profondeur et le compactage au stade tallage	85

Figure 50: variation de la pénétrométrie du sol en relation avec la profondeur et le compactage au stade épiaison.....	85
Figure 51: variation de la pénétrométrie du sol en relation avec la profondeur et le compactage au stade maturation.....	86
Figure 52: le coefficient normalisé de la variable H%	90
Figure 53: Effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur le taux de levée.....	91
Figure 54: Effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur le tallage/m ²	92
Figure 55: Effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur la longueur des tiges.....	93
Figure 56: Effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur le diamètre des épis	93
Figure 57: Effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur le nombre des grains par épi.....	94
Figure 58: Effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur le poids de 1000 grains.....	95
Figure 59: le dispositif adopté.....	98
Figure 60: variation de l'humidité de sol en relation avec la profondeur et le stade végétatif pour les trois techniques.....	100
Figure 61: variation de la porosité en relation avec la profondeur et le stade de développement du blé dur.....	101
Figure 62: variation de la porosité en fonction de la profondeur.....	102
Figure 63: variation de la résistance pénétrométrique en relation avec les stades végétatifs pour les trois techniques.....	103
Figure 64: variations de la résistance pénétrométrique en relation avec la profondeur du sol pour les trois techniques culturales	104

Figure 65: variation de la densité des racines en relation avec les stades végétatifs	106
Figure 66: la teneur relative en eau en relation avec les stades végétatifs pour les trois techniques culturales	108
Figure 67: la variation de la matière sèche des plantes de blé dur en fonction des stades végétatifs pour les trois techniques.	109
Figure 68: comparaison de la matière sèche pour les trois techniques	110
Figure 69: la variation de la matière sèche des épis de blé dur en fonction de deux derniers stades pour les trois techniques.	110
Figure 70: la variation de nombre des épis/m ² en relation avec les techniques culturales....	112
Figure 71: variation du nombre de grains par épi en fonction des techniques culturales	113
Figure 72: la variation PMG en relation avec les techniques culturales	114
Figure 73: le rendement estimatif du blé dur	114

Liste des tableaux

Tableau 1: Analyse des échantillons du sol utilisé pour l'essai	40
Tableau 2 : taux de germination des échantillons de 100 grains <i>mohamed ben bachir</i>	41
Tableau 3: taux de germination de 10 échantillons de 100 grains <i>variété boutaleb</i>	41
Tableau 4: taux de germination de 10 échantillons de 100 grains <i>variété Bousselam</i>	42
Tableau 5: Analyses pédologique du sol de la parcelle d'essais	61
Tableau 6: Profondeur et type de labour.	68
Tableau 7: Analyses réalisés au laboratoire et leurs méthodes	71
Tableau 8: résultats des analyses statistiques :	88
Tableau 9: Analyse de la variance de Rp, H% et n%	88

Introduction générale

L'Algérie subit depuis un demi-siècle une forte dynamique démographique qui a rompu divers équilibres économiques, sociaux et naturels, et a induit une haute pression sur les ressources agricoles disponibles. Résultat, le pays connaît actuellement un déséquilibre important de la balance commerciale agricole, conduisant à une dépendance alimentaire extrêmement forte vis-à-vis de l'étranger, notamment pour les céréales. (**Chabane et Boussard, 2012**).

Aujourd'hui, l'écart entre offre et demande céréalière s'accroît de plus en plus et l'essentiel des consommations des céréales (70%) est importé. Les rendements des céréales demeurent aussi bas qu'aléatoires oscillant entre 8 et 15 q/h. Ces faiblesses actuelles des rendements perdurent depuis l'indépendance et bien avant (**Chabane et Boussard, 2012**).

Les céréales en Algérie sont essentiellement cultivées en pluviale, dépendant directement des précipitations qui fluctuent fortement d'une année à l'autre. Ces conditions pluviométriques constituent une première explication de la faiblesse des rendements dans ces zones. Depuis les 50 dernières années, les pratiques agricoles ne cessent de s'intensifier dans le but d'augmenter la productivité et de minimiser les coûts de production. Cela concerne notamment l'utilisation massive d'intrants (apports d'engrais et de pesticides) et l'augmentation de la mécanisation (augmentation de la puissance des engins, systématisation du travail du sol intensif). En conséquence, le sol subit certaines menaces dont on pense qu'elles pourraient aboutir à une altération de ses fonctions agronomiques et environnementales. Il s'agit notamment de la diminution du taux de matières organiques et de la biodiversité, de l'augmentation des phénomènes d'érosion et compactage des sols agricoles (**Lefebvre, 2010**).

Le compactage des sols, est, si l'on excepte le cas des prairies sur-pâturées, dû à la mécanisation des activités agricoles et forestières qui impliquent des passages d'engins lourds en conditions humides. Ce phénomène est, avec l'érosion, un processus majeur de dégradation physique des sols en Europe. Une superficie de 33 millions d'hectares serait actuellement concernée, soit 4 % des terres (**Amara et al., 2008**), contre 12 % pour l'érosion hydrique.

L'impact du tassement des sols varie fortement suivant le type de système de culture. En grande culture, les pressions exercées sont faibles (30 kPa) lors du semis ou de la préparation du sol. Elles sont très fortes lors des récoltes et de leur transport (150 voire 200 kPa). Dans les vignobles, les pressions sont moyennes (60 kPa) à fortes (100 kPa), mais certains gros

porteurs peuvent présenter des pressions très fortes (280 kPa). En forêts, les engins utilisés exercent des pressions moyennes (60 kPa) à très fortes (190 kPa) pour abattre ou débarder le bois (**Roger-Estrade et al., 2011**).

Depuis quelques années, on assiste à un renouvellement de l'intérêt porté à ce problème. En effet, cette dégradation de la qualité des sols agricoles est un risque qui concerne désormais l'ensemble des sols dans le monde (du fait de la généralisation de la mécanisation) et qui entraîne, outre une baisse de la production, un accroissement des impacts environnementaux de l'agriculture : accroissement du lessivage des nitrates, des émissions de protoxyde d'azote participant au changement climatique, du ruissellement et de l'érosion des sols (**Bessou et al., 2010**)

Par ailleurs, les évolutions actuelles des systèmes de culture remettent le compactage au cœur des préoccupations. Ainsi, on observe en grande culture, une tendance à la diminution du travail du sol, motivée par le souci de baisser les coûts de production et les charges de mécanisation, pour protéger les sols de l'érosion ou afin de favoriser le stockage du carbone en diminuant la vitesse de minéralisation de la matière organique. Or, cela n'est possible sans prendre trop de risques qu'en maîtrisant le tassement des sols. En effet, en simplifiant le travail du sol, on limite les possibilités de régénérer la structure grâce à la fragmentation par les outils. Enfin, des inquiétudes existent concernant l'irréversibilité de la dégradation des sols sous l'effet de la répétition des interventions en conditions humides (**Guy, 2012**).

Deux types de compactage des sols agricoles peuvent être distingués, le compactage induit par le passage de machines agricoles (le compactage du sol sous le passage de roues) et le compactage induit par les techniques de travail du sol (la semelle de labour). Dans les deux cas, les principaux facteurs influençant le tassement sont : les propriétés du sol (la teneur en eau, la texture et la structure, et la teneur en matière organique), les caractéristiques des machines (poids, dimensions et nombre des pneus), et le régime de fonctionnement des machines par exemple la vitesse de conduite et la pression des pneus (**Nawaz et al., 2013**). Le compactage du sol se voit aujourd'hui favorisé par la mécanisation agricole avec l'utilisation de machines agricoles de plus en plus lourdes et la mise en place de systèmes de cultures nécessitant des récoltes et épandages pendant la saison humide (**Batey 2009 ; Schjønning et al., 2018**).

Les machines agricoles lourdes endommagent les agrégats du sol, augmentent la densité et la teneur en humidité du sol et diminuent la porosité et la perméabilité du sol (**Aikins et**

Afuakwa, 2012 ; Somasundaram et al., 2018). Les principaux facteurs qui contribuent au compactage du sol sont les charges lourdes sur les roues et le nombre de passages du tracteur dans le champ (**Augustin et al., 2020**). Le compactage du sol compromet l'aération et la capacité de rétention d'eau du sol, et induit des changements dans ses propriétés chimiques et biologiques (**Ernst et Emmerling, 2013 ; Moinfar et al., 2021**), entraînant une dégradation du sol et une diminution des rendements des cultures (**Wozniak, 2020 ; Derpsch et Friedrich, 2009 ; Shah et al., 2017**). Les effets néfastes du compactage du sol ne sont pas visibles uniquement dans la couche arable. Des couches de sol plus profondes sont également compactées, ce qui peut conduire à la formation de semelles de labour très difficiles à éliminer (**Botta et al., 2018**). Dans l'agriculture contemporaine, on cherche à remplacer les labours énergivores par des labours simplifiés, à réduire le nombre et l'intensité des travaux de labour et d'ameublissement, voire à supprimer totalement ces pratiques (**Orzech et Zaluski, 2020**). Cependant, l'adoption des systèmes non-labour à long terme, peut provoquer aussi des couches compactées jusqu'à 20 cm, caractérisées par une densité apparente élevée, une faible porosité et une résistance mécanique élevée.

Dans ce contexte, et pour promouvoir le développement d'une agriculture durable, les effets combinés du compactage du sol, et du travail conventionnel et simplifié du sol, devraient être étudiés avec la plus grande attention, pour concevoir des systèmes de culture qui maximisent les rendements et minimisent la dégradation du sol.

Le but de la présente thèse est d'évaluer les effets du compactage du sol et de différents systèmes de travail du sol sur la densité apparente, la teneur en eau du sol, et la résistance pénétrométrique, et les conséquences sur le développement de l'orge et du blé semés dans un climat méditerranéen dans différentes textures du sol.

Les questions de la problématique de cette recherche se définissent comme suit:

- Y a-t-il un effet de l'interaction du travail du sol avec le compactage sur le comportement physico-mécanique du sol?
- Quelle est l'impact de l'état structural créé par le passage des différents outils de travail du sol sur le développement racinaire et le développement de la partie aérienne du blé dur et l'orge?

Cette thèse s'organise autour de quatre chapitres. **Le chapitre 01** est une synthèse bibliographique centrée sur la production céréalière en Algérie, le compactage des sols agricoles et ces conséquences, rôle et importance des techniques de préparation du sol dans la

variation du tassement des sols agricoles, et en fin, l'impact de l'état structural du sol sur le développement racinaire des plantes.

La partie expérimentale s'articule en trois chapitres :

Le chapitre 02 a porté sur l'étude de compactage des sols agricoles au laboratoire, il s'agit d'une part, d'analyser l'effet de l'intensité du compactage sur la structure du sol, et conséquences sur le développement racinaire de trois variétés du blé dur, et d'autre part, une étude de la compressibilité du sol en fonction de la variation de l'humidité.

Le chapitre 03 de la partie expérimentation a porté sur l'analyse de l'effet combiné du compactage du sol et des techniques culturales (travail conventionnel et semis direct) sur le comportement physico-mécanique du sol et son impact sur les caractéristiques morphologiques de l'orge, ainsi que sur le développement racinaire et le rendement ; Cette expérimentation a été menée à l'ITGC de Oued Smar.

Le chapitre 04 de l'expérimentation a porté sur l'analyse de l'effet des techniques culturales sur les paramètres de production du blé. Cette expérimentation a été menée à la ferme centrale de l'ENSA.

CHAPITRE 01

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 01 : Synthèse bibliographique

1. Problématique de la production céréalière en Algérie

Depuis 1962, date d'indépendance de l'Algérie, le pays a connu divers déséquilibres économiques, sociaux et naturels causés entre autres, par une forte dynamique démographique. Une des conséquences de cette pression démographique se vérifie à travers le déséquilibre des ressources agricoles, qui a conduit à une dépendance alimentaire extrêmement forte vis-à-vis de l'étranger, notamment pour les céréales. Aujourd'hui, l'essentiel de ces céréales est importé et l'écart entre offre et demande s'accroît de plus en plus. (in **Benhalima, 2019**)

1.1 Une lourde facture alimentaire

Les importations algériennes de céréales, de semoule et de farine ont augmenté de 8,5% et la facture d'importation de laits et matières premières de produits laitiers a connu une hausse de 1.1% en valeur au premier trimestre 2018, d'après les chiffres officiels du (**CNIS, 2018**). Les dépenses globales pour les importations alimentaires ont diminué de 0,2% à 2,245 milliards de dollars, contre 2,25 milliards de dollars, selon les mêmes chiffres.

Dans le détail, sur les 2,245 mds usd d'importations alimentaires globales, les six principaux produits alimentaires (céréales, laits, sucres et sucreries, café et thé, légumes secs et viandes) ont été importés pour 1,676 mds usd au 1er trimestre 2018 contre 1,717 mds usd au même trimestre 2017, en baisse de près de 41 millions usd, correspondant à un recul de 2,4% (**CNIS, 2018**).

Toutefois, même si la facture globale a enregistré une légère baisse par rapport à l'année dernière. Les chiffres des douanes montrent que la facture des céréales, semoule et farine, représentant plus de 36% des importations alimentaires de l'Algérie, a grimpé à 816,2 millions usd contre 752,5 millions usd, soit une augmentation de près de 64 millions de dollars (+8,5%). Et les importations des laits et matières premières des produits laitiers ont également enregistré une hausse en s'établissant à 415,84 millions usd contre 411,38 millions usd, en hausse de près de 4,5 millions usd (**CNIS, 2018**).

L'Algérie, qui compte de plus en plus parmi les pays vulnérables au vu de sa capacité financière qui diminue de plus en plus à causes des chutes des prix de pétrole, est menacée par l'augmentation incontrôlée de sa facture alimentaire. L'Algérie qui importe près de 80% de sa consommation alimentaire, figure depuis 2005, parmi les dix principaux pays importateurs de produits alimentaires au niveau mondial, d'où une dépendance marquée à l'égard du marché international.

1.2 La production céréalière en Algérie

La production de céréales en Algérie est marquée par une forte irrégularité, elle-même conditionnée par les aléas climatiques. Ainsi, sur les 40 dernières années, on enregistre un écart de 1 à 5 entre une année calamiteuse (9,7 millions de qx en 1994) et une année d'abondance (52,5 millions de qx en 2009). Cependant, les progrès technico-économiques, s'ils ne parviennent pas à stabiliser la production du secteur, ont permis de l'augmenter significativement : la moyenne décennale a ainsi presque doublé entre 1981-90 (18,2 millions de qx) et 2001-2010 (34,9 millions de qx), avec une progression régulière qui a permis d'accompagner la progression démographique (**Rastoin et Benabderrazik, 2014**).

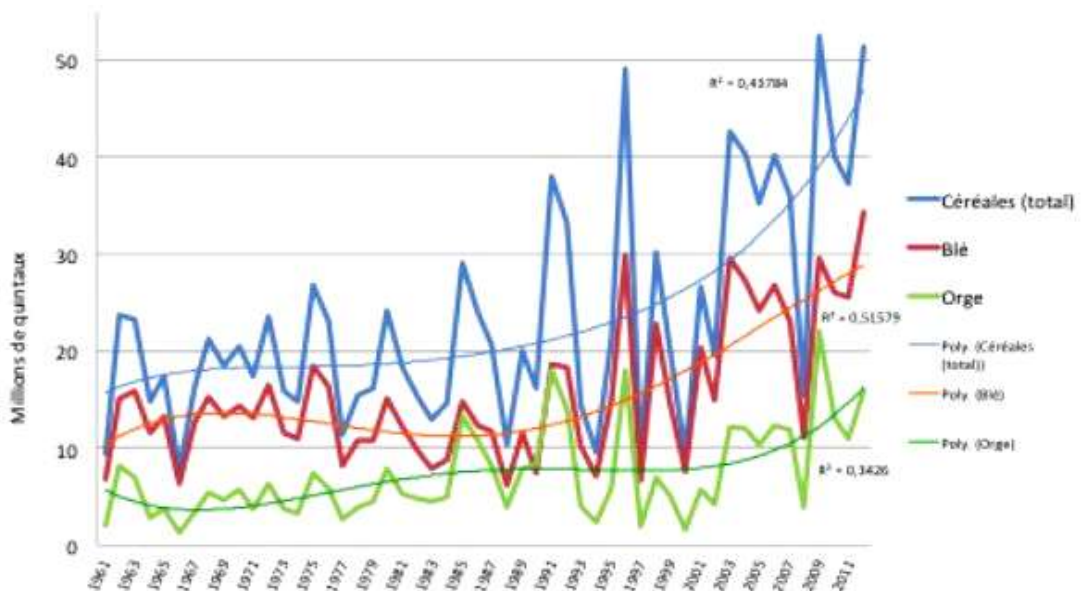


Figure 1: Évolution de la production céréalière entre 1961 et 2011.

Source : (FAOSTAT, 2013)

La production moyenne des céréales des 5 dernières années (2008 à 2012), qui a légèrement dépassé 32 millions de quintaux selon **(FAO, 2013)** se répartit de la façon suivante :

- Blé, 19 millions de qx (60%)
- Orge, 13 millions de qx (40%)

Le blé dur reste ainsi la céréale prépondérante en Algérie. Généralement bien adapté aux conditions locales, sa production progresse au même rythme que celle du blé tendre (+ 47% entre les moyennes quinquennales 2000-2004 et 2008-2012), contre + 84% pour l'orge, qui reste plus importante que le blé tendre, à plus de 13 millions de quintaux en 2008-2012, contre 8 pour le blé tendre et 19 pour le blé dur **(Rastoin et Benabderrazik, 2014)**.

En dépit d'indéniables progrès, les rendements céréaliers demeurent faibles et très irréguliers : 13,5 q/ha pour le blé en moyenne sur 2001-2010 (le blé dur, mieux adapté aux conditions agro-climatiques locales bénéficie de rendements sensiblement supérieurs à ceux du blé tendre). Et 13,2 pour l'orge, ce qui se situe loin derrière la productivité des pays méditerranéens de l'Europe, et s'explique à la fois par des causes naturelles (sol et climat), techniques (semences, pratiques culturales), et humaine **(Rastoin et Benabderrazik, 2014)**. La production nationale des céréales a connu une baisse notable en raison d'une faible pluviométrie, estimée à 33 millions de quintaux pour la saison 2015-2016 contre 40 millions de quintaux l'an dernier, selon un premier bilan annoncé par le ministère de l'Agriculture, du développement rural et de la pêche **(MADRP, 2016)**.

Le ministère de l'agriculture du développement rural et de la pêche (**MADRP, 2016**), a indiqué que la baisse de la production céréalière (blé tendre et dur et orge) estimée à 11 % est due à "une série de facteurs dont la sécheresse qui a frappé certaines régions céréalières notamment Tiaret, Sidi Belabbes, Ain Temouchent à l'ouest et Tebessa à l'est, il indique par ailleurs que la wilaya de Tiaret une des plus importantes wilayas céréalières a été très touchée par le givre. La production céréalière a régressé depuis le niveau record atteint lors de la saison agricole 2008-2009 avec 61,2 millions de quintaux pour atteindre 45 millions de quintaux en 2010, 45,42 en 2011 avant d'enregistrer une hausse de 51,2 millions de quintaux en 2012 et une baisse de 49,1 millions de quintaux en 2013. Elle connaîtra une nouvelle baisse en 2014 avec 35 millions de quintaux.

Après la sécheresse enregistrée au début de l'hiver dernier, les quantités de pluies tombées en février dernier ont permis de sauver la saison céréalière notamment après la deuxième campagne de semailles en janvier. **(MADRP, 2016)**

Le retour des précipitations durant les mois de février et mars a permis d'enregistrer une récolte céréalière de qualité contrairement à la campagne précédente marquée par une faible pluviométrie qui a affecté également la qualité des céréales et par conséquent le rendement de la moisson. Par ailleurs, l'Institut technique des grandes cultures avait affirmé que près d'un (1) million d'hectares semés en céréales pour la campagne 2016 ont été perdus suite au déficit hydrique enregistré durant l'hiver dernier. Ce stress hydrique a fait que plus d'un tiers de la superficie ensemencée se trouve sinistré et perdu. Donc la production qui sera récoltée représente les deux tiers de la superficie semée laquelle est estimée à 3,3 millions hectares. En outre, des gelées (en dessous de 0°) observées début mai à Tiaret, Tissemsilt et Chlef ont accru les superficies sinistrées puisque "les plantes ont été complètement éclatées". Par ailleurs, la campagne 2016 s'est caractérisée par une hausse à 2,4 millions de quintaux (contre 2,1 millions de quintaux en 2015) des quantités de semences certifiées qui ont été distribuées aux agriculteurs, ayant permis de contrebalancer relativement l'impact du stress hydrique. **(MADRP, 2016).**

Malgré l'amélioration des productions des céréales en général et du blé en particulier, le secteur agricole est souvent incapable de faire face à la croissance de la demande en blé. Cette croissance de demande est liée essentiellement aux changements des habitudes alimentaires et à l'élévation des niveaux de vie. Avec plus de 203 kg/personne et par an **(FAOSTAT, 2005 in Chabane, 2011)**, l'agriculture algérienne est structurellement inapte à satisfaire une demande de plus en plus importante qui a classé l'Algérie en 2008 au quatrième rang au monde des pays importateurs du blé, après l'Europe des 27, le Brésil et l'Égypte. La demande de blé en Algérie a été multipliée par 5 depuis 1962 pour consommer en 2010 les 1,3% de la production mondiale du blé, criant ainsi un déficit chronique entre offre et demande.

Les conjectures futures n'indiquent pas d'amélioration. D'après les prévisions du secrétariat de la Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement, la demande des céréales (en particulier le blé) en Algérie, connaîtra une augmentation de plus de 60% d'ici 2020. Cette situation risque d'accentuer plus si on prend en considération la spécification de la consommation alimentaire en Algérie qui est déterminée essentiellement par deux facteurs.

D'abord par le changement des régimes alimentaires de la population et ensuite par l'augmentation des quantités consommées.

Ce qui nous pousse à se questionner : pourquoi l'Algérie n'arrive pas à atteindre son autosuffisance en matière de céréale ?

Les contraintes qui entravent la production du blé en Algérie sont celles que subit toute la filière céréalière, les aborder revient à analyser les paramètres de la production à caractère naturel, socioéconomique et structurel qui auraient une incidence sur le niveau de la productivité au pays.

1.3 Les contraintes techniques liées à la production des céréales en Algérie

Les insuffisances techniques dont souffre la production céréalière en général et celle du blé en particulier sont très nombreuses, mais les principales se résument en :

- La faiblesse qualitative et quantitative des semences, et la négligence concernant leur priorité ;
- Le caractère extensif de la production (l'insuffisance dans l'application des itinéraires techniques) ;
- L'insuffisance des potentialités hydriques, et faiblesse des moyens d'irrigation;
- Non-maitrise des techniques modernes de production, et le caractère empirique de la recherche et de la vulgarisation agricole.
- ***Le non-respect de l'itinéraire technique, notamment les techniques culturales, particulièrement la préparation du sol qui sont négligées où méconnues, faute de sensibilisation ou par manque de matériel adéquat***

Les céréales en Algérie sont essentiellement cultivées en pluviale, dépendant directement des précipitations qui fluctuent fortement d'une année à l'autre. Ces conditions pluviométriques constituent une première explication de la faiblesse des rendements dans ces zones. De plus, ce problème est encore aggravé par une réduction drastique des surfaces de terres fertiles et arables disponibles pour cultiver ces cultures, qui devrait continuer à diminuer à l'avenir en raison des pratiques agricoles actuelles notamment les techniques de travail du sol (**Hawkesford et al., 2013**).

Depuis les 50 dernières années, les pratiques agricoles ne cessent de s'intensifier dans le but d'augmenter la productivité et de minimiser les coûts de production. Cela concerne notamment l'utilisation massive d'intrants (apports d'engrais et de pesticides)

et l'augmentation de la mécanisation (augmentation de la puissance des engins, systématisation du travail du sol intensif). En conséquence, le sol subit certaines menaces dont on pense qu'elles pourraient aboutir à une altération de ses fonctions agronomiques et environnementales. Il s'agit notamment de la diminution du taux de matières organiques et de la biodiversité, de l'augmentation des phénomènes d'érosion et compactage des sols agricoles. **(Lefebvre, 2010)**.

2. Le compactage et ses principales causes dans les sols agricoles

Le compactage du sol est défini comme étant l'augmentation de la densité apparente ou la diminution de la porosité du sol en raison des charges appliquées à l'extérieur ou à l'intérieur. Le compactage du sol peut être identifié soit sur le terrain, en laboratoire ou par télédétection. Au terrain, le compactage du sol peut être détecté en observant ou en mesurant les changements dans la structure du sol, l'humidité et la couleur du sol, la résistance pénétrométrique, la perméabilité à l'air ou à l'eau, stagnation des eaux en surface ou dans les couches souterraines, et les propriétés de croissance des cultures ou des racines **(Batey et McKenzie, 2006)**.

Au laboratoire, la densité apparente du sol, la distribution de la taille des pores, la perméabilité à l'eau et le coefficient apparent relatif de diffusion des gaz sont mesurés pour déterminer la perméabilité des sols à l'air et à l'eau et donc sur le degré de compactage. De plus, les techniques de télédétection aident à reconnaître les altérations de la structure du sol, de la croissance des racines, des capacités de stockage de l'eau et de l'activité biologique. **(Tekin et al., 2008)**.

Le compactage du sol dans les champs agricoles est causé par plusieurs facteurs (naturelles et/ou induites par l'homme), on peut en citer quelques-uns :

- l'intensité des pluies
- Les équipements de travail du sol pendant les opérations de préparation du sol,
- Le piétinement des animaux d'élevage,
- Circulation de la machinerie lourde sur terrain notamment les tracteurs,
- Les semoirs et matériel de récolte. **(Batey, 2005, Hamza et Anderson, 2005)**.

Dans ce cas, on peut dire qu'une charge mécanique élevée, une non diversification des cultures, un pâturage intensif, une faible teneur en matière organique et un travail du sol dans des sols à haute teneur en eau peuvent entraîner un compactage du sol. (Shah et al., 2017), ont résumé les principales causes de compactage des sols comme le montre la figure 2.

De même, (Ziyae, et Roshan, 2012) ont mené une enquête pour étudier les causes des problèmes de compactage des sols. Ils ont défini les causes courantes de compactage du sol comme des processus naturels, des calendriers de semis plus précoces, le surpâturage et le piétinement des animaux qui affectent directement la résistance à la pénétration, en plus de l'augmentation du poids et de l'intensité des machines, en particulier le travail excessif du sol à haute teneur en humidité du sol.

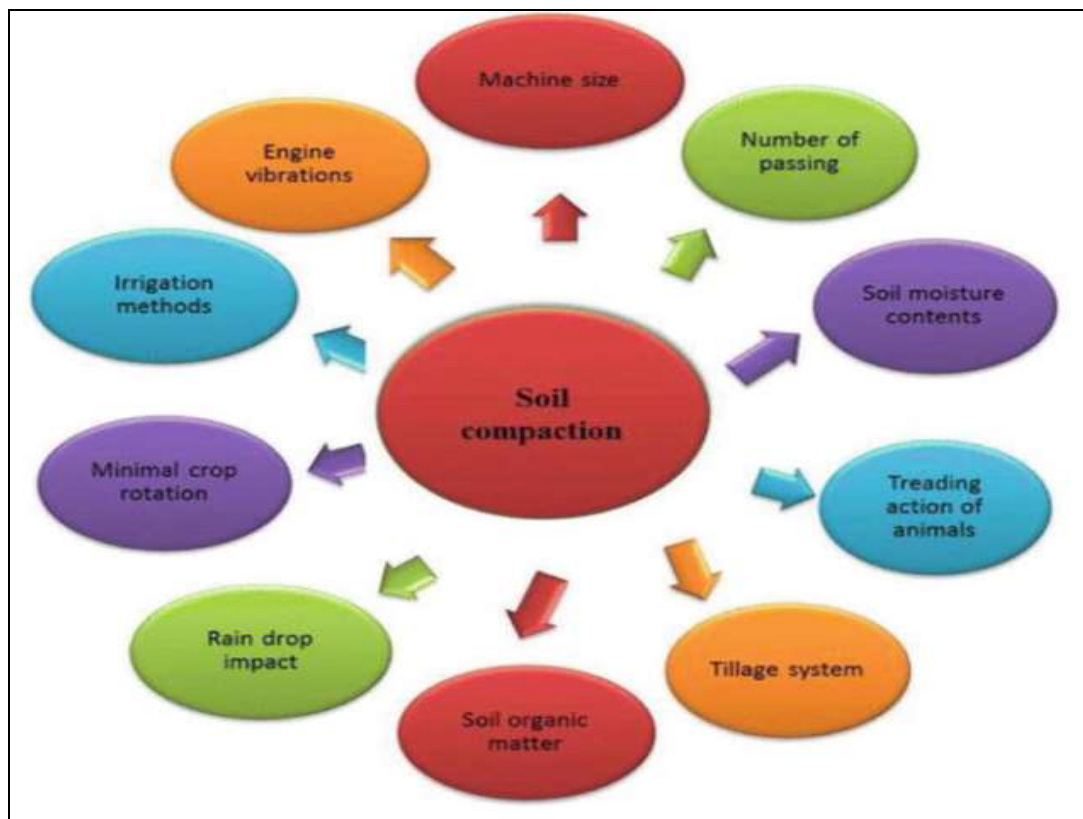


Figure 2: Les principales causes du compactage des sols dans les champs agricoles (Shah et al., 2017)

Le trafic des pneus des machines agricoles lourdes est connu pour être la principale cause du compactage des sols dans les champs agricoles. Le compactage du sol par les roues est caractérisé par une diminution de la porosité du sol localisée dans la zone sous la roue et la formation d'ornières à la surface du sol (Hamza et Anderson, 2005). Le degré de compactage du sol par les machines agricoles dépend non seulement des caractéristiques de ces dernières,

mais également des propriétés du sol telles que la texture, la structure et l'humidité (**Batey, 2009**) et (**Bennie et Krynauw, 1985**). Plusieurs chercheurs (**Silva et al., 2008**) et (**Jimenez, et al., 2021**) ont montré que le taux de compactage dépendait des caractéristiques du sol, ainsi que du poids, de la pression et des vibrations des machines agricoles. Différentes machines, voire les mêmes machines avec des pneus différents, diffèrent par leur charge et leur pression sur le sol. (**Biriş et al., 2019**). Le compactage du sol par une machine dépendait de la résistance du sol qui est influencée par la matière organique, la teneur en eau, la structure et la texture du sol, et les propriétés de la machine exprimées par la charge par essieu, le nombre de pneus, les dimensions des pneus, la vitesse, et l'interaction sol-pneu (**Nawaz et al., 2013**).

(**Botta et al., 2009**) ont rapporté que la taille des pneus et le rapport profondeur d'ornières/largeur des pneus, avaient un effet significatif sur le compactage du sol. Les chercheurs ont souligné que l'agriculteur devait faire attention à la charge par essieu, à la taille des pneus et à la teneur en eau du sol au moment de la circulation. De plus, la taille, le gonflage et la forme du pneu en plus de la charge du pneu ont des effets significatifs sur la pression au sol, indiquant un compactage du sol induit par le trafic (**Smith et Dickson, 1992**), et (**Raper et al., 1994**). Les véhicules avec des charges par essieu élevées provoquaient généralement un compactage profond du sous-sol lorsqu'ils circulent sur des sols à forte teneur en eau, et ce compactage profond du sous-sol provoquait des réductions persistantes et peut-être permanentes des rendements des cultures. (**Håkansson et Reeder 1994**).

L'humidité du sol et la charge par essieu provoquent le compactage du sol à différentes profondeurs, comme le montre la figure 3.

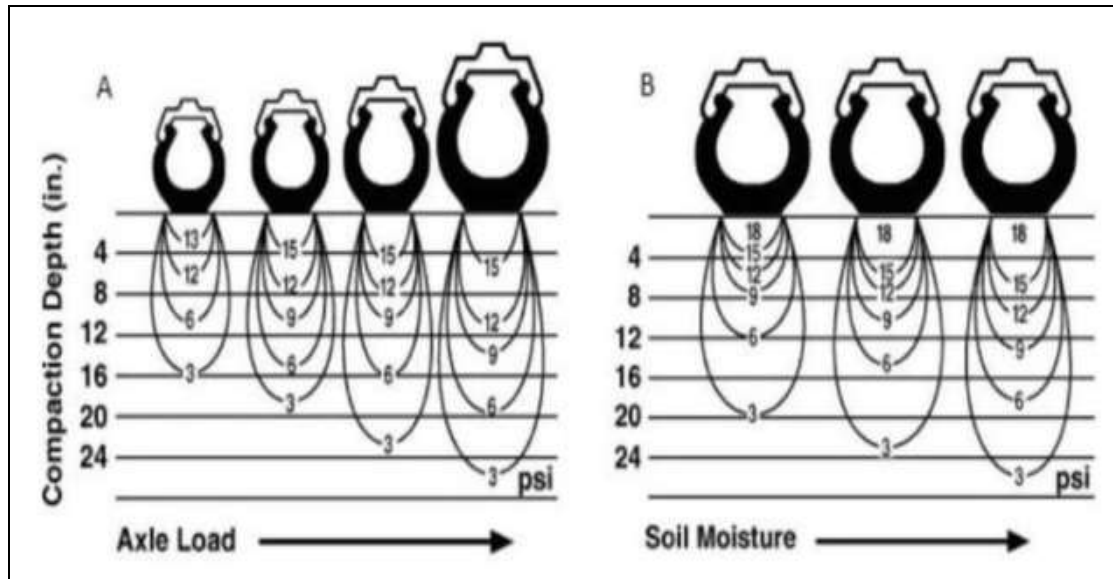


Figure 3 : (A) : Effet de la charge sur l'essieu sur la profondeur de compactage. (B) : L'effet de l'humidité du sol sur la profondeur de compactage. (DeJong-Hughes et al., 2001)

On voit sur la figure ci-dessus qu'une charge sur l'essieu élevée pourrait entraîner un compactage du sol à une profondeur importante. De plus, pour une charge et une taille de pneu données, l'augmentation de la teneur en eau du sol provoque un compactage beaucoup plus profond qu'à sec (DeJong-Hughes et al 2001). Les pressions de contact élevées appliquées au sol, qui sont décrites comme le rapport entre la masse de l'essieu de chaque machine et la surface de contact de la piste, ont entraîné un plus grand degré de compactage, en plus de favoriser d'autres effets négatifs. (Da Silva et al., 2016)

Les chercheurs ont souligné qu'il était possible de minimiser les effets du compactage du sol en diminuant la pression de contact appropriée des machines agricoles. Ils ont suggéré l'utilisation de nouvelles technologies et de pratiques de gestion appropriées devrait se développer et adopter pour caractériser la taille des machines, et résoudre les problèmes machine-sol, en particulier en ce qui concerne la répartition des pressions causées par les roues dans le sol, évitant ainsi les effets négatifs de la compression.

De même, (Porterfield, Carpenter, 1986) ont affirmé que le contact pneu-sol à haute pression provoquait une augmentation de la densité du sol. Ainsi, les chercheurs ont recommandé de maintenir une pression de contact faible pour éviter le compactage.

L'intensité du trafic, c'est-à-dire le nombre de passages de machines agricoles sur le sol tout au long du cycle de développement de la culture, a un effet aussi significatif sur le degré de compactage et la profondeur auquel la pression des roues affecte le sol (**Chehaibi et al., 2012**). La fréquence élevée des passages associés aux petits tracteurs à quatre roues, dont la masse et la pression au sol sont inférieures à celles du tracteur de puissance moyenne, était potentiellement plus préjudiciable que celles associées au tracteur de puissance moyenne (**Zhang X., et al., 2006**). Les valeurs standard officielles de contrainte normale maximale admissible à une profondeur de 0,5 m, a observé que l'intensité du trafic résultait principalement en une contrainte du sol plus élevée que la contrainte admissible dans le sous-sol (**Rusanov V., 1994**). De même, (**Botta et al., 2006**) ont observé qu'une fréquence de circulation élevée (10 et 12 passages de tracteur dans les mêmes voies) d'un tracteur léger sur un sol typique d'Argiudol produisait une augmentation significative de la résistance pénétrométrique et de la densité apparente au niveau de la couche arable et du sous-sol. Cependant, (**Hamza et Anderson, 2005**) ont signalé que le premier passage d'une roue était connu pour causer une grande partie du compactage total du sol et que le compactage du sous-sol peut être induit par un trafic répété avec une faible charge par essieu, les effets peuvent persister très longtemps. L'utilisation d'outils de travail du sol à la même profondeur peut provoquer de graves semelles de labour ou des couches dures justes en dessous de la profondeur de travail du sol. cette semelle de labour, est généralement mince (2,5 à 5 cm), peut réduire le potentiel de rendement en limitant la croissance des racines et l'absorption des nutriments par la plante (**Raper et al., 2005**).

3. Rétrospective sur les techniques de travail du sol

Les pratiques de travail du sol font référence à la séquence des procédures les plus couramment utilisées pour préparer le sol et produire une culture spécifique. Certaines des procédures typiques utilisées lors de la préparation du sol comprennent l'application d'engrais, l'application de pesticides, l'application d'herbicides et le labour. Toutes les opérations mentionnées ci-dessus ont un effet sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol qui à leur tour affectent la croissance des plantes.

La terminologie des pratiques de travail du sol varie géographiquement et culturellement. Nous suivons les descriptions des auteurs par endroits, mais essayons d'utiliser des termes universels dans la mesure du possible. Les termes courants sont abrégés comme suit : travail conventionnel (CT ; Fig. 4), travail avec chisel (CP) et labour avec charrue à soc (MP), travail

de conservation ou travail minimum (MT) et systèmes sans labour (NT ; fig. 3) . L'ambiguïté du TC, en particulier, est notée en raison de pratiques de travail du sol « conventionnelles » ou « 'traditionnelles » différentes dans différentes parties du monde. Il faut signaler toutefois, que la CT représente le plus intensif de tous les traitements du sol dans chaque étude examinée. **Strudley et al., 2008)**



Figure 4: Divers outils de travail du sol : (a) charrue réversible tri-socs. (b) Strip tiller

(Source : **Strudley et al., 2008)**

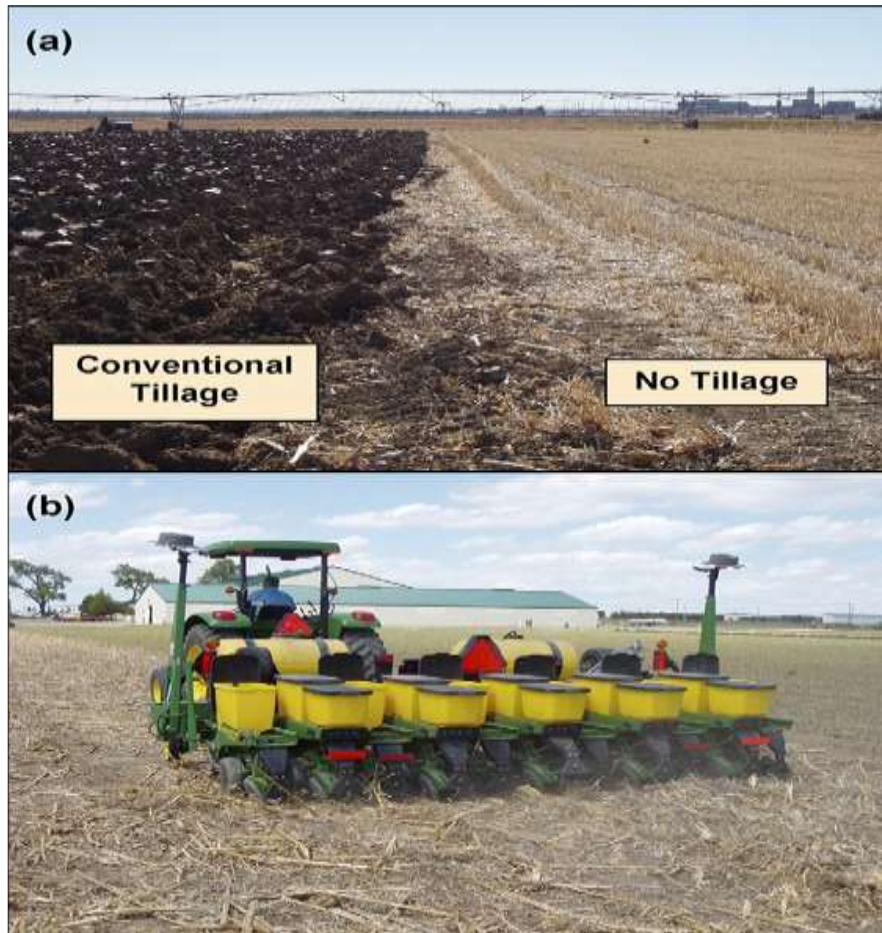


Figure 5: Pratiques de non-labour : (a) NT vs. CT (charrue à socs) et (b) semoir de maïs NT

(Source : Strudley et al., 2008)

3.1 La technique conventionnelle

Les pratiques de travail du sol traditionnelles varient selon les régions et les pays, mais en général, le travail du sol traditionnel est défini comme incorporant la plupart des résidus de culture et laissant moins de 15 % de la surface de la terre ou du sol spécifique recouverte de résidus après la plantation (Mitchell, 2009). Moins de 560 kg/ha de résidus de petites céréales sur le sol sont nécessaires pour être défini comme un travail du sol traditionnel (CTIC, 2004). Les pratiques de travail du sol conventionnelles augmentent l'érosion et accélèrent les processus de dégradation dans le sol, ce qui provoque d'énormes pertes de matière organique dans le sol. La perte de matière organique influence à son tour les propriétés chimiques, biologiques et physiques du sol et a donc une influence directe sur la santé globale du sol (Hakeem et al., 2016). Le travail du sol conventionnel consiste généralement en une

succession d'opérations de travail du sol, travail du sol primaire et travail secondaire. Le contrôle des mauvaises herbes et l'enfouissement des résidus sont l'objectif principal du travail du sol primaire, alors que l'objectif principal du travail du sol secondaire est de préparer le lit de semence avant la mise en place de la culture. (FAO, 2001). Les outils qui sont généralement utilisés pour le travail du sol primaire comprennent les charrues à versoirs et les charrues à disques, il faut beaucoup de puissance pour utiliser ces outils. Le travail du sol secondaire comprend la diminution de la taille des agrégats, le compactage et le nivellement du sol si nécessaire (Madsen, 1995). Contrairement à certaines méthodes de travail du sol réduit et à certaines méthodes d'agriculture de conservation, le semis et l'application d'engrais de base sont souvent séparés, mais ce n'est pas toujours le cas avec le travail du sol conventionnel. Cela augmente la consommation du carburant, du temps et le compactage du sol. Les pratiques de travail du sol conventionnelles, en particulier le labour, perturbent les agrégats, augmentent les températures du sol et la décomposition de la matière organique, ce qui entraîne une baisse des teneurs en C et N dans les sols (Aziz et al., 2013). Le labour favorise également la désintégration des agrégats et la structure du sol en raison de l'inversion et du mélange du sol, ce qui à son tour entraîne la décomposition rapide de la matière organique particulaire protégée dans les espaces inter et intra-agrégats en raison de l'exposition des microbes du sol (Six et al., 2000). Une meilleure stabilité des agrégats entraîne une augmentation de la macro porosité et de la conductivité de l'eau (Tisdall et Oades 1982). En utilisant des méthodes de travail du sol conventionnelles, les macro-agrégats se décomposeront plus rapidement que lors de l'utilisation de méthodes agricoles de conservation. Selon (Six et al., 2000), il peut y avoir plus du double de la quantité de macro-agrégats dans un système sans labour par rapport au système de travail du sol conventionnel. Dans une expérience menée par (Kern et Johnson, 1993), trois scénarios de 27% du travail du sol de conservation (scénario 1), 57% de travail du conservation (scénario 2) et 76% de travail de conservation sur une terre cultivée en plein champ ont été considérés. Les trois scénarios ont été pris en considération et une projection a été faite pour estimer la teneur en carbone organique du sol de 1993 à 2020. Selon la dernière source mentionnée, la teneur en carbone organique du sol pour les cultures en plein champ dans la première couche de 30 cm était de 5304 à 8654 Tg. (Tg = 1012 g). Le scénario 1 avec seulement 27 % de travail du sol conventionnel entraînerait une perte de 31 à 52 Tg de carbone organique du sol d'ici 2020 selon la projection. Le scénario 2 entraînerait une perte de 18 à 30 Tg de carbone organique du sol et le scénario 3 entraînerait alors une perte de 9 à 16 Tg de carbone organique du sol

d'ici 2020 selon la projection. La projection a estimé que si les pratiques de travail du sol conventionnelles étaient remplacées par un travail de conservation dans les trois scénarios, un gain de 21 à 36 Tg, 80 à 129 Tg et 286 à 468 Tg C serait attendu d'ici 2020 dans les trois scénarios respectivement.

3.2 L'agriculture de conservation

L'agriculture de conservation est basée sur l'amélioration des composants et processus biologiques du sol. Selon (Mitchell, 2009), le travail du sol de conservation peut être défini comme tout système de travail du sol qui laisse au moins 30% de la surface recouverte de résidus, l'objectif principal de celui-ci est de réduire l'érosion hydrique. Si l'érosion du sol par le vent est la principale préoccupation, le travail du sol de conservation peut également être défini comme un système qui laisse au moins 1120 kg par hectare de résidus sur le champ particulier tout au long de la période d'érosion éolienne. Un autre aspect clé de l'agriculture de conservation est que le sol doit être laissé intact de la récolte au semis. Le système semis direct est considéré comme technique de conservation s'il laisse 30% de résidus et appliquer la rotation de culture (Mitchell, 2009).

Dans ce système, le semis se fait dans un lit de semence étroit ou une fente créée par des disques ouvreurs, des nettoyeurs de rangs, des ouvreurs à dents, des socs, etc. Tous les auteurs ne considèrent pas le labour en billon comme faisant partie de l'AC, mais le système de labour en billon laisse le sol intact de la récolte au semis, la plantation se fait alors sur des billons préparés sur le lit de semence. Cela signifie que les espaces entre les crêtes sont recouverts de résidus (Mitchell, 2009). Dans le système de labour avec paillis, le sol est perturbé avant la plantation à l'aide d'outils tels que des disques, des désherbeurs à tige, des cultivateurs et des chisels. Garder le paillis à la surface et planter à travers celui-ci protège le sol et améliore le micro-climat pour un meilleur environnement de croissance pour la culture spécifique. Lors de la pratique de l'agriculture de conservation, la stabilité des agrégats s'améliorera en raison du sol relativement non perturbé ainsi que de l'activité microbienne continue dans le sol. Une meilleure stabilité des agrégats se traduira par une meilleure protection du carbone organique du sol et donc une teneur en carbone organique du sol plus élevée à long terme. Dans une expérience menée par (Huang et al., 2010), les distributions granulométriques des agrégats ont été comparées entre un système sans labour et un système de travail du sol conventionnel sur le maïs en monoculture dans le nord de la Chine. Ils ont constaté qu'il n'y avait pas de différence significative dans les proportions de micro-agrégats entre le système de travail du

sol conventionnel et le système d'agriculture de conservation. Cependant, une plus grande quantité de macro-agrégats a été trouvée dans les champs avec le système de semis direct que dans les champs du système de travail du sol conventionnel. Cela est dû au fait que les macroagréats sont plus sensibles aux perturbations du sol et moins stables que les microagréats (**Six et al., 2000**). La quantité de macro-agrégats dans le sol n'est pas le seul facteur à prendre en considération lors de l'examen du carbone organique du sol, le taux de renouvellement des agrégats du sol influence la stabilisation du C. Selon (**Huang et al., 2010**) Les distributions de C dans le sol étaient dominées par les macro-agrégats, qui représentaient entre 64,4% et 64,1% du sol. Si l'agriculture de conservation est pratiquée là où il y a une perturbation minimale du sol, une couverture végétale permanente et un élément de rotation des cultures, l'agriculteur bénéficiera de nombreux avantages. L'un des avantages évidents de l'agriculture de conservation est que l'agriculteur économise de l'argent sur les coûts des intrants, par exemple moins de carburant et moins de main-d'œuvre par hectare. L'efficacité de l'utilisation de l'eau peut s'améliorer considérablement lors de la pratique de l'agriculture de conservation, car le ruissellement de l'eau est réduit, une meilleure infiltration de l'eau peut être attendue et plus d'eau est retenue dans le profil du sol en raison de la couverture sur le sol (**Hobbs, 2008**). Lorsque certaines céréales sont utilisées comme cultures de couverture, des effets allélopathiques peuvent également contrôler certaines mauvaises herbes. Un inconvénient majeur lors de la conversion des méthodes de travail du sol conventionnelles à l'agriculture de conservation est que différents équipements sont nécessaires et cela peut impliquer des coûts financiers. Un autre problème au départ est la quantité de mauvaises herbes qui se produiront dans les champs et il faudra un certain temps pour les maîtriser. Il est important de prendre en compte que lors de la conversion de l'agriculture conventionnelle à l'agriculture de conservation, tous les avantages ne seront pas visibles immédiatement dans le sol ainsi que sur le rendement (**Hobbs et Gupta, 2004**). Cela peut prendre de trois à sept ans pour que tous les avantages s'installent; cependant, en attendant, les agriculteurs économisent sur les coûts de production et le temps.

Selon (**Morrison, 2010**), l'équipement pour l'agriculture de conservation devrait pouvoir fonctionner dans un champ d'agriculture de conservation en procédant comme suit :

- Dégager les chemins à travers les paillis et les résidus.
- Découper le reste tout en complétant l'opération de dégagement du chemin.

- Ouvrir le sol pour créer un sillon pour les semences, les engrais ou les amendements du sol avec un minimum de perturbation du sol, puis terminer l'opération par la fermeture du sillon avec rappuyage ou toute autre procédure.

L'équipement utilisé pour l'agriculture de conservation varie considérablement d'une zone de production à une autre dans le monde. Quelques outils simples seront discutés dans le paragraphe suivant.

Les roues de râteau passives sont principalement utilisées pour dégager le chemin à travers les résidus, ces roues ont généralement un diamètre de 27 à 40 cm et sont constituées de disques en acier avec des dents/pointes ou des doigts qui tournent librement sur des roulements à billes. Généralement, une lame de soc de 27 à 45 cm de diamètre est utilisée pour terminer la coupe des résidus, les lames de soc lisses nécessitent une force d'appui minimale pour la coupe. Pour ouvrir le sol, des dispositifs d'ouverture de type tige de sillon sont utilisés car ils pénètrent dans les sols non remaniés sans l'ajout de poids de ballast, la profondeur de pénétration du sol peut être ajustée par le réglage vertical de la tige (**Morrison, 2010**). Il existe de nombreuses variantes qui peuvent être utilisées lors de la fermeture/couverture du sol. Des boucles de chaîne traînantes, des pneus ou des outils similaires qui sont traînés sur le sol ont tous été utilisés avec un grand effet lors de la fermeture du sol après la plantation.

4. Effet des techniques de travail du sol sur les propriétés physiques et mécaniques du sol

L'historique des publications dans le domaine de la variabilité spatiale et temporelle des propriétés du sol due au travail du sol montre une augmentation rapide dans les années 1980 suivie d'un taux de publication maximal dans les années 1990 ralentissant au 21^e siècle. La figure 1b montre les principales sources d'articles de revues trouvées pour la revue de la littérature concernant la variabilité spatiale et temporelle. Plus de la moitié des articles ont été trouvés dans deux revues, mais les éditeurs et les auteurs reflètent l'intérêt et la contribution internationaux (**Strudley et al., 2008**).

Le travail du sol est la pratique la plus étudiée qui affecte les propriétés et les processus hydrauliques du sol. Cependant, les résultats n'ont pas toujours été uniformes selon les zones d'études, les sols et les protocoles expérimentaux. La littérature ci-dessous met en évidence à la fois les tendances dans toutes les études et les contradictions apparentes. De telles

incohérences motivent d'avantage la nécessité d'établir la causalité et la prédiction quantitative des effets du travail du sol sur les propriétés du sol, ainsi que la nécessité d'identifier la variabilité spatiale et temporelle avant la comparaison entre les différentes technique de travail du sol.

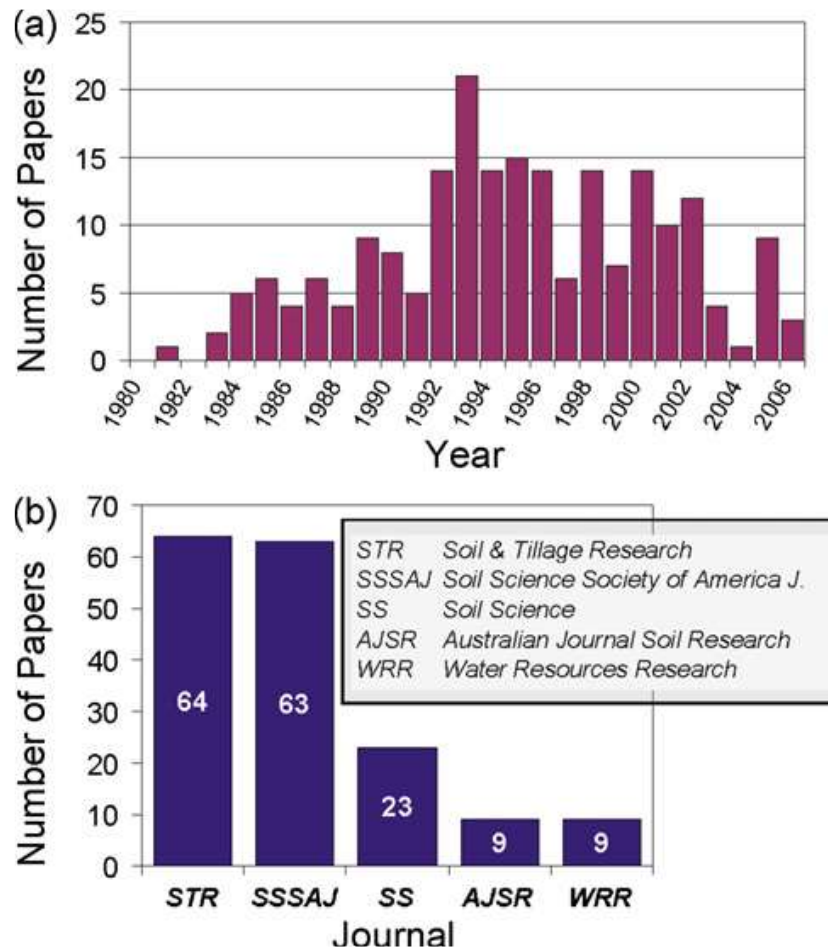


Figure 6: Articles publiés sur les effets du travail du sol et gestion sur les propriétés hydrauliques du sol et les propriétés pertinentes variabilité spatio-temporelle. (a) Série chronologique d'articles trouvés par an ; et (b) les principales revues sources.

(Source : Strudley et al., 2008)

Dans une précédente revue de la littérature, (Unger et Cassel, 1991) ont souligné les variations des effets du travail du sol sur les propriétés mécaniques et hydrauliques du sol dues à la fois aux outils de travail du sol et aux facteurs du sol, notant que « les propriétés du sol pour une opération donnée sont difficiles à visualiser, et encore moins à prédire ." (Unger et Cassel, 1991) ont souligné la nécessité d'un meilleur contrôle et d'un meilleur rapport sur des facteurs tels que la profondeur et la vitesse du travail du sol, la gestion historique des sols et la disponibilité des résidus de culture. La même année, (Gupta et al., 1991) ont examiné

des modèles pour prédire les effets du travail du sol sur la densité apparente, la conductivité hydraulique et thermique et les caractéristiques de rétention d'eau, entre autres variables. Une grande partie du besoin d'essais en laboratoire et sur le terrain des méthodes décrites par **Gupta et al. (1991)** reste cruciale pour l'état de la science plus d'une décennie plus tard. Plus récemment, **(Guerif et al., 2001)** ont examiné les effets du travail du sol sur l'inclinaison du lit de semence, y compris une discussion de certaines approches pour prédire les propriétés hydrauliques à partir de la structure du sol. **(Or et Ghezzehei, 2002)** ont discuté des progrès de la simulation physique et ont suggéré un moyen par lequel la modélisation à l'échelle des agrégats de la stabilité et de la rhéologie dynamiques des agrégats du sol peut être mise à l'échelle pour modéliser le comportement d'un lit d'agrégats. Plus récemment, **(Ahuja et al., 2006)** ont passé en revue des sujets interdisciplinaires en physique des sols et en recherche sur les systèmes agricoles, y compris la quantification des effets du travail du sol sur les propriétés du sol et les processus sol-plante-atmosphère. Bien que ces revues fournissent des informations de base importantes et des suggestions sur la façon d'avancer dans la compréhension des effets du travail du sol, nous présentons ici un aperçu plus détaillé de la variabilité dynamique dans l'espace et le temps des propriétés hydrauliques du sol causées par le travail du sol.

4.1 Effet du travail du sol sur la masse volumique apparente, la porosité et la taille des pores

Nous explorons les sensibilités signalées dans la structure du sol et la géométrie des pores au travail du sol. NT sur sols duplex (loam argilo-sableux sur horizon B argileux) dans sud-est de l'Australie, a donné lieu à une densité apparente plus faible près de la surface, tandis que l'échantillonnage de la densité apparente à des intervalles de 2 cm dans les 30 premiers cm des sols limoneux fins de l'Iowa, n'a montré aucun changement significatif pendant la transition vers NT **(Logsdon et Cambardella, 2000)**. De même, après 8 ans de travail du sol, **(Chang et Lindwall, 1989)** ont mesuré les effets des techniques de travail du sol sur un sol limoneux au Canada et ont découvert que la densité apparente du sol ne différait pas entre les rotations de cultures. Cependant, après 10 ans de NT avec du blé d'hiver continu, la densité apparente était plus élevée que sous CT. **(Horne et al., 1992)** ont également mesuré des augmentations de la taille des agrégats et de la densité apparente sous NT par rapport à MT et CT (en utilisant MP) après 10 ans dans un loam limoneux néo-zélandais, tandis que la porosité totale a diminué sous NT après labour.

Des études à long terme (28 ans) sur deux sols limoneux de l'Ohio (**Mahboubi et al., 1993**) ont montré une agrégation du sol significativement plus importante sous NT, tandis que le volume de micropores (rayons < 14 mm) était significativement moins sous CT que NT pour les luvisols gris de loam limoneux et de loam sableux gris des prairies du nord-ouest du Canada (**Azooz et Arshad, 1996**). Une étude de 8 ans sur l'argile et les loams argileux utilisant un MP jusqu'à 25 cm et une culture jusqu'à 13 cm, a confirmé que la densité apparente était plus élevée sous culture dans la couche de 13 à 25 cm de profondeur, mais il n'y avait pas de différence significative entre traitements dans la couche de 0 à 13 cm (**Comia et al., 1994**).

Cherchant à expliquer les différences signalées entre les sols en CT et NT, (**Drees et al., 1994**) ont mesuré la géométrie des pores de sections minces d'un loam limoneux dans des parcelles sous CT et NT. NT avait des pores fins interconnectés (50–100 mm) à quatre intervalles de profondeur jusqu'à 25 cm, ainsi qu'une structure lamellaire près de la surface. La taille moyenne des pores dans NT était plus grande que dans CT, et les canaux de vers de terre étaient nombreux dans NT, mais absents dans CT. De même, (**Derdour et al., 1993**) ont comparé les systèmes MP, CP et NT sur un sol argileux au Canada, et ils ont identifié les effets du travail du sol sur la porosité structurale. (**Alegre et al., 1991**) ont résumé les résultats de recherches antérieures sur le travail du sol en Amérique latine, concluant que NT et MT provoquaient une densité apparente plus élevée dans la surface du sol, ainsi qu'une macroporosité réduite par rapport au travail du sol conventionnel. D'autres études sur le travail du sol montrent des diminutions à court terme de la densité apparente et/ou des augmentations de la porosité (totale et macro) dues au labour par rapport au traitement NT (**Pierce et al., 1994**).

4.2 Effet des techniques de travail du sol sur l'humidité du sol

(**Chang et Lindwall, 1990**) dans leurs études de 10 ans de NT sur un sol limoneux au Canada cultivé avec du blé en continu, ont observé une capacité de conservation de l'eau faible en profondeur (30 à 60 mm) malgré aucun effet de labour perceptible au-dessus et en dessous de cette zone. (**Brandt, 1992**) a étudié 12 ans de CT par rapport à NT, et a constaté que NT a entraîné une plus grande teneur en eau du sol (H%) dans 9 des 36 cas et aucune différence significative dans le reste. Le contrôle des mauvaises herbes sur NT était considéré comme un facteur important. (**Kosutic et al., 2001**) ont estimé la disponibilité en eau du sol dans l'horizon (0–35 cm) à partir de la mesure gravimétrique de la H% d'un loam limoneux en

Slovénie, en Croatie, sous cinq systèmes de travail du sol. Trois des cinq étaient des variantes de conservation ou MT, et les extrêmes étaient NT et CT pour une rotation blé-soja. L'eau dans le sol disponible a diminué dans l'ordre : NT > MT > CT. De même, (**Mahboubi et al., 1993**) ont détecté une plus grande capacité de rétention d'eau dans deux loams limoneux de l'Ohio au cours d'une étude de 28 ans sur les effets sur les pratiques NT. (**Azooz et Arshad, 2001**) ont mesuré la rétention d'eau à six succions matricielles de 5 à 160 kPa. Le taux d'assèchement du sol dans les 30 premiers cm était significativement plus élevé dans le CT que dans le NT, tandis que le taux de mouillage (basé sur un coefficient de recharge) était significativement plus élevé dans le NT. Enfin, les résultats de laboratoire ont montré une rétention d'eau plus élevée dans NT que CT. Tous les résultats ont conduit à la suggestion d'une pratique NT modifiée pour maximiser les propriétés hydrauliques bénéfiques du sol.

4.3 Effet des opérations de travail du sol sur la résistance pénétrométrique

La résistance pénétrométrique (R_p) du sol est fonction du niveau de compactage du sol ainsi que du volume des vides présents dans le compartiment du sol. (**Osunbitan et al., 2005**) ont signalé des variations significatives de la résistance à la pénétration du sol parmi certains traitements testés. Ces auteurs ont enregistré R_p la plus élevée de 0,61 kg cm² sous le sol NT plus compacté et la valeur la plus faible de 0,15 kg cm² sous une parcelle labourée et hersée. Cependant, ils n'ont observé aucune différence significative entre la résistance à la pénétration du sol sur tous les traitements à la profondeur de 0 à 5 cm. Il y avait des écarts significatifs par rapport à ce résultat aux profondeurs de 5 à 10 cm et de 10 à 15 cm, le traitement NT enregistrant une résistance à la pénétration significativement et systématiquement élevée. Ces auteurs ont également confirmé qu'il n'y avait pas de différence significative de résistance entre les sols labourés manuellement et les sols labourés de manière conventionnelle. Ils ont également confirmé une augmentation de la résistance à la pénétration avec le temps après le travail du sol dans des parcelles labourées manuellement, labourés avec la charrue et travaillés avec outils à dents, mais ont également observé une légère diminution sous traitement NT.

La résistance à la pénétration a une relation cohérente avec le rendement des cultures sur différents sols (**Baver et al., 1972; Vine et Ahmad, 1987**), et détermine en grande partie le rendement lorsque le taux de l'eau et l'air disponibles dans le sol sont importants. L'air du sol moins de 12 ml d'air pour 100 ml de sol limitera la croissance du manioc (**Vine et Ahmad, 1987 ; Arvidsson, 1998**) a rapporté de petites différences entre le sol labouré avec la charrue à soc et le sol travaillé avec chisel dans la partie travaillée du sol, alors que R_p était plus

élevée dans le sol labouré. La charrue à versoir s'est avérée plus efficace que le chisel pour l'ameublissement du sol. Une observation similaire a été faite par **(Carter, 1994)**. Le sol travaillé avec une charrue à versoir est cependant sensible à l'érosion.

5. Relation entre le travail du sol, le compactage et les propriétés du sol

L'un des principaux objectifs travail du sol occasionnel (OT) est d'atténuer le compactage du sol **(Dang et al., 2018)**. Les changements dans la résistance à la pénétration du sol et la densité apparente sont utilisés comme indicateurs pour apprécier le compactage du sol.

Une augmentation de R_p du sol et des valeurs de densité apparente indiquent un compactage accru du sol. Les études rapportant des changements dans R_p après OT sont pratiquement indisponibles, mais beaucoup ont mesuré la densité apparente du sol. Une étude mesurant R_p a révélé que l'OT réduisait le compactage sur un sol argileux par rapport au NT. Neuf études ont rapporté des comparaisons de densité apparente pour OT avec NT à partir d'environ 30 sols différents. Bien qu'il y ait eu une certaine variabilité dans la réponse entre les différents sols au sein de la même étude, en général, les neuf études indiquent que l'OT n'a pas changé la densité apparente dans cinq études, a diminué dans trois et augmenté dans une. Ces résultats indiquent que les effets de l'OT sur la densité apparente du sol peuvent être variables.

La réponse incohérente de la densité apparente à OT pourrait être en partie due au temps de mesure après OT. La densité apparente du sol est plus faible quand on la mesure quelques jours après OT, avec des effets diminuant progressivement avec le temps après OT.

Les études de la variabilité temporelle de R_p et la densité apparente après OT sont peu nombreuses. **(Fidalski et al., 2015)** ont signalé que l'OT dans un sol NT de 17 ans au Brésil réduisait la densité apparente 1 et 6 mois après le travail du sol, mais pas après 12 et 20 mois, ce qui n'indique des effets OT de courte durée. De même, **(Dang et al., 2018)** ont surveillé les changements de densité apparente après OT avec chisel dans 14 sols pendant 3 à 24 mois après OT et ont constaté que la densité apparente avait tendance à diminuer dans la plupart des sols au cours des 3 premiers mois après OT, bien qu'elles ne sont pas significatives statistiquement, mais après 24 mois, les différences de densité apparente entre NT et OT n'étaient pas significatives dans les 14 sols. Dans certains cas, la densité apparente peut être plus élevée en OT qu'en NT à long terme. Les études montrent que la charrue à soc augmente la densité apparente par rapport à NT dans un sol après 5 ans de travail. **(Kettler et al., 2000)**.

5.1 Effet de la résistance pénétrométrique sur le développement racinaire

La résistance pénétrométrique du sol est le résultat de forces de cohésion entre les particules du sol et la résistance de friction rencontrée par les particules qui sont forcées de glisser les unes sur les autres ou de sortir de positions imbriquées afin de faire de la place à des racines en croissance (**Marshall et al., 1996**). À l'exception des fissures et des macropores (par exemple, les ouvertures de vers de terre et les vides racinaires créés par la culture précédente) qui permettent aux racines de pousser à travers (**Passioura, 1991**), l'allongement des racines dans les sols n'est possible que dans la mesure où la pression des racines dépasse la résistance pénétrométrique du sol (**Bennie, 1996**).

La résistance à la pénétration du sol est normalement estimée à partir de la pression requise pour enfoncer une sonde cylindrique avec une pointe conique dans le sol (**Passioura, 2002**). Cela donne une estimation des pressions subies par les cellules racinaires dans la zone d'élongation, et de la pression qu'elles doivent exercer pour enfoncer la coiffe racinaire dans le sol. Cependant, les pénétromètres peuvent surestimer la résistance du sol à la croissance des racines d'un facteur de 2 à 8 (**Bengough et Mullins, 1990 ; Bengough et McKenzie, 1997**). Les racines tournent et peuvent se déplacer dans n'importe quelle direction pour localiser un chemin de moindre résistance contrairement à tout appareil de mesure de courant qui mesure la résistance en ligne droite à travers le sol. Les pointes des racines ont également un diamètre plus petit que la plupart des pénétromètres et sont lubrifiées par l'exsudation de mucilage et les vieilles cellules de la coiffe des racines qui se détachent lorsque la racine pousse à travers le sol. Ces facteurs diminuent tous deux la résistance de frottement rencontrée par la pointe radulaire. De plus, les mesures varient selon les types de pénétromètre (**Taylor et Ratliff, 1969 ; Bengough, 1990**). La résistance à la pénétration est calculée comme $QP = N (1 + \mu \cot \alpha)$, où N est la pression requise pour dilater une cavité dans le sol, μ est le coefficient de frottement sol-métal, et α est le demi-angle du cône (**Barley et Greacen, 1967**). Ainsi, en général, les pénétromètres avec des demi-angles plus petits connaîtront une résistance au frottement beaucoup plus grande, augmentant ainsi la résistance à la pénétration enregistrée.

Les racines s'allongent en raison de la division cellulaire dans le méristème apical et de l'expansion subséquente de ces cellules juste derrière la zone méristématique (**Bengough et al., 1997**). Les racines pénètrent dans le sol en exerçant une pression axiale et radiale qui déforme le sol devant et autour de la racine (**Clark et al., 1996**). La résistance à la pénétration du sol entraîne une réduction de la croissance des racines en diminuant le taux de division

cellulaire et en réduisant la longueur des cellules (**Smucker et Atwell, 1988 ; Bengough et Mullins, 1990**). La force qu'une racine peut développer pour pénétrer le sol, est déterminée par la pression de turgescence maximale générée dans la zone d'allongement de la racine et la forme et les caractéristiques de friction de la pointe de la racine. La pression axiale maximale de croissance qu'une racine peut exercer varie entre 0,4 et 1,4 MPa (**Misera et al., 1986**). La capacité des racines de riz à pénétrer les sols compactés a été liée à l'épaisseur des racines (**Materechera et al., 1992**). L'augmentation de l'épaisseur de la racine confère une plus grande résistance au flambage (**Whiteley et al., 1982**) et a été associée à une diminution de la résistance axiale devant la pointe de la racine, facilitant la pénétration (**Richards et Greacen, 1986**). Cependant, dans les sols sablonneux ou graveleux grossiers, les racines souples et minces sont associées à une meilleure pénétration du sol en raison de leur capacité à pénétrer entre les particules plus grosses (**Cairns et al., 2009**). Une résistance à la pénétration de 3 MPa a souvent été considérée comme une valeur typique à laquelle la croissance des racines peut être gravement entravée (**Bengough et Mullins, 1990**). La résistance à la pénétration du sol est liée à la densité apparente, à la teneur en eau du sol, à sa texture, à sa structure et à sa teneur en matière organique (Marshall et al., 1996). À mesure que la teneur en eau du sol augmente, la résistance à la pénétration du sol diminue en raison d'une réduction de la succion matricielle qui agit comme une force d'attraction entre les particules du sol, et en raison d'autres changements tels que l'affaiblissement des unités structurales du sol causé par l'absorption d'eau (**Marshall et al., 1996**). Cette augmentation de la résistance à la pénétration avec la diminution de l'humidité du sol dépend du type de sol. Les particules d'argile jouent un rôle important dans la détermination de la résistance à la pénétration du sol en cas de stress hydrique. Au fur et à mesure que le sol sèche, le film d'eau entre les particules du sol diminue, augmentant l'attraction interparticulaire. Dans les sols à forte teneur en sable, l'augmentation de la résistance à la pénétration avec un séchage concomitant est faible par rapport aux sols à faible teneur en sable (**Cairns et al., 2009**). Les racines assècheront d'avantage le sol en absorbant de l'eau, ce qui augmentera encore la résistance à la pénétration du sol (**Bengough et al., 1997**). L'étendue de la restriction de l'allongement des racines est importante dans les zones où les cultures dépendent de l'eau stockée du sol et une réponse bénéfique à la sécheresse serait d'augmenter la profondeur d'enracinement pour accéder aux ressources en eau en profondeur (**Yoshida et Hasegawa, 1982**).

Des études sur des racines de riz dans des conditions de hautes terres ont rapporté des résultats contradictoires. Dans plusieurs études, il a été démontré que le dessèchement du sol

augmente la masse racinaire (Ingram et al., 1994; O'Toole, 1982) et la profondeur des racines (Mambani et Lal, 1983), tandis que d'autres études ont rapporté le contraire, la diminution de la disponibilité en eau fait diminuer la densité et la longueur des racines (Boonjung et Fukai, 1996 ; Lilley et Fukai, 1994). Rp n'a été signalée dans aucune de ces études, il n'est donc pas possible de déterminer l'influence de l'environnement physique du sol. (Cruz et al., 1986) ont mesuré la croissance des plantes et Rp chez le riz cultivé dans la plaine en utilisant un gradient d'humidité du sol (de conditions bien arrosées à un stress hydrique modéré). La longueur totale des racines et le poids sec des racines diminuaient à mesure que l'humidité du sol diminuait. Des mesures correspondantes de Rp ont suggéré qu'une résistance élevée à la pénétration du sol dans la zone d'enracinement pendant le stress hydrique, était un facteur important limitant la croissance des racines. Des études similaires dans des conditions de basses terres et de hautes terres (Cairns et al., 2004) ont montré une forte augmentation de la résistance à la pénétration du sol à mesure que la sécheresse progressait, limitant sévèrement la croissance des racines. Par conséquent, alors que le comportement d'enracinement profond peut, en théorie, contribuer à la résistance à la sécheresse en offrant un meilleur accès à l'eau du sol et donc une plus grande capture des ressources pour l'accumulation de matière sèche et/ou la production de rendement, l'influence des propriétés physiques du sol sur le développement du système racinaire avant et pendant la sécheresse peut affecter directement la contribution du système racinaire à la prévention de la sécheresse.

5.2 Effet du compactage des sols sur les rendements des céréales

Le développement des plantes à un génotype donné comprend des processus physiques (physiologiques), chimiques, biologiques, biochimiques et biophysiques. On peut distinguer deux facteurs fondamentaux influençant la production végétale : les effets du sol et les effets de l'atmosphère. Le rendement maximum est atteint lorsque ces conditions sont optimales pour la plante durant sa croissance (Raghavan et al., 1990). Les effets de la résistance du sol sur la croissance des céréales dépendent de plusieurs facteurs : la profondeur de la couche compactée, le génotype, les caractéristiques d'enracinement et de croissance racinaire de la culture, le type de sol (Nawaz et al., 2013), et l'humidité contenu (Raghavan et al. 1979 ; Mouazen et al., 2003 ; Nawaz et al., 2013) et enfin, les facteurs climatiques (Jones et al., 1995). D'après des études, dans le cas d'un loam limoneux naturel compacté (non compressé), il y a eu une réduction de 21 % du rendement du maïs, tandis que dans le loam et le loam sableux fin, elle est de 10 %. La résistance du sol a une influence sur la racine des céréales

(Czyż et al., 2001 ; Wolkowski et Lowery, 2008; Lipiec et al., 2012) à son tour sur la maturation physiologique, la croissance et le rendement de la plante entière, et affecte en outre l'apport en nutriments, indépendamment de la culture. Malgré cela, dans la couche du sol plus profonde, le compactage du sous-sol n'est pas présent ; le compactage de surface affecte l'exploration et la croissance des racines (Taboada et Alvarez, 2008). Les semis de maïs ont été affectés de manière significative par les traitements de compactage dans (Taser et Kara, 2005) et le rapport de pousses dans (Wolfe et al., 1995), respectivement.

(Kristoffersen et Riley, 2005) ont étudié l'orge de printemps pour trois types de sol présentant divers degrés de résistance du sol. Ceci a été confirmé par (Ishaq et al., 2001) en culture céréalière qui ont observé une réduction de rendement de 12 à 38 % sous la compacité naturelle du sol. Ceux-ci montrent clairement que la résistance à la pénétration est négativement corrélée avec la longueur et la masse des racines et qu'il existe une relation significative entre les types de sol, le compactage du sol (loam, loam argileux et loam limoneux) et l'utilisation de l'eau. Dans d'autres expériences, la consommation d'eau du blé en alimentation continue était plus élevée sur les loams limoneux et les loams sableux (Lipiec et al., 2002).

Au cours des années, le rendement du maïs variait en fonction de la teneur en eau du sol. (Lindstrom et Voorhees, 1995) ont trouvé une réponse positive du maïs au compactage pendant les années sèches et une réponse négative pendant les saisons plus humides. Dans le cas des sols limoneux, des réductions de rendement du maïs ont été observées durant les années humides (en raison d'un mauvais drainage), sur la base d'une année météorologique standard, mais les années sèches, le rendement a augmenté (Orrben et Thorp, 1931). (Kirkegaard et al., 1992) ont observé des réductions plus élevées du rendement du pois résultant du compactage qui variaient de 100 % en saison très sèche, et à 0 % en saison plus humide dans les sols argileux.

(Franke et al., 2008) ont trouvé un rendement de maïs de 4,9 et 4,4 t/ha, avec une moyenne de 4,65 t/ha, dans un sol limoneux à 25 % d'argile (2002 et 2003 : années pluvieuses), tandis que pendant la saison sèche de 2004, ils ont produit un rendement 3,9 t/ha de maïs. Contrairement à cela, la plante n'a pas répondu à l'engrais, la réponse à l'engrais était absente. D'autre part, (Ijoyah et al., 2012) ont signalé des réductions de rendement de 34 % en saison sèche sur les loams sableux (teneur en argile de 7 à 20 %), par rapport au rendement en saison humide. (Poincelot, 1986) affirme qu'il ya un effet limitant sur le rendement du maïs de 50 %

ou plus sur les sols naturels compactés. (**Chen et Weil, 2011**) ont également examiné les effets du compactage sur les rendements du maïs dans deux sites expérimentaux dans des conditions de croissance humides et sèches.

Ils ont établi une compacité moindre avec un pourcentage d'argile plus élevé (loam), dans des conditions humides que dans un sol à plus faible teneur en argile. La diminution des rendements (8 à 33 %) en semis direct et en traitements de printemps peu profonds, malgré la teneur en eau plus élevée disponible, peut s'expliquer en partie par l'état compacté de la couche de sol de 15 à 25 cm (**Rátonyi et al. 2005**). Ainsi, la résistance du sol dépend fortement de la teneur en eau (humidité du sol), les sols humides avec une teneur en argile plus élevée sont plus sensibles au compactage que les sols plus secs. (**Nawaz et al., 2013**) soulignent l'importance de la teneur en colloïdes des sols ; ils suggèrent que les loams limoneux à faible teneur en colloïdes sont plus sensibles au compactage du sol que les loams à texture moyenne ou fine et les sols argileux sous une teneur en eau plus faible, contrairement aux sols sableux.

(**Birkás et al., 2009**) ont examiné l'effet du compactage du sol et du travail du sol sur le blé, orge, et maïs, les travaux expérimentaux ont prouvé une corrélation entre le sous-sol compacté et le degré d'endommagement due au climat.

CONCLUSION
BIBLIOGRAPHIQUE
ET OBJECTIFS DE
L'EXPÉRIMENTATION

Conclusion bibliographique et objectifs de l'expérimentation

Le travail du sol a une influence considérable sur les conditions de croissance et les performances des cultures, il est effectué principalement pour optimiser la productivité du sol en modifiant sa composition chimique, propriétés physiques et biologiques. Le travail du sol doit atténuer les effets néfastes du progrès technologique de la mécanisation agricole, en particulier le compactage des sols.

Il a été démontré par plusieurs auteurs tels que (**Schlüter et al., 2018 ; Voltr et al., 2021**) que les passages répétés des machines dans les parcelles pendant le travail du sol conventionnel augmentent le compactage du sol.

Les machines agricoles de plus en plus lourdes endommagent les agrégats du sol, augmentent la densité et la teneur en eau du sol et diminuent la porosité et la perméabilité du sol (**Aikins et al., 2012 ; Somasundaram et al., 2018**).

Le compactage du sol compromet l'aération et la capacité de rétention d'eau du sol, et induit des changements dans ses propriétés chimiques et biologiques, entraînant une dégradation du sol et une diminution des rendements des cultures. Les effets néfastes du compactage du sol ne sont pas visibles uniquement dans la couche arable. Des couches de sol plus profondes sont également compactées, ce qui peut conduire à la formation de semelles de labour très difficiles à éliminer.

Dans l'agriculture d'aujourd'hui, on cherche à remplacer les labours énergivores par des labours simplifiés, en réduisant le nombre et l'intensité du travail du sol, voir le supprimer totalement. Une telle approche devra pouvoir avoir un effet protecteur sur le sol, contribue à préserver la valeur naturelle des agro écosystèmes et à réduire les coûts de production. Cependant, l'adoption des systèmes non-labour à long terme, peut provoquer aussi des couches compactées jusqu'à 20 cm, caractérisées par une densité apparente élevée, une faible porosité et une résistance mécanique élevée.

Dans ce contexte, et pour promouvoir le développement d'une agriculture durable, les effets combinés du compactage du sol, et du travail conventionnel et simplifié du sol, devraient être étudiés avec la plus grande attention, pour concevoir des systèmes de culture qui maximisent les rendements et minimisent la dégradation du sol.

Le but de la présente expérimentation est d'évaluer les effets du compactage du sol et de différents systèmes de travail du sol sur les propriétés physico-mécaniques du sol semé de blé et orge.

La partie expérimentale s'articule en trois parties :

1. La première partie : a porté sur l'étude de compactage des sols agricoles au laboratoire, il s'agit d'une part, d'analyser l'effet de l'intensité du compactage sur la structure du sol, et conséquences sur le développement racinaire de trois variétés de blé dur, et d'autre part, une étude de la compressibilité du sol en fonction de la variation de l'humidité.

Dans cette partie, nous avons réalisé deux expérimentations différentes au laboratoire, dont les résultats seront présentés ultérieurement au **chapitre 02**.

- Au cours de **la première expérimentation**, on a analysé le comportement morphologiques et le développement du système racinaire de trois variétés de blé dur semées, dans des pots en plexiglas sous l'effet de trois niveaux de compactage : *sol compacté en surface*, *sol compacté en profondeur*, et *sol compacté totalement*, avec deux taux d'humidité différents. L'objectif est de faire ressortir l'effet du compactage et l'humidité du sol sur le développement du blé et son système racinaire.
- **La deuxième expérimentation** a porté sur l'étude de la compressibilité du sol, dans le but de faire ressortir l'effet de la machinerie sur la structure du sol. Pour cette expérimentation, nous avons effectué un test au laboratoire de résistance des matériaux (RDM) de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique.

Les paramètres mesurés sont :

- L'évolution de la croissance de plante
- L'évolution de croissance des racines
- L'évolution de la densité racinaire
- L'étude de la compressibilité du sol

2. La deuxième partie de notre expérimentation a porté sur l'analyse de l'effet combiné du compactage du sol et des techniques culturales (travail conventionnel et semis direct) sur le comportement physico-mécanique du sol et son impact sur les caractéristiques morphologiques de l'orge, ainsi que sur le développement racinaire et le rendement ; Cette expérimentation a été menée à l'ITGC de Oued Smar. Les résultats seront présentés ultérieurement au **chapitre 03**.

Les paramètres mesurés sont :

- Paramètres liés au sol :
 - L'évolution de l'humidité (%)
 - L'évolution de la porosité (%)
 - L'évolution de la résistance mécanique (daN/cm²)

- Paramètre lié à la croissance des racines :
 - L'évolution de la densité racinaire (g/cm³)
 - Le diamètre des racines (mm)

- Paramètres liés au rendement et ses composantes :
 - Le poids de mille grains (g)
 - Le nombre d'épi par mètre carré
 - Le nombre de grain par épi
 - Le rendement estimé en grain. (qx/ha).

3. la troisième partie des expérimentations a porté sur l'analyse de l'effet des techniques culturales sur les paramètres de production du blé. Cette expérimentation a été menée à la ferme centrale de l'ENSA. Les résultats seront présentés ultérieurement au **chapitre 04**.

Les paramètres mesurés sont :

- Paramètres liés au sol :
 - L'évolution de l'humidité (%)
 - L'évolution de la porosité (%)
 - L'évolution de la résistance mécanique (daN/cm²)

- Paramètre lié à la croissance des racines :
 - L'évolution de la densité racinaire (g/cm³)
 - Le diamètre des racines (mm)

- Paramètres liés au rendement et ses composantes :
 - Le poids de mille grains (g)
 - Le nombre d'épi par mètre carré
 - Le nombre de grain par épi
 - Le rendement estimé en grain. (qx/ha).

LA PARTIE

EXPÉRIMENTALE

Chapitre 02 : L'étude de compactage des sols agricoles au laboratoire

Introduction

La productivité réduite des céréales sur un sol compacté résulte principalement de la diminution des taux d'élongation des racines et donc de l'accès limité à l'eau et aux nutriments, où dans les sols compactés, la croissance des racines est réduite en raison de la résistance élevée à la pénétration dans le sol. Pour étudier l'effet de compactage sur le développement du blé dur et son impact sur le système racinaire, nous avons effectué dans ce chapitre deux tests au laboratoire, le choix de cette culture est dicté par le fait que la production du blé et des céréales en Algérie pose un grand problème, et n'est pas trop exigeant.

2.1. Matériels utilisés

Pour mener à bien cette expérimentation, un matériel spécifique a été utilisé. Les essais ont été réalisés à l'intérieur d'une serre agricole.

2.1.1. Matériel végétal

La culture qui a été choisie pour cette expérimentation est le blé dur (trois variétés), le choix de cette espèce est dicté par le fait qu'elle se caractérise par son système racinaire développé.

La première variété utilisée de blé dur (*Triticum durum, Desf*), est la variété *mohammed ben bachir*. C'est une variété locale depuis 1931, son origine est la station centrale d'amélioration des grandes cultures (ITGC 1994). C'est le résultat d'une sélection généalogique effectuée dans une variété de la région de Sétif nord (**Kadra, 1974**). Elle présente des pailles hautes et creuses et des grains clairs ambrés à calibre moyen. Elle est caractérisée par un cycle de développement tardif, un tallage moyen et une productivité moyenne.

La deuxième variété utilisée de blé dur est *Bousselam*, issue de croisement Heider/MT/Ho, de « International Center for Agricultural Research in the Dry Areas » (**ICARDA**). C'est une sélection de la ferme semencière ITGC (Sétif). Elle est productive et mesure 90-100 cm de hauteur, possédant une PMG élevée. Son épi est demi-lâche, blanc, barbes noires et moyennement sensible à l'égrainage.

La troisième variété utilisée de blé dur *Boutaleb (Hedba 3 X ofanto)* son origine est la station centrale d'amélioration des grandes cultures ITGC, sa zone de culture est les hauts plateaux, plaine intérieures (*Annexe 2*).

2.1.2. L'unité expérimentale

Nous avons cultivé le blé dans des pots, ces derniers ont été fabriqués par nos soins pour faciliter l'observation de l'évolution des racines. Ils sont de forme cubique, leurs supports sont en bois alors que les deux faces avant et arrière sont en plexiglas. Notre choix s'est porté sur le Poly méthacrylate de méthyle pour nous permettre d'apprécier l'évolution des racines. La figure suivante représente ces pots pour plantes :

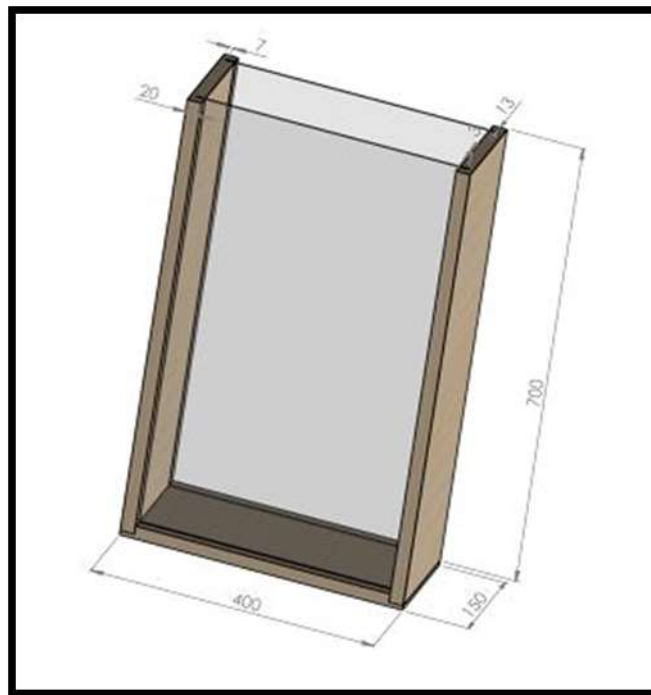


Figure 7: pot en plexiglass réalisé par logiciel Solidworks 2016



Figure 8: Pots en plexiglas

2.1.3. L'outil de compactage

Pour compacter le sol, nous avons utilisé une presse hydraulique, la figure suivante représente l'outil utilisé :



Figure 9: la presse hydraulique

2.2. Méthodologie

Pour la réalisation de cette expérience on a bien évidemment suivi un plan allant de la première étape qui consiste à la préparation des échantillons du sol jusqu'à la dernière étape ou nous avons quantifié le degré de compactage et les indices du développement du blé et le développement racinaire.

2.2.1. Première étape : préparation des échantillons du sol

Avant de semer le blé, on a bien pris le soin de préparer les échantillons du sol pour remplir les pots, et avant de préparer ces échantillons, nous avons choisi une texture argileuse du sol, l'analyse du sol a donné les résultats suivants :

Tableau 1: Analyse des échantillons du sol utilisé pour l'essai

Le Paramètre	Granulométrie					matière organique	calcaire totale	pH
	limon-fin	limon	sable fin	sable grossier	argile			
La valeur	41.69%	22.89%	7.67%	12.46%	15.29%	1.19%	1.72%	7.78
La Méthode	la pipette de Robinson					méthode	méthode	pH

Pour notre part, notre sol appartient à la classe texturale **argileuse** avec un taux d'argile avoisinant les **15.29 %** et un pH de 7,78. D'après la teneur en argile influe considérablement sur la sensibilité du sol au tassement, le taux d'argile de notre sol est entre 10 % et 22 %, les sols sont sensibles. (**Kouassi 1977**).

2.2.2. Deuxième étape : détermination taux de germination des trois variétés du blé dur

2.2.2.1. Détermination du taux de germination

Le blé comme toutes les céréales demande pour la réussite de sa culture une bonne germination. Pour assurer un bon peuplement il est donc primordial de connaître le pouvoir germinatif des graines ensemencées. La détermination du taux de germination au laboratoire nous donne les valeurs suivantes sur les dix échantillons de 100 graines.

Chapitre 02 : L'étude de compactage des sols agricoles au laboratoire



Figure 10 : taux de germination des trois variété du blé

Tableau 2 : taux de germination de 10 échantillons de 100 grains variété *mohamed ben bachir*

Echantillons	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Taux de germination	90	87	90	91	88	90	88	86	90	91

Donc le taux de germination moyen est de **88.1%**, ce qui est une bonne valeur.

Tableau 3: taux de germination de 10 échantillons de 100 grains variété *boutaleb*

Echantillons	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Taux de germination	85	84	87	90	89	88	90	89	85	84

Donc le taux de germination moyen est de **86%**, ce qui est une bonne valeur.

Tableau 4: taux de germination de 10 échantillons de 100 grains variété *Bousselam*

Echantillons	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Taux de germination	89	88	91	90	89	90	85	89	88	86

Donc le taux de germination moyen est de 88.5 %, ce qui est une bonne valeur.

2.2.2. Troisième étape : le remplissage des pots

Cette étape a consisté à remplir les pots tout en tassant le sol selon le type de compactage. Nous avons divisé les pots en quatre groupes de six pots. Dans le premier groupe nous avons laissé le sol normal sans compactage. Dans le deuxième groupe, nous avons compacté le sol en surface. Dans le troisième groupe nous avons tassé le sol en profondeur des pots, et en quatrième groupe, nous avons tassé le sol complètement. Chaque groupe contient six pots, ces derniers sont divisés en trois variétés, et deux taux d'humidité.

➤ **Le premier groupe** : les pots témoins : sol non compacté



Figure 11: sol non compacté

- **Le deuxième groupe** : Sol compacté en surface



Figure 12: sols compactés en surface

- **Troisième groupe** : sol compacté en profondeur
- **Quatrième groupe** : sol compacté totalement

2.2.3. Quatrième étape : le suivi de la culture

Les pots ont été mis dans une serre au niveau de département de génie rural, à l'école nationale supérieure agronomique.



Figure 13 : la serre agricole de l'essai expérimental

2.2.4. Méthode de détermination de la longueur des plantes et racines

Elle consiste à prendre les mesures de l'élongation des racines et les tiges des plantes de chaque pot à l'aide d'un pied à coulisse et un mètre. Vu qu'on a travaillé au niveau de la serre sur des pots et pas dans le champ, nous avons essayé de mesurer la profondeur d'enracinement maximale atteinte par les racines de la plante sur place en creusons et c'était bien évidemment plus simple qu'au champ surtout qu'on a l'avantage d'avoir des pots conçus en plexiglas ce qui nous a permis d'apprécier au mieux le cheminement des racines.

2.2.5. Méthode de détermination de la densité racinaire

Elle consiste à prélever sur une surface de 225 cm² et la profondeur maximale du pot des échantillons de terre avec racines. Ce mélange terre + racines sera déposé dans un tamis de maille fine et à l'aide d'un jet d'eau nous éliminons la terre. Ensuite les échantillons séjourneront 24 heures dans de l'eau et seront relavés de nouveau jusqu'à élimination totale de la terre. Ils seront séchés par la suite et pesés.



Figure 14 : mesure de la densité racinaire

2.2.6. Choix des paramètres et indices

Afin d'analyser l'impact du compactage sur le développement de la plante et le système racinaire, nous étudieront le développement racinaire de la plante et à travers la profondeur d'enracinement, la densité racinaire, et l'élongation de sa tige. Ces trois paramètres caractérisent l'importance du développement racinaire et nous permettront de juger de la qualité des racines en relation avec les différents degrés et types de compactage des sols, dans deux taux d'humidité différents et pour les trois variétés du blé dur.

2.3. Résultats et interprétations

2.3.1. Analyse de l'effet combiné du compactage avec l'humidité du sol sur la croissance de trois variétés de blé

2.3.1.1. La variation de la hauteur des tiges du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété *mohamed ben bachir*)

La figure ci-dessous représente la variation de la hauteur des tiges du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété *mohamed ben bachir*) :

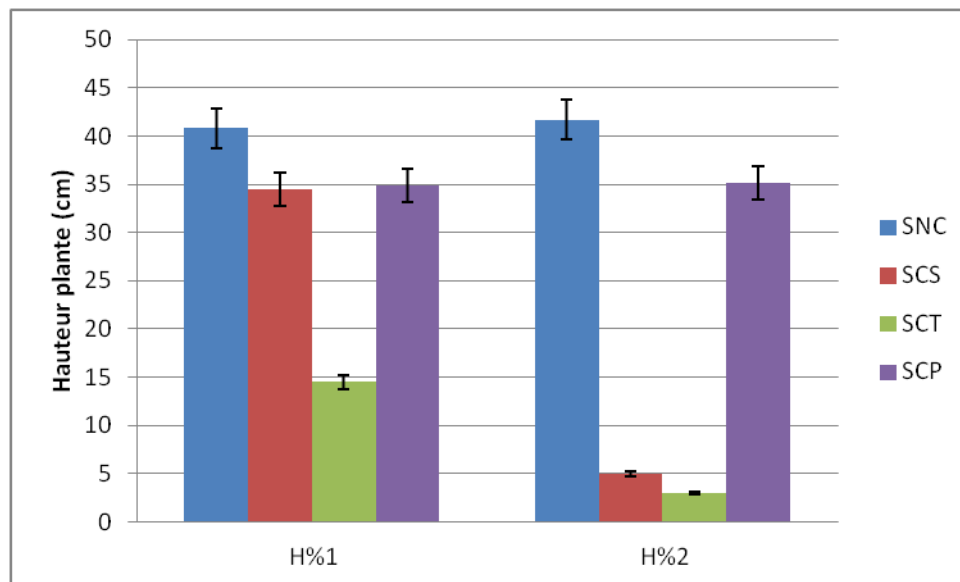


Figure 15: la variation de la hauteur des tiges du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété *mohamed ben bachir*)

Le développement de la hauteur des plantes semble être différent pour les trois types de tassement et la variation de taux d'humidité du sol. La meilleure hauteur des plantes du blé (*mohamed ben bachir*) a été obtenue pour le premier groupe des pots, où nous n'avons exercé **aucun compactage**. Contrairement, les petites hauteurs ont été obtenues pour le deuxième le troisième groupe, où nous avons exercé **un compactage en surface** et **un compactage total** respectivement. Ce compactage a eu certainement un effet négatif sur le développement de la plante avec l'absence de l'affinement du sol et la bonne terre fine dans laquelle a été déposée la semence après le tassement.

On remarque toutefois une grande différence pour les hauteurs obtenues dans les pots de deuxième et troisième groupe compactés en H% 1 (sol sec), où nous avons enregistré dans ces pots les meilleurs résultats. Cela ne peut être expliqué que par le tassement à un grand effet sur les sols humides que les sols secs.

2.3.1.2. La variation de la longueur des racines du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété *mohamed ben bachir*)

La figure ci-dessous représente la variation de la longueur des racines du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété *mohamed ben bachir*) :

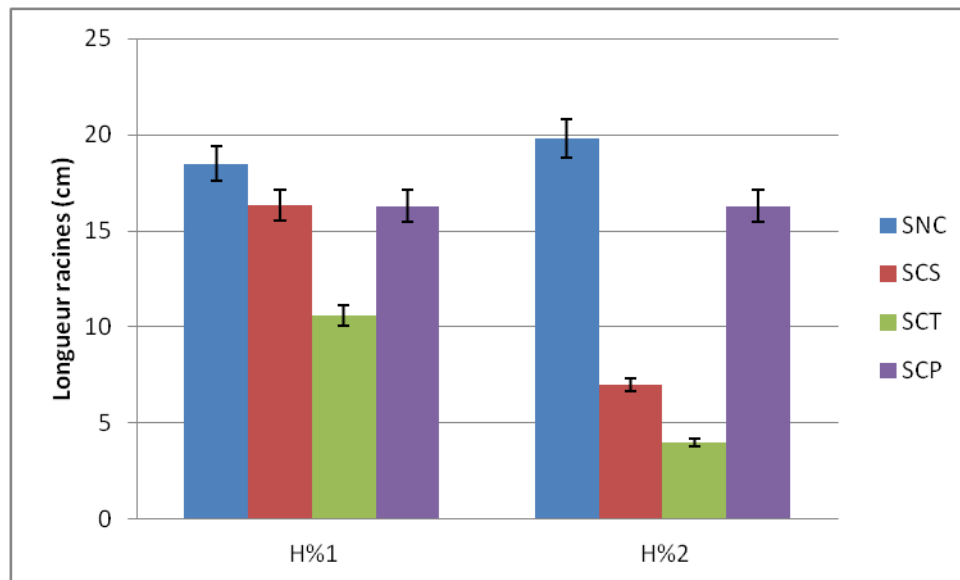


Figure 16 : la variation de la longueur des racines du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété *mohamed ben bachir*)

Il apparaît clairement d'après les résultats, que le développement du système racinaire du blé variété *mohamed ben bachir* semble être différent pour les trois cas de tassement et de taux d'humidité du sol. Le meilleur développement racinaire a été obtenu dans les sols où nous

n'avons exercé *aucun compactage*. Contrairement, aux sols ou nous avons exercé *un compactage en surface* et *un compactage total*, la longueur racinaire. Le compactage a eu certainement un effet négatif sur le développement des racines de la plante.

Toutefois, On remarque une grande différence entre les valeurs des longueurs des racines dans les deux séries des pots de deuxième et troisième groupe compactés en deux taux d'humidités différents. Nous avons enregistré les meilleurs résultats dans les pots compactés en état sec.

2.3.1.3. La variation de la densité racinaire du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété mohamed ben bachir)

La figure ci-dessous représente : la variation de la densité racinaire du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété mohamed ben bachir) :

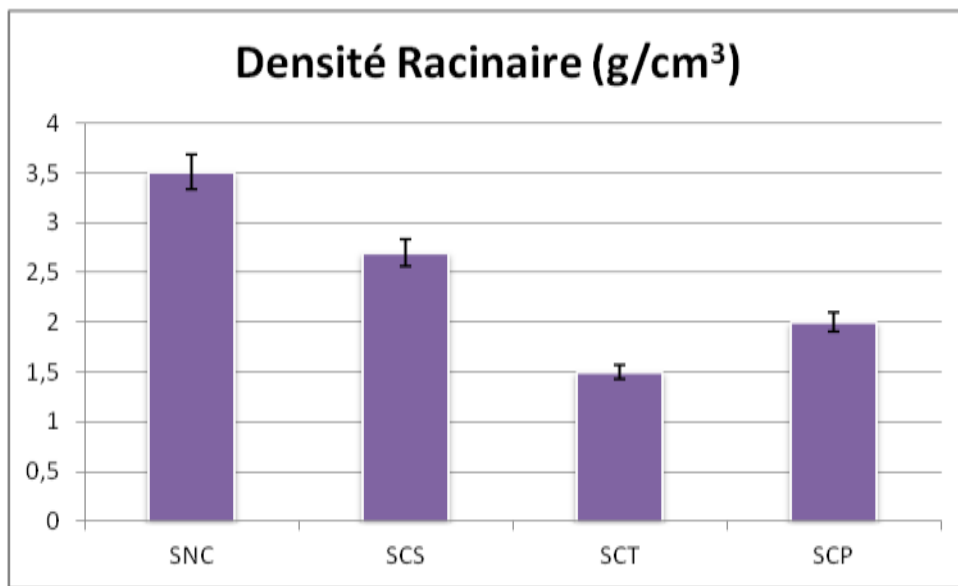


Figure 17 : la variation de la densité racinaire du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété mohamed ben bachir)

Le développement de la densité racinaire semble être différent pour les différents cas de compactage. Les meilleures densités des racines du blé obtenues pour le premier groupe des pots, ou nous n'avons exercé *aucun compactage*, avec une valeur de **3.5 g/dm³**. Pour le deuxième groupe des pots compactés en surface seulement, nous avons enregistré une valeur

moyenne de 2.6g/dm^3 . La densité racinaire la plus faible a été obtenue pour le troisième groupe, ou nous avons exercé *un compactage total*, avec une valeur de 1.5 g/dm^3 .

On constate qu'il y a une relation inverse entre le type de compactage et la densité racinaire, toutefois le degré de compactage augmente, on enregistre les petites valeurs moyennes des densités racinaires.

2.3.1.4. La variation de la hauteur des tiges du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété *boutaleb*)

La figure ci-dessous représente la variation de la hauteur des tiges du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété *boutaleb*) :

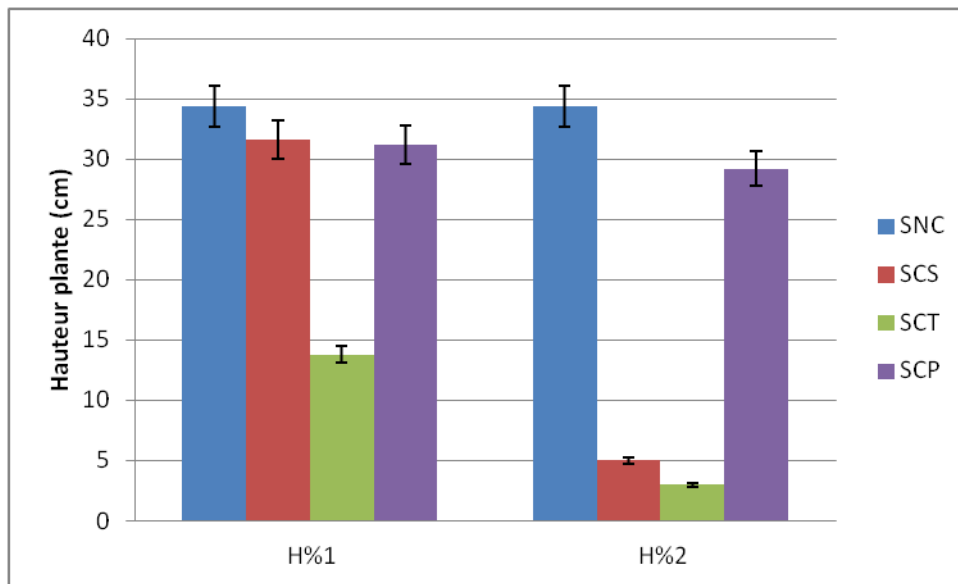


Figure 18: la variation de la hauteur des tiges du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété *boutaleb*)

Pour la variété *Boutaleb*, les résultats obtenus ressemblent à ceux de la variété *mohamed ben bachir*, ils montrent que le développement de la hauteur des plantes semble être différent pour les différents cas de tassement et le taux d'humidité du sol. La hauteur des plantes du blé la plus importante, a été obtenue pour le premier groupe des pots, ou nous n'avons exercé *aucun compactage*. Par contre, les plantes qui ont trouvé du mal à prendre de la hauteur, ont été obtenus pour le deuxième le troisième groupe, ou nous avons exercé *un compactage en surface* et *un compactage total* respectivement. Aussi, une grande différence pour les

hauteurs obtenues dans les pots de deuxième et troisième groupe pour les deux taux d'humidité.

2.3.1.5. la variation de la longueur des racines du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété boutaleb)

La figure ci-dessous représente la variation de la longueur des racines du blé en fonction de type de compactage et l'humidité variété *boutaleb* :

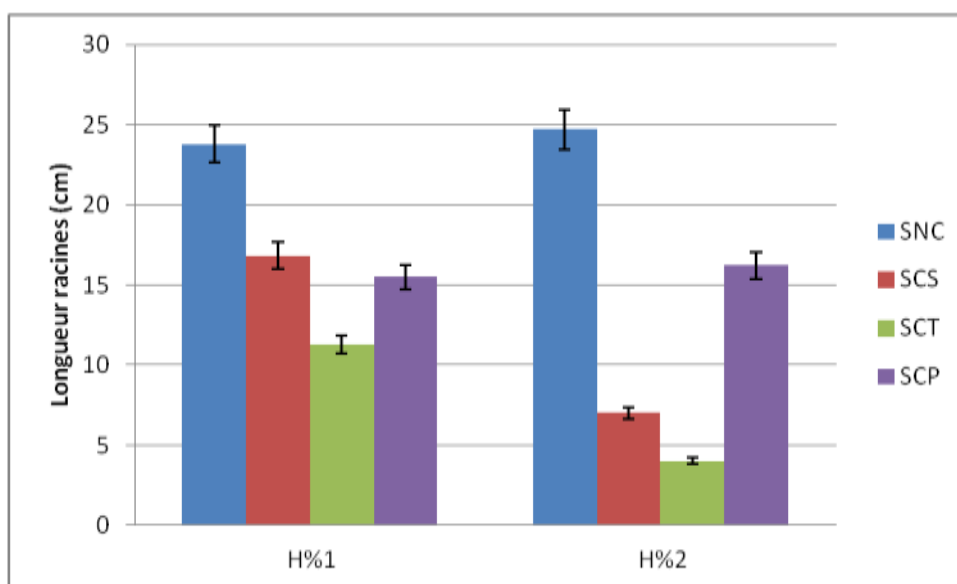


Figure 19: la variation de la longueur des racines du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété *boutaleb*)

Concernant le développement de système racinaire, il semble être différent aussi pour les différents cas de tassement et le taux d'humidité du sol. Le meilleur résultat a été obtenu pour le premier groupe des pots témoins sans compactage, et nous avons obtenus les mauvais résultats de développement des racines dans le deuxième et le troisième groupe, ou nous avons exercé *un compactage en surface* et *un compactage total* respectivement.

2.3.1.6. La variation de la racinaire du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété boutaleb)

La figure ci-dessous représente la variation de la racinaire du blé en fonction de type de compactage et l'humidité variété *boutaleb*

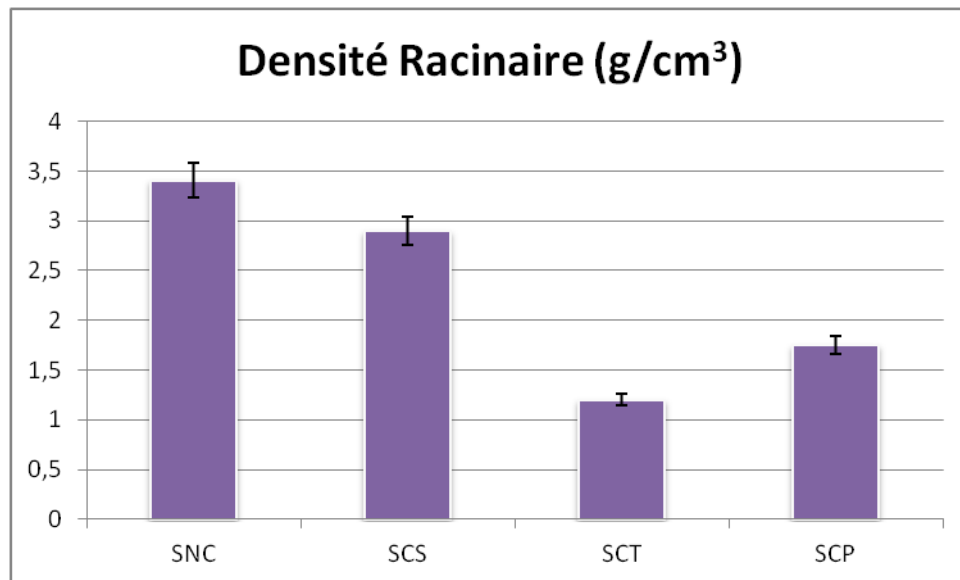


Figure 20: la variation de la racinaire du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété *boutaleb*)

Le développement de la densité racinaire semble être différent pour les différents cas de tassement. La meilleure densité des racines a été obtenue pour le premier groupe des pots, ou nous n'avons exercé *aucun compactage*, avec une valeur de **3.4 g/dm³**, nous avons obtenu pour le troisième groupe *compacté totalement* les mauvais résultats, avec une valeur de **1.2 g/dm³**.

2.3.1.7. La variation de la hauteur des tiges du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété *bousselam*)

La figure ci-dessous représente la variation de la hauteur des tiges du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété *bousselam*) :

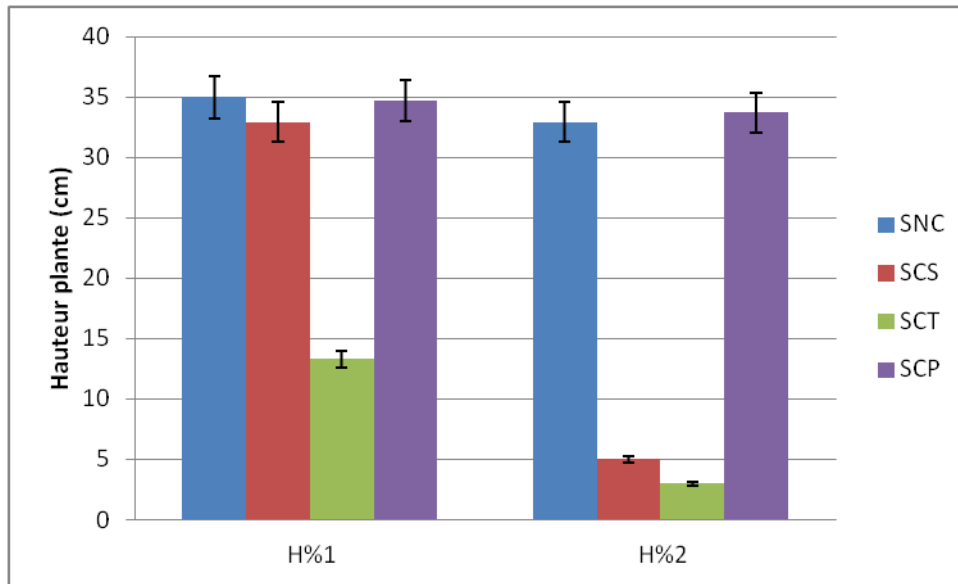


Figure 21: la variation de la hauteur des tiges du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété bousselam)

Le développement de la hauteur des plantes a été difficile dans les sols compactés en état humide. La meilleure hauteur des plantes du blé (*bousselam*) a été obtenue pour le premier groupe des pots, ou nous n'avons exercé *aucun compactage*. Contrairement, faibles hauteurs ont été obtenues pour le deuxième et le troisième groupe, ou nous avons exercé *un compactage en surface* et *un compactage total* respectivement. On remarque toutefois des hauteurs faibles dans les pots de deuxième et troisième groupe compactés en H% 2 (sol humide). Cela ne peut être expliqué que par le tassement, qui a un effet important sur les sols humides que les sols secs.

2.3.1.8. La variation de la longueur des racines du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété bousselam)

La figure ci-dessous représente la variation de la longueur des racines du blé en fonction de type de compactage et l'humidité variété *bousselam* :

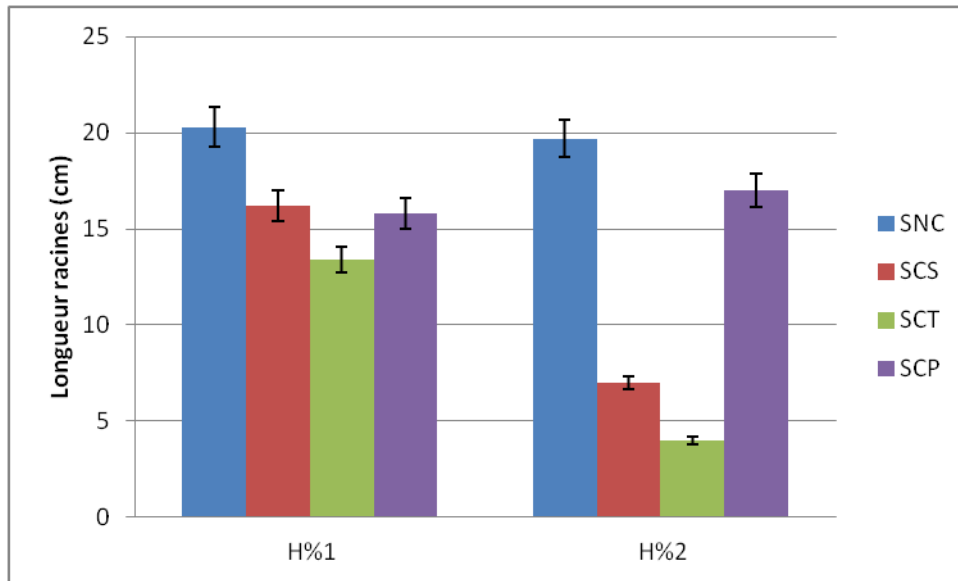


Figure 22: La variation de la longueur des racines du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété *bousselem*)

Il apparaît d'après la figure ci-dessus, que le développement du système racinaire de la variété *bousselem* semble être le meilleur pour le premier groupe des pots, ou nous n'avons exercé *aucun compactage*. Ainsi, Les mauvais résultats ont été obtenus toujours pour le deuxième et le troisième groupe, ou nous avons exercé *un compactage des sols humides en surface* et *un compactage total* respectivement. Ce compactage a eu certainement un effet négatif sur le développement des racines de la plante. Toutefois, On remarque une grande différence entre les valeurs des longueurs des racines dans les deux séries de pots de deuxième et troisième groupe compactés en deux taux d'humidités différents. Nous avons enregistré les densités racinaires les plus importants dans les pots compactés en état sec.

2.3.1.9. La variation de la densité racinaire du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété *bousselem*)

La figure ci-dessous représente la variation de la densité racinaire du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété *bousselem*) :

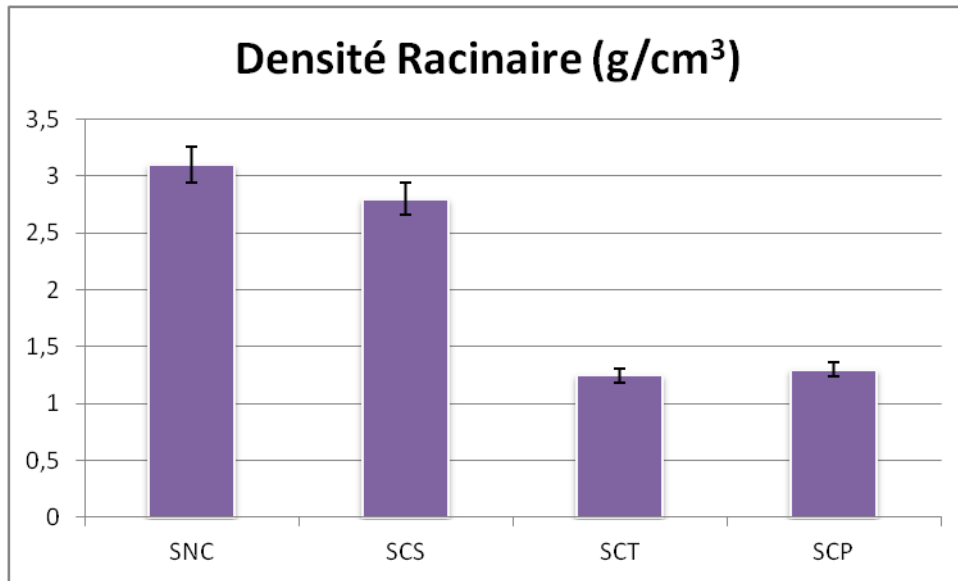


Figure 23: la variation de la racinaire du blé en fonction de type de compactage et l'humidité (variété bousselam)

Les valeurs moyennes de la densité racinaire enregistrées pour les différents cas de compactage en état sec et état humide, donnent les meilleures densités des racines du blé obtenues en premier groupe des pots, ou nous n'avons exercé *aucun compactage*, avec une valeur de **3 g/dm³**. Pour le deuxième groupe des pots compactés en surface seulement, nous avons enregistré une valeur moyenne de **2.6g/dm³**. Pour le troisième groupe des pots compactés en profondeur, nous avons enregistré une valeur moyenne de **2.2 g/dm³**. La densité racinaire la plus faible a été obtenu dans le troisième groupe, ou nous avons exercé *un compactage total*. Avec une valeur de **1.1 g/dm³**.

On constate qu'il y a une relation proportionnelle entre le type de compactage et la densité racinaire, toutefois quand le degré de compactage augmente, les densités racinaires baissent.

D'après les résultats obtenus, on constate bien que la hauteur des plantes, la profondeur des racines et la densité racinaire, sont inversement proportionnelles au tassement du sol, degré de compactage, et le taux d'humidité du sol, c'est-à-dire moins le sol est tassé, plus la hauteur des tiges, la profondeur des racines et la densité racinaire sont importantes. Et c'est ce que nous avons enregistré au niveau du premier groupe des pots (le témoin) avec une moyenne des hauteurs de 35 cm, une moyenne des profondeurs des racines de 21 cm, et une densité racinaire de **3 g/dm³**. Nous avons enregistré une moyenne faible des hauteurs dans les sols

Chapitre 02 : L'étude de compactage des sols agricoles au laboratoire

compactés (15 cm), une moyenne des profondeurs des racines de 11 cm, et une densité racinaire de **1.2 g/dm³**.

Les résultats obtenus nous ont permis de constater aussi l'effet du compactage sur les sols humides et sec. Nous avons enregistré des résultats satisfaisants concernant les hauteurs et les densités racinaires dans les sols tassés en état sec par rapport à ceux tassés en état humide. D'où l'importance de choisir le bon moment pour l'intervention avec les outils aratoires.

On remarque aussi une différence entre les valeurs moyennes enregistrées des hauteurs des plantes, des longueurs des racines et densités racinaires pour les trois variétés du blé. La variété *mohamed ben bachir* est plus résistible au tassement par rapport aux deux autres variétés. Cela nous a permis de constater que le choix de la culture, et de la variété est très important dans le cas des sols compactés.

Ces résultats nous ont permis de constater aussi l'effet du tassement et de l'humidité du sol sur le développement de la hauteur, et sur le développement racinaire d'une plante comme le blé dur.

Cela nous donne indirectement des informations utiles pour la réalisation des opérations de semis du blé dur. Cela évidemment conduira à l'obtention d'une structure optimale du sol qui permettra un bon développement des racines et par conséquent un bon rendement.

2.4. Etude de la compressibilité du sol au laboratoire

L'augmentation des besoins en équipements de l'agriculture moderne a provoqué la naissance puis le développement d'une puissante industrie du machinisme agricole. Et l'introduction des nouvelles techniques sans labour ne cesse de causer la réduction du volume poral dans le sol, ce qui se répercutera négativement sur développement racinaire. C'est dans ce contexte qu'on a voulu étudier la compressibilité du sol, dans le but de faire ressortir l'effet de la machinerie sur la structure du sol. Pour cela, nous avons effectué un test au laboratoire de RDM de l'ENSA, qui a pour but de déterminer la sensibilité des sols au tassement, ce test consiste à placer un échantillon de sol remanié dans des cylindres et faire varier le taux d'humidité dans chaque cylindre. Le sol est compacté dans chaque cylindre à l'aide d'un piston, on calcul alors la pression exercée et la densité apparente et on trace la courbe de variation de la masse volumique apparente ρ_a (g/cm³) en fonction de l'humidité w (%) qui est illustré dans la figure suivante.

2.5. Résultats et discussion

La figure ci-dessous représente la variation de la densité apparente en fonction de la teneur en eau :

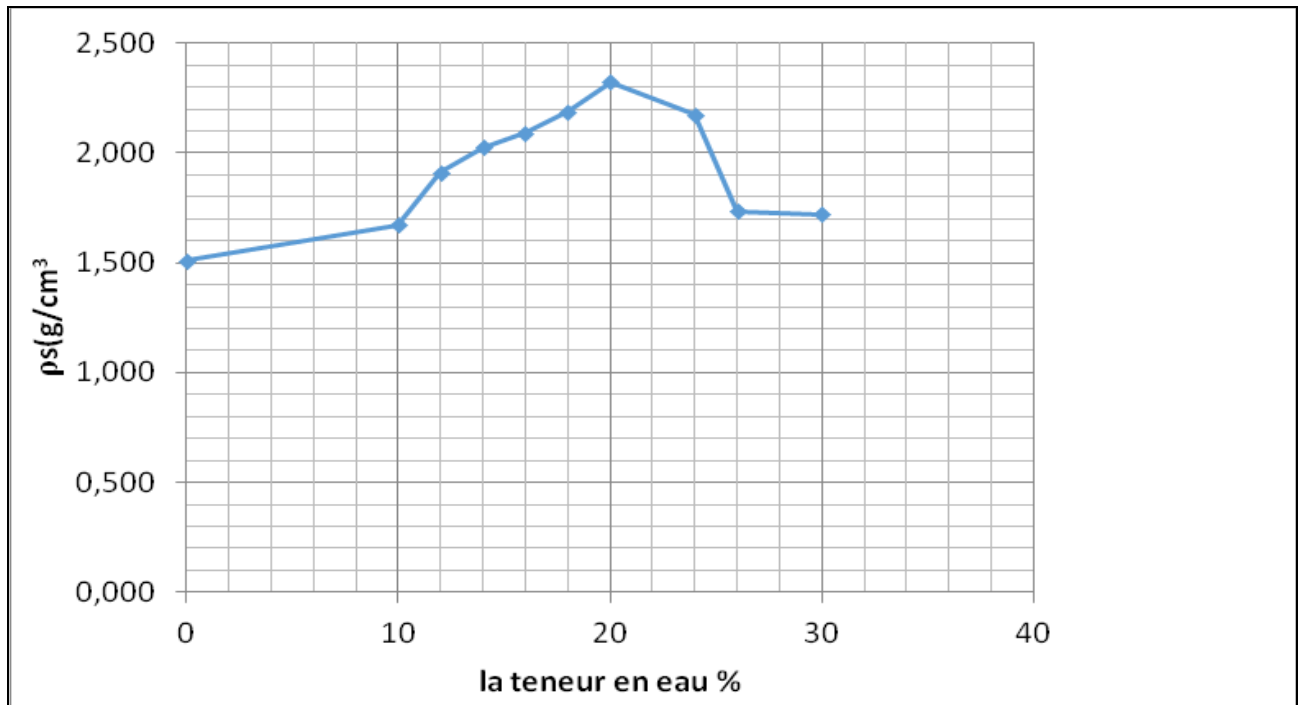


Figure 24: la variation de la densité apparente en fonction de la teneur en eau

2.6. Interprétation des résultats

- **Première phase : l'humidité < 10 %**

Dans cette partie de la courbe, la densité atteinte reste faible et peu variable avec la teneur en eau. Le tassement résulte du réarrangement et éventuellement du concassage des agrégats placés dans le moule.

- **Deuxième phase : 10% < l'humidité < 20%**

Au seuil de teneur en eau 20 %, La pente de la courbe s'accroît brusquement. Les agrégats deviennent déformables sous l'effet des contraintes qu'ils subissent et ceci d'autant plus qu'ils sont plus humides. La porosité qui existait entre eux disparaît progressivement. La masse volumique apparente atteinte est de 2,41 g/cm³ qui est proche de la masse volumique réelle,

ce qui veut dire que la porosité est proche de 0. Pour certains matériaux, si l'énergie appliquée est suffisante, on peut observer un tassement textural. FAURE a qualifié ce comportement de plastique et assimile le seuil de sensibilité au compactage à un seuil d'entrée en plasticité.

- **Troisième phase : l'humidité > 20%**

La fin du domaine plastique est marquée par l'existence d'un maximum de densité appelée optimum Proctor. Au delà de ce maximum, la densité décroît. Alors l'échantillon est saturé. L'eau étant incompressible, on peut le tasser davantage, et plus la teneur en eau est grande moins on peut le tasser. La relation teneur en eau – masse volumique apparente est hyperbolique et la courbe représentative est appelée hyperbole de saturation.

L'application des grandes pressions jusqu'à 10 daN/cm² élimine tous les vides qui existent entre les particules du sol en augmentant la masse volumique apparente jusqu'à 2.32 g/cm³ provoquant ainsi un fort compactage du sol. D'après des essais antérieurs, les sols labourés sont capables de supporter des pressions allant de 0,8 à 1 bar sans dommage en condition ressuyée. Au-dessus de cette limite, ils commencent à se tasser. La pression que reçoit le sol n'est pas directement la charge de l'engin, mais la pression exercée par le pneu. Cette pression est égale à la pression de gonflage à laquelle on ajoute le coefficient de rigidité de la carcasse du pneu. Autrement dit, un pneu de tracteur gonflé à 0,6 bar exerce une pression au sol de 0,8 bar, la différence provient de la rigidité du pneu. D'une manière générale, le tassement est influencé par l'état hydrique du sol, ceci est d'autant plus que la pression est importante, il ne faut surtout pas oublier la texture du sol qui joue un rôle prépondérant dans le tassement, un sol argileux présente plus de risque au tassement.

Conclusion

Les résultats obtenus au cours de ces essais confirment l'effet de tassement sur le sol, et sur le développement de la plante. D'après ces résultats obtenus, on peut aussi déduire qu'une bonne porosité du sol permet un bon développement de la plante, c'est ainsi qu'on a obtenu les meilleures hauteurs et les meilleures densités racinaires au niveau des pots non compactés. Donc le sol doit toujours présenter une résistance réduite pour permettre à la racine de pénétrer et de puiser l'eau et les éléments nutritifs disponibles dans le sol et indispensables pour

Chapitre 02 : L'étude de compactage des sols agricoles au laboratoire

le bon développement de la plante. D'une manière générale, ce modeste travail se voulait d'être une introduction à notre expérimentation qui a pour objectif l'analyse de l'effet combiné du compactage et les techniques culturales sur le comportement physico-mécanique des sols, et son impact sur le développement des céréales et les rendements.

**CHAPITRE 03 : ANALYSE DE
L'EFFET COMBINÉ DU
COMPACTAGE ET DU TRAVAIL DU
SOL SUR LE COMPORTEMENT
PHYSICO-MÉCANIQUE D'UN SOL
ARGILEUX ET CONSÉQUENCES SUR
LE DÉVELOPPEMENT DE L'ORGE**

Chapitre 03 : Analyse de l'effet combiné du compactage et du travail du sol sur le comportement physico-mécanique d'un sol argileux et conséquences sur le développement de l'orge

Introduction et objectif de l'essai

Cet essai vise à étudier les effets des interactions entre le fonctionnement des machines agricoles (nombre de machines, poids des machines, nombre de passages,...), et les techniques culturales (travail du sol et semis direct) sur le tassement du sol. Et ses conséquences sur les propriétés physico-mécaniques du sol (la teneur en eau, la porosité du sol, la résistance à la pénétration), et sur le développement de la culture de l'orge (taux de peuplement, développement de système racinaire, et les rendements).

3.1. Présentation du site expérimental

3.1.1. Description et localisation du site expérimental

Les essais expérimentaux faisant l'objet de notre étude se sont déroulés à la station expérimentale de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) à Oued Smar dans la partie Nord Est de la Mitidja.

La station expérimentale à une altitude de 24m, latitude 36°43' Nord, longitude 30° 84' Est (**figure 25**). En générale, elle occupe une superficie de 100 ha environ, à vocation scientifique, il est chargé du développement de la filière des grandes cultures (céréales, légumineuses, cultures fourragères), afin de répondre aux besoins alimentaires du pays et aux nouveaux défis révélés par les crises alimentaires et les risques climatiques.



Figure 25 : Situation géographique de l'institut technique des grandes cultures (ITGC) Oued Smar

3.1.2. Le climat de la région d'étude

La station expérimentale de l'ITGC de Oued Smar est caractérisée par un climat humide, à hiver doux et pluvieux, et été chaud et sec. Le diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN (Figure 29) calculé pour la période allant de 2010 à 2019, montre l'existence d'une saison humide et relativement froide qui s'étend sur sept (07) mois, et d'une saison sèche et chaude dans le reste de l'année.

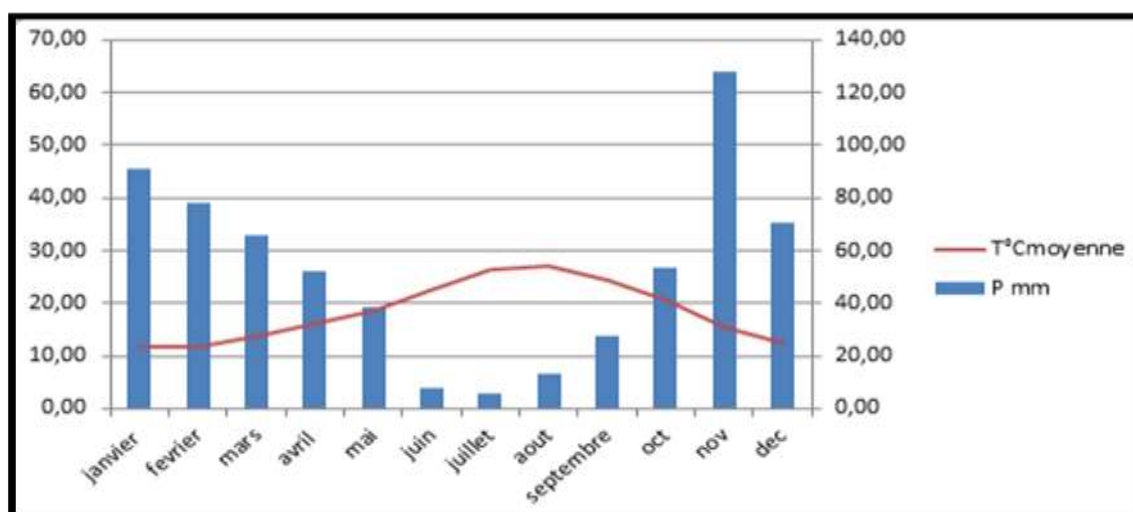


Figure 26: Le diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN (La région de Dar El-Beida)

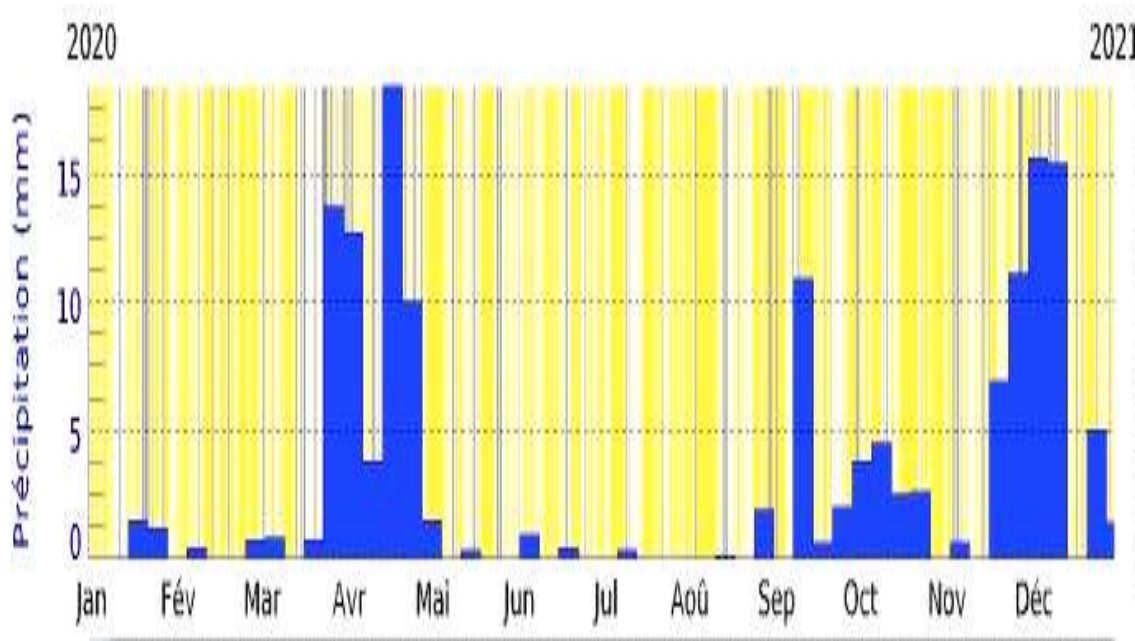
Avec :

P : pluviométrie totale mensuelle

T : température moyenne mensuelle

3.1.3. Conditions climatiques de la campagne d'essais

La pluviométrie enregistrée durant la campagne d'essai n'a pas dépassé la moyenne calculée sur 100 ans dans cette région, c'est juste 442.4 mm contre 749 mm la normale de la région, ce qui représente 40.9 % de déficit. La plus importante quantité de pluie a été reçue entre le mois de mars et le mois de mai, et c'est la période montaison-épiaison. Ce qui est exceptionnel pour cette campagne c'est que la pluviométrie n'a été pas bien répartie tout au long du cycle de la plante, avec un enregistrement d'une période de sécheresse en automne et en hiver.



(Source : Meteoblue 2020)

Figure 27 : les précipitations enregistrés de l'année 2020-2021

L'année 2019 était la deuxième année la plus chaude jamais enregistrée sur la planète, l'année 2020 a démarré sur la même tendance, la période d'hiver (décembre 2019, janvier et février 2020) a été caractérisée par des températures élevées, une faible pluie et des journées plutôt printanières selon les données saisonnières de l'Office nationale de météorologie (ONM). D'autre part, le cumul saisonnier enregistré était en dessous de la normale, la température moyenne saisonnière enregistrée était au-dessus de la normale.

3.1.4. Caractéristiques pédologiques des parcelles d'essais

L'analyse granulométrique des échantillons de sol du site expérimental a donné les résultats mentionnés dans le tableau suivant :

Tableau 5: Analyses pédologique du sol de la parcelle d'essais

Le Paramètre	Granulométrie					Matière organique	calcaire totale	pH
	limon-fin	limon	Sable fin	sable grossier	Argile			
La valeur	41.69%	22.89%	7.67%	12.46%	15.29%	1.19%	1.72%	7.78
La Méthode	la pipette de Robinson					Méthode	méthode	pH

Source : (INSID, 2020)

L'utilisation du triangle USDA des textures a révélé que le sol de l'expérimentation est à *texture argileuse*.

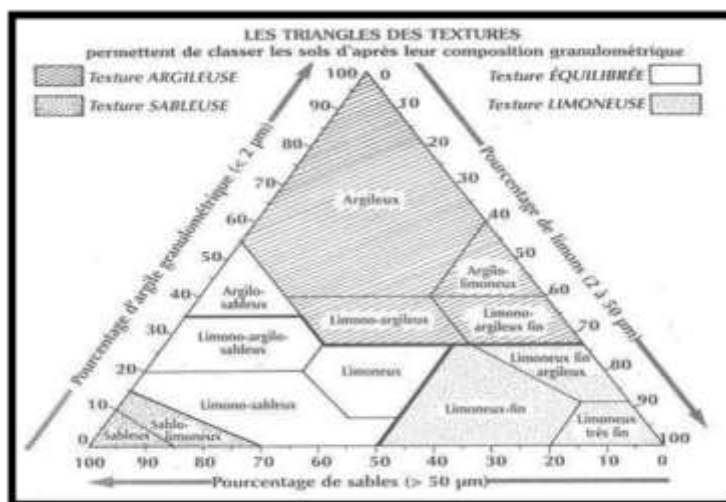


Figure 28: Triangle des textures USDA

3.2. Matériel et méthodes

3.2.1. Présentation du protocole expérimental

3.2.1.1. Le Dispositif expérimental

Tenant compte de la géométrie et de la topographie de la parcelle et prenant en considération les objectifs de notre expérimentation, le dispositif factoriel bloc a été choisi comme dispositif expérimental. Nous avons deux facteurs :

➤ **Facteur 1 : Compactage des sols**

Niveau 1 : Sol compacté (C)

Niveau 2 : Sol non compacté (NC)

➤ **Facteur 2 : Technique culturale**

Niveau 1 : Travail conventionnel (TC)

Niveau 2 : Semis direct (SD)

Ce qui nous donne traitements :

- **T1: sol compacté en semis direct**
- **T2: sol non compacté en semis direct**
- **T3: sol non compacté en conventionnel**
- **T4: sol non compacté en conventionnel**



Avec trois répétitions, ce qui nous fait trois blocs selon la direction de la pente.





Avec :


- **T1: sol compacté en semis direct (SCSD)**
- **T2: sol non compacté en semis direct (SNCS)**
- **T3: sol non compacté en conventionnel (SNCTC)**
- **T4: sol non compacté en conventionnel (SCTC)**

3.2.2. Matériels d'étude

3.2.2.1. Matériels de travail du sol

	Le matériel utilisé	Caractéristiques	Illustrations
Moyens de traction	<p>Tracteur 4*4</p> <p>DEUTZ-FAHR AGROLUX 80</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Puissance : 80 cv ✓ Nombre de cylindres 4 ✓ Cylindrée : 4085 ✓ Régime de la prise de force : 540 tr/min ✓ Poids total autorisé en charge : 3100kg ✓ Pneus avant en 4 Roues motrices 260/80 R20 ✓ Taille des pneus Arriere 14,9 R28 	
La charrue	<p>Labour :</p> <p>Charrue bisocs réversible</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Nombre de soc : 2 ➤ Type : portée ➤ Profondeur de travail : 25 à 30 cm ➤ Poids : 480 kg 	

<p>Pulvériseur <i>(Cover-crop)</i></p>	<p>La reprise de labour</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Nombre de disques 20 ➤ Type : trainé ➤ Diamètre du disque 55cm ➤ Poids : 740 kg ➤ Largeur de travail : 2,30 m 	
<p>Matériels de semis</p>	<p>semoir en ligne : AGRIC PSM 30</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Largeur de travail : 3m ➤ Nombre d'éléments distributeurs : 19 ➤ Distance entre organes : 17 cm ➤ Système de distribution : à cannelures ➤ Poids : 760 kg 	
	<p>Semoir de semis direct «Sulky BUREL »</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Largeur de travail : 3m ➤ Nombre d'éléments distributeurs : 29. ➤ Distance entre organes : 13,7 cm ➤ Système de distribution : à cannelures. 	
<p>Matériels d'entretien</p>	<p>Rouleau</p>	<ul style="list-style-type: none"> . Largeur de travail : 2m . Diamètre : 50cm . Vitesse de travail : 6Kmh 	

<p>Matériel de traitement phytosanitaire</p>	<p>Pulvérisateur à rampe céréalière à jet projeté</p>	<ul style="list-style-type: none"> . Capacité : 1000 L . Nombre de buses : 16 . Largeur de travail : 8m . Type de buses : à fentes . Type : trainé . Poids vide : 302 kg 	
---	--	--	---

3.2.2.2. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans notre étude est l'Orge variété **Fouara**. C'est une orge à 6 rangs, elle est le résultat d'une sélection de la station de l'institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Sétif, sélection faite à l'intérieur du matériel en ségrégation provenant de l'ICARDA (International Center of Agricultural Research in Dry Areas), en 1991/92. C'est une variété très productive et de bonne stabilité, elle fut inscrite au catalogue national depuis 1997 (**Benmahammed et al. 2001, Menad et al. 2011**). Une culture est considérée comme la première culture fourragère, importante par sa production en vert, en foin, en ensilage et par son grain et sa paille.

Tableau 6 : Fiche techniques de l'orge variété Fouara :

Culture	Orge
Variété	<i>Fouara</i>
L'origine	ICARDA Syrie
Rendement max	< 60 qx /ha
Hauteur de tige	60-70 cm
PMG	Elevée (36.7 g)

Teneur en protéine	Faible quantité <13%
Teneur en eau	7.4%

Source : (ITGC Oued Smar)



Figure 29: Semence de la variété Fouara

3.2.3. Conduite et suivi de l'étude expérimentale

3.2.3.1. Préparation du sol et le semis

Les essais ont été réalisés dans une parcelle de 1245 m² celle-ci a été divisé en trois blocs : chaque bloc divisé en quatre micro parcelles travaillées et non travaillées, compactées et non-compactées, ont été travaillées en fin décembre, le semis a été effectué en début janvier.

3.2.3.2. Les dimensions de notre parcelle

- Longueur totale de la parcelle : 83 m
- Largeur totale de la parcelle (longueur de micro-parcelle) : 15 m
- Surface totale de la parcelle : 1245 m².
- Largeur de micro-parcelle : 6 m
- Surface de micro-parcelle : 90 m².
- Ecartement entre micros-parcelles : 1 m.

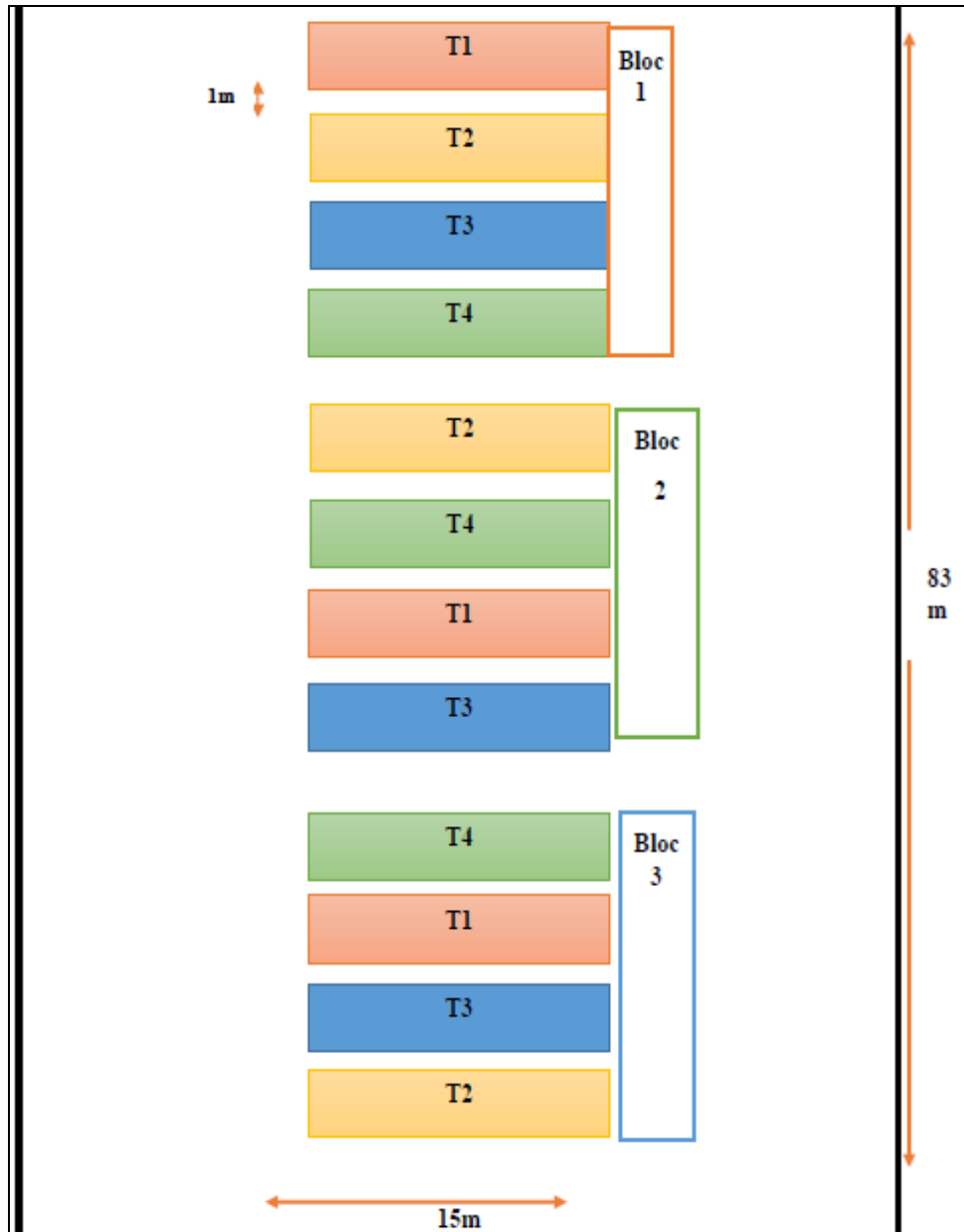


Figure 30: schéma du dispositif expérimental

3.2.3.3. Travail conventionnel

Le labour est nécessaire pour assurer une meilleure préparation du lit de semence, mais également pour améliorer l'aération du sol et augmenter par le fait l'espace d'enracinement et d'exploitation des racines.

- Le labour par une charrue bisocs réversible, a été effectué le 30 décembre 2019 dans de très bonnes conditions du sol, sur les six micros parcelles réservées pour la technique dite semis classique avec un travail du sol conventionnel.

Tableau 7: Profondeur et type de labour.

Profondeur de labour (cm)	25	23	23	20	21	23	20	23	22	22	20	23	Moyenne
observations	C'est un labour moyen, à plat												

- La reprise de labour plus les façons superficielles a été effectuée le 02 janvier 2020. Alors que le semis s'est déroulé le jour même pour les micros parcelles labourées.



Figure 31: parcelle non compactée en travail conventionnel

3.2.3.4. Compactage des zones sur la parcelle d'essai

Avant le semis, nous avons compacté le sol dans les micros parcelles concernés pour le compactage, par des passages excessifs (cinq passages) du (tracteur + semoir remplis en semence), avec une charge totale sur essieux égale à 4 tonnes.



Figure 32: parcelle après compactage

3.2.3.5. Le semis

➤ Le semis classique

Le semis a été réalisé le 02/01/2019 avec un semoir en ligne (AGRIC)



Figure 33: Semis avec le semoir en ligne

- Après le semis, un passage de rouleau a été effectuée dans les micro-parcelles non compactés, afin de tasser légèrement le sol pour améliorer le contact terre graine, favoriser les remontées d'eau par capillarité et éviter un assèchement trop rapide de la surface, et pour parfaire l'action des outils précédents en diminuant la taille des mottes en surface.

➤ **Apport d'engrais**

L'apport d'engrais de fond granulé « M.A.P 12.52 » (mono-ammonium-phosphate-granule) a été réalisé le 02/01/2019 à la volé.

Composition d'engrais : N=12 %, P=52 %, K = 0 %

- Dose totale : pour la surface totale : 29.5 Kg
- Dose par micro-parcelle : 2.5 kg

3.2.3.6. Semis Direct

➤ **Avant le semis direct : Désherbage chimique**

En adoptant le semis direct, le traitement chimique est plus que nécessaire pour lutter contre les adventices. Les traitements chimiques pour les parcelles semées en semis direct ont été effectués la fin du mois de décembre, exactement le 30 décembre 2019 avec un pulvérisateur à jet projeté, au régime de la prise de force de 540 tr/mn. Le produit utilisé dans l'essai était un herbicide total à base de glyphosate. Son nom commercial est GLYFOZEL 36 SL, la dose était de 3L/ha, selon le fabricant et les recommandations de l'INPV.



Figure 34: Herbicide total à base de glyphosate 36 SL

3.3. Techniques et méthodes de mesure

Les analyses effectuées au laboratoire et leurs méthodes sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 8: Analyses réalisés au laboratoire et leurs méthodes

Analyse		Méthode
Analyse Physique du sol	Granulométrie	Méthode de la pipette de
	Humidité du sol	Humidité pondérale à l'aide d'une tarière et étuve
	Résistance à	Pénétrromètre statique
	Densité apparente	Par carottage
	Densité réelle	Pycnomètre
	Porosité	Calcul
	Conductivité	Conductiviomètre
	PH	PH mètre
Analyse Chimique du sol	Azote total	Méthode de KJEDHEL

Source : (INSID, ITGC et INRA 2020)

3.3.1. Détermination de l'humidité du sol

Pour la détermination de l'humidité du sol, nous avons utilisé la méthode de l'humidité pondérale. Les prélèvements d'échantillons ont été effectués à l'aide d'une tarière sur chaque parcelle élémentaire de chaque itinéraire technique. Les échantillons sont prélevés dans quatre points de chaque parcelle, chacun des prélèvements a été réalisé à partir de quatre horizons : de 0 à 5 cm, de 5 à 15cm, de 15 à 25 cm et de 25 à 30 cm. La méthode de mesure directe de la teneur en eau d'un échantillon de sol s'effectue simplement par pesée avant et après étuvage pendant 24h à 105 C°, ces deux valeurs correspondant respectivement à la masse totale de l'échantillon P_i et la masse de fraction solide P_s .

La teneur en eau du sol est calculée alors par la formule suivante :

$$H\% = \left[\frac{P_i - P_s}{P_s} \right]$$

Avec :

H% : Taux d'humidité

P_i = Poids initial

P_s = Poids sec après étuve à 105 C° pendant 24h.



Figure 35: Prélèvement des échantillons du sol pour déterminer l'humidité du sol

3.3.2. Détermination de la résistance pénétrométrique

Le pénétromètre statique à main est un instrument de mesure indicatif de résistance maximale à la pénétration. L'appareil a une moyenne d'écart de + et - 8%. Pour une utilisation précise et à long terme, une plage de 200 à 700 N est conseillée (zone verte sur le manomètre). Au-delà de 700N, la zone est considéré autant une zone compactée. La résistance est lue en N (Newton) et noté pour la profondeur appropriée. La base de la zone du cône doit également être notée car la résistance du cône est exprimé en daN /cm², ou en Mpa.

Pour sa détermination, on a utilisé un pénétromètre statique. La méthode consiste à appliquer une force afin d'avoir un enfoncement de la tige du pénétromètre dans le sol, ce qui nous permet de mesurer la profondeur, à l'aide d'une graduation de la tige qui porte le cône et lire la valeur de la force indiquée par un curseur sur le pénétromètre.



Figure 36: Pénétromètre statique

3.3.3. Détermination de la porosité

3.3.3.1. Détermination de la masse volumique sèche

La méthode la plus couramment utilisée et qu'on a utilisé est la Méthode du carottage : le cylindre de volume connu, dont l'extrémité a été aiguisée, est enfoncé de façon mécanique dans le sol, puis dégagé en creusant autour.

Après séchage à l'étuve (à 105°C pendant 24h) ce volume est pesé, ce qui permet de calculer la masse volumique apparente qui est en fait un simple rapport

$$\rho_{as} = \frac{P}{V}$$

Avec :

- ρ_{as} : masse volumique apparente ;
- P : poids de l'échantillon sec.
- V : volume de l'échantillon de terre.

3.3.3.2. Détermination de la densité réelle

Pour la détermination de la densité réelle, on a utilisé une méthode simple qui consiste à prendre un échantillon du sol sécher à l'étuve (105°C ,24h), et à l'aide d'une éprouvette graduée, on a mis 100g du sol sec, broyer et tamiser et on a ajouté un volume d'eau ($V_0 = 800$ ml), on laisse l'échantillon jusqu'à la disparition totale des bulles d'air. Un volume d'eau sera déplacé, celui-ci correspond au volume occupé par le sol. Cinq répétitions ont été effectuées

Afin d'obtenir un résultat bien précis. La densité réelle est présentée par la formule.

$$d_r = \frac{P_s}{V}$$

Avec :

- d_r : Densité réelle (g/cm³).
- P_s : poids sec (g).
- V_s : volume de l'eau déplacé (cm³)

La porosité se calcule à partir des résultats obtenus par la densité apparente comme suit :

$$n = \frac{d_a}{d_r}$$

Avec :

- $n\%$: porosité totale.
- d_a : densité apparente (g/cm³).
- d_r : densité réelle (g/cm³).

3.4. Méthodologie des mesures liées à la culture

La méthodologie d'analyse des effets des deux techniques sur le développement de la culture a porté respectivement sur :

- Le taux de levée
- Le taux de tallage

- La hauteur de la plante.
- Le développement des racines
- La densité des racines.
- Le rendement.

3.4.1. Détermination de taux de levée et taux de tallage

Pour la détermination du taux de levée et taux de tallage, nous avons utilisé un cadre en bois de ¼ mètre carré, on a compté le nombre de plantes afin d'arriver au nombre des graines germées à l'hectare.



Figure 37: détermination de taux de tallage de l'orge sur terrain

3.4.2. Détermination des hauteurs et les diamètres des tiges

Pour la mesure de la hauteur des plantes, nous avons utilisé un mètre, et on a suivi l'évolution de la partie aérienne de la plante afin d'arriver à la hauteur qui correspond à la coupe.



Figure 38 : Détermination des hauteurs et les diamètres des tiges

3.4.3. Détermination de la densité racinaire

Pour la mesure de l'élongation des racines de l'orge, nous avons utilisé la méthode du carottage. En effet, un cube métallique dont les extrémités sont aiguisées est utilisé pour enlever les plants avec leurs racines. Ce prélèvement (terre + racines) est déposé dans un tamis de maille fine et à l'aide d'un jet d'eau nous éliminons la terre. Les échantillons séjournent ensuite 24 heures dans de l'eau et seront relavés de nouveau jusqu'à élimination totale de la terre. Ils seront séchés par la suite et pesés.



Figure 39: Enlèvement des racines

3.4.3. Détermination du rendement estimé

Pour estimer le rendement en grains sur les différentes parcelles, nous avons pris deux caractéristiques mesurables à savoir le nombre de grains par mètre carré et le poids de mille grains. La relation qui permet de calculer le rendement s'écrit :

$$\text{Rendement estimé} \left(\frac{\text{Qx}}{\text{ha}} \right) = \text{nombre de grains par m}^2 * \frac{\text{PMG}}{10000}$$



Figure 40: Détermination du rendement

3.5. Résultats et discussion

3.5.1. Effet combiné des techniques de préparation du sol et le compactage sur le comportement physico-mécanique du sol

3.5.1.1. Effet sur l'humidité

Le premier paramètre lié au sol étudié est l'humidité, ce dernier, à une importance capitale pour la germination, la levée et le développement des plantes de blé. L'humidité du sol est conditionnée par les précipitations cumulées durant la campagne d'essai.

Les taux d'humidité mesurés sur la parcelle tout au long de la campagne, sont issus des précipitations enregistrées lors du suivi, et traduisent la capacité de rétention d'eau de la couche arable du sol soit l'efficacité de la structure mise en place en matière de rétention d'eau.

Stade 1 : (prélèvements après une précipitation)

Les résultats de la variation de la teneur en eau du sol sont mentionnés sur les figures suivantes :

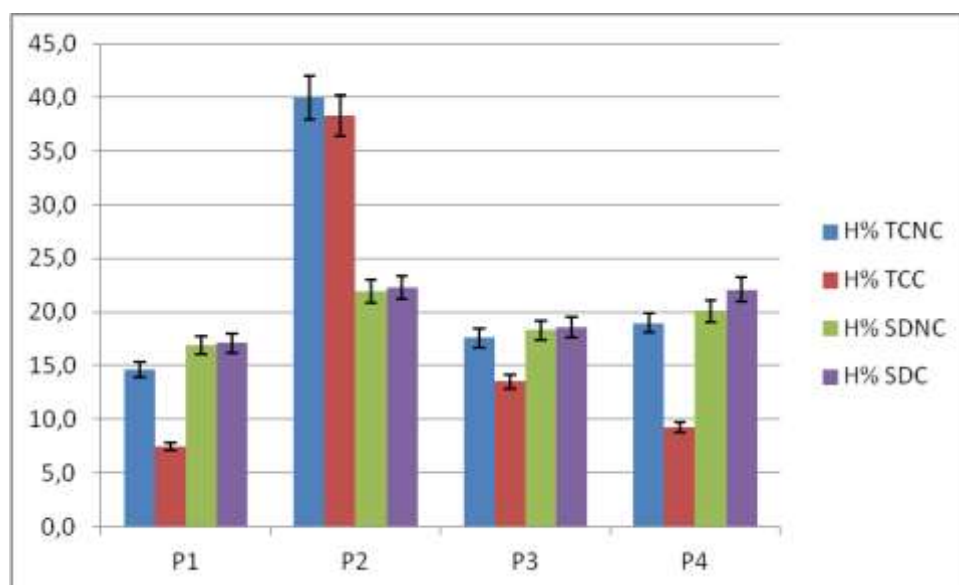


Figure 41: variation de l'humidité du sol en relation avec la profondeur et le compactage au stade de levée

D'après cette figure, on peut constater qu'au niveau du premier stade, dans tous les horizons, nous avons enregistré une différence de la teneur en eau entre les zones non compactés et les zones compactés pour la technique de travail conventionnel. La teneur en eau diminue dans les zones compactées en travail conventionnel, cette diminution est remarquée pour tous les horizons, elle est plus importante dans l'horizon 1 et 4, avec une différence de 8 % et 7 % respectivement.

On peut constater aussi qu'au niveau du deuxième horizon, nous avons enregistré les valeurs en teneur d'eau les plus importantes pour le travail conventionnel, dans les zones compactés et non compactés.

Stade 2

Les résultats de la variation de la teneur en eau du sol sont mentionnés sur la figure suivante :

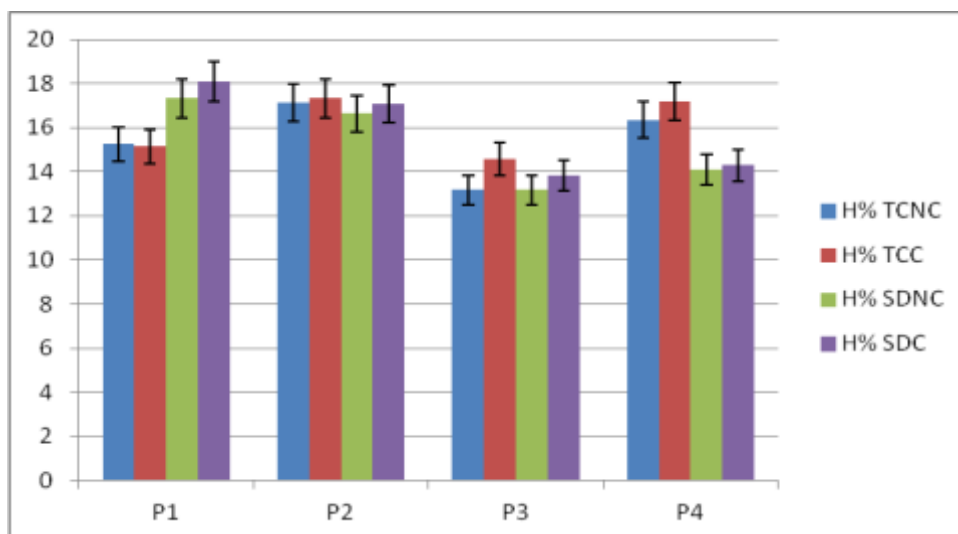


Figure 42: variation de l'humidité du sol en relation avec la profondeur et le compactage au stade de tallage

Dans ce stade, nous avons enregistré une période de sécheresse, nous avons constaté suivant les résultats obtenus, qu'il y a pas une grande différence de la teneur en eau entre les zones compactées et non compactées pour les deux techniques culturales, et dans tous les horizons.

Stade 3 : (prélèvement après 15 jours d'une précipitation au mois d'avril)

Les résultats de la variation de la teneur en eau du sol sont mentionnés sur la figure suivante :

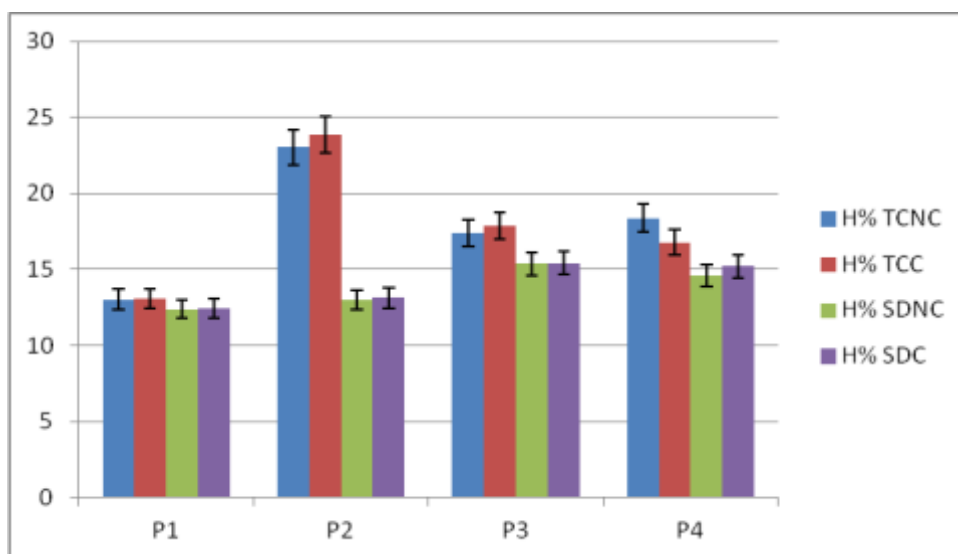


Figure 43: variation de l'humidité du sol en relation avec la profondeur et le compactage au de stade de l'épiaison

Dans ce stade, nous avons réalisé des prélèvements après 15 jours d'une précipitation au mois d'avril. Nous avons remarqué selon les résultats obtenus que les sols compactés se dessèchent rapidement, ceci peut être expliqué hautes températures enregistrées durant cette période. Nous avons remarqué qu'au niveau du deuxième horizon des parcelles de travail conventionnel, la teneur en eau enregistrée est la plus importante. On peut justifier ce résultat par la présence d'une couche compacte en surface, qui se dessèche rapidement, elle devient une couche isolante et empêche l'évaporation des eaux emmagasiné dans le deuxième horizon.

De façon générale, le compactage dans les sols travaillés conventionnellement a un effet sur la teneur en eau dans le sol. Les résultats montrent que le labour permet une augmentation de la teneur en eau au niveau du premier horizon, mais dans les zones compactées, ce n'est pas le cas, les sols sont compactes et se dessèchent rapidement. Nous constatons aussi que l'humidité du sol diminue légèrement dans le deuxième horizon des zones compactées, grâce à la couche compacte en surface qui empêche l'évaporation.

Nous concluons aussi que le travail conventionnel est plus sensible au compactage que le semis direct, car le sol devient plus léger et humide après le retournement en travail conventionnel, ce qui facilite le tassement après les passages des engins agricoles, contrairement au semis direct, où le sol garde toujours sa structure et se résiste contre les passages des engins.

3.5.1.2. Effet sur la porosité

Le deuxième paramètre analysé est la porosité, ce dernier conditionne pour une grande partie la rétention d'eau par le sol, l'aération des racines, et leur progression dans le sol. L'analyse de l'effet combiné des techniques culturales et compactage des sols sur la densité apparente et sur la porosité est représentée dans les figures suivantes :

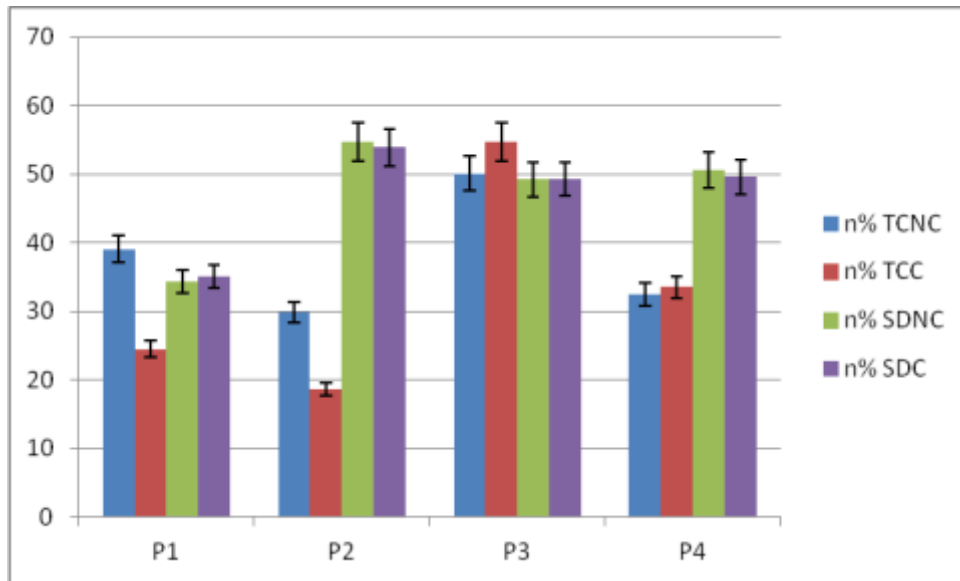


Figure 44: variation de porosité du sol en relation avec la profondeur et le compactage au stade levée

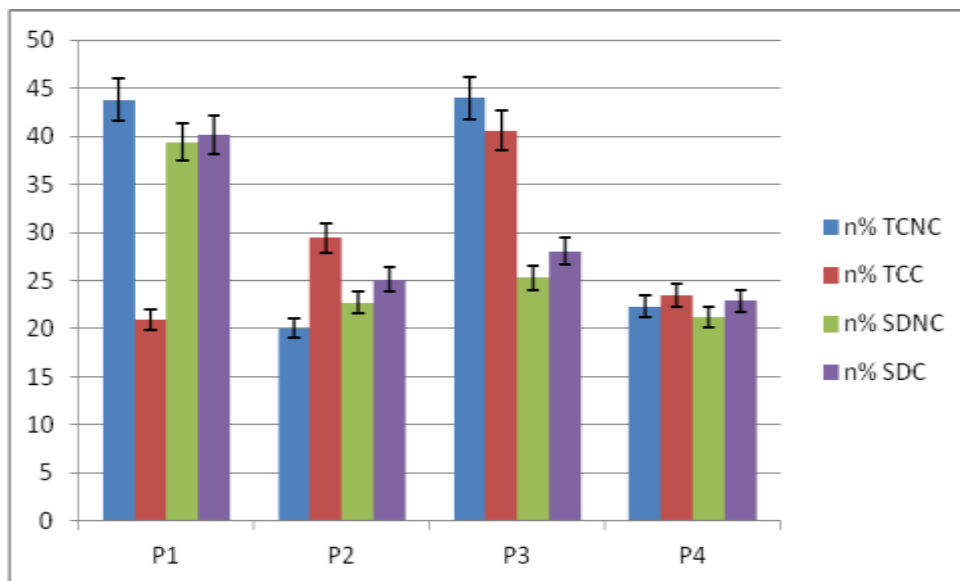


Figure 45: variation de porosité du sol en relation avec la profondeur et le compactage au stade tallage

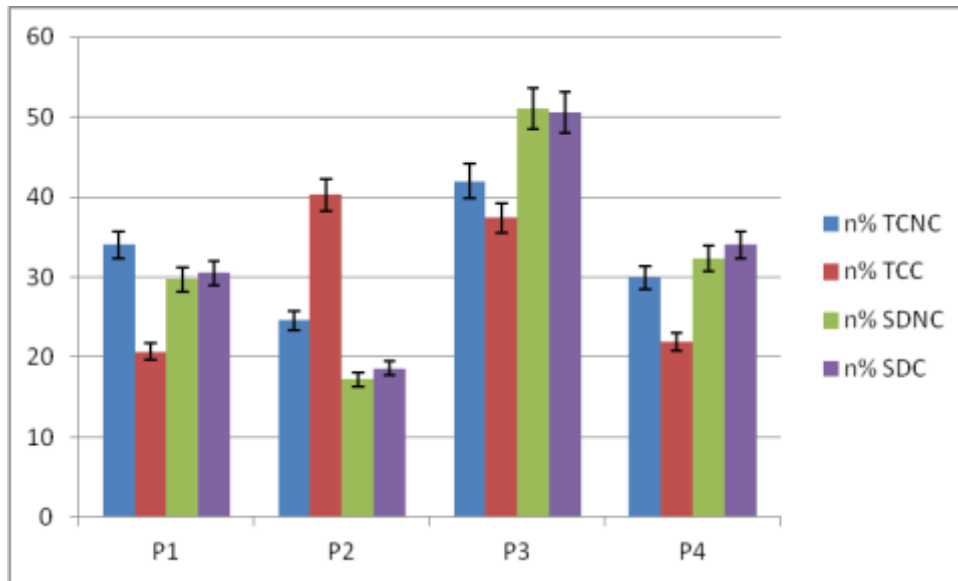


Figure 46: variation de porosité du sol en relation avec la profondeur et le compactage au stade épiaison

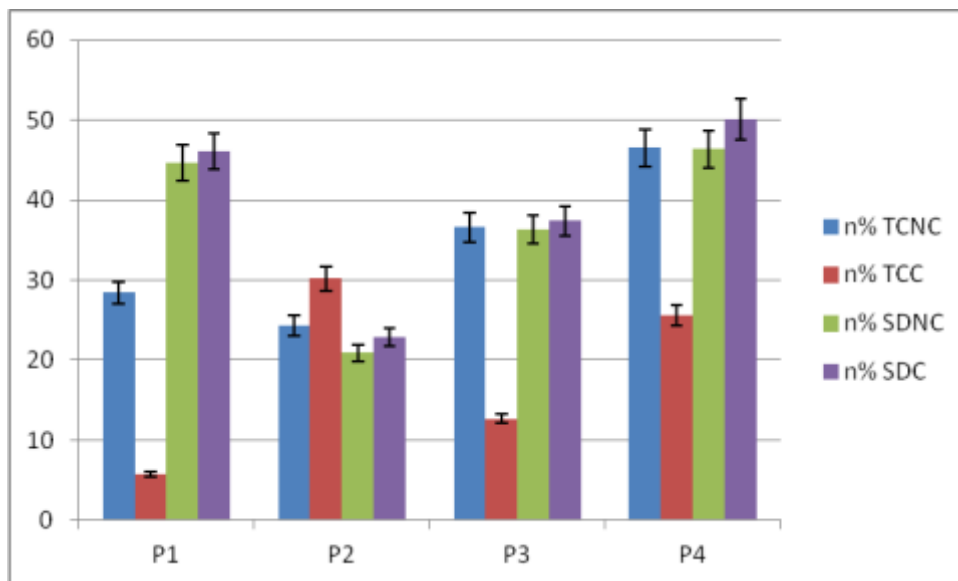


Figure 47: variation de porosité du sol en relation avec la profondeur et le compactage au stade maturation.

La porosité est une caractéristique physique qui reflète l'état structural du sol ; un sol dont les agrégats sont repartis de façon à ce qu'il résiste aux agressions liées au cycle humectation/dessiccation ou encore gels/dégels, est un sol dit à structure stable, et par conséquent maintient son espace poreux à un niveau fixe. Par ailleurs une structure particulière

se révèle à l'opposé d'une structure fragmentaire, hautement instable et demeure sensible aux dégradations multiples telles que la battance ou encore le compactage occasionné par le passage répété d'engins lourds. C'est la stabilité de la structure qui affecte indéniablement l'état du sol, les pores y compris.

Dans notre cas, et après le labour, nous avons enregistré un accroissement accru de la porosité, l'écart par rapport à la valeur initiale est de 10 %. Après le compactage par plusieurs passages du tracteur dans des zones labourées, la porosité a diminué encore une fois, avec un écart de 15% dans le premier horizon (couche superficielle) et de 10 % en deuxième horizon. Cela peut être justifié par le type de porosité existant dans le sol labouré, ce type est la porosité d'assemblage liée au retournement du sol (labour, passage d'un ...), ce type de porosité est très sensible aux charges exercées par les machines agricoles et les passages des engins sur le terrain.

Par ailleurs dans les parcelles labourées, pour les horizons entre 20 et 30 cm, nous avons enregistré des valeurs moins importantes de la porosité entre les zones compactées et non compactées.

Cependant, en semis direct, on remarque une légère diminution de la porosité entre les zones compactées (compactage par plusieurs passages du tracteur) et non compactées pour le semis direct dans tous les horizons. Cela peut être justifié par le type de porosité existante dans le sol. En semis direct, il y a pas de travail du sol, la porosité est tubulaire, elle est liée à la biologie du sol (vers de terre, passages des racines...), ce type de porosité est moins sensible aux charges exercées par les machines agricoles et les passages des engins sur le terrain.

Globalement, on peut conclure que, pour le travail conventionnel, le degré de porosité augmente fortement après le labour, et diminué fortement après un compactage, surtout dans les couches superficielles. La porosité augmente légèrement aussi en différents stades dans les horizons en profondeur avec l'évolution des racines.

Par ailleurs, en semis direct, nous avons enregistré des valeurs presque identiques dans les zones compactées et non compactées, la valeur de la porosité augmente légèrement avec le développement du système racinaire.

On peut conclure que le passage des engins agricoles en travail conventionnel, contribue à la création du tassement des sols dans les couches superficielles, et n'a pas un grand effet sur les zones de semis direct.

3.5.1.3. Effet sur la résistance pénétrométrique du sol

La mesure de la résistance pénétrométrique au moyen d'un pénétromètre est l'un des indicateurs fréquemment utilisés pour donner un aperçu sur l'état de compaction du sol et la contrainte qu'oppose le sol à la progression des racines.

Les observations sur l'évolution de la résistance pénétrométrique du sol en relation avec le nombre de passage des engins agricoles et la profondeur sont présentés dans les figures suivantes :

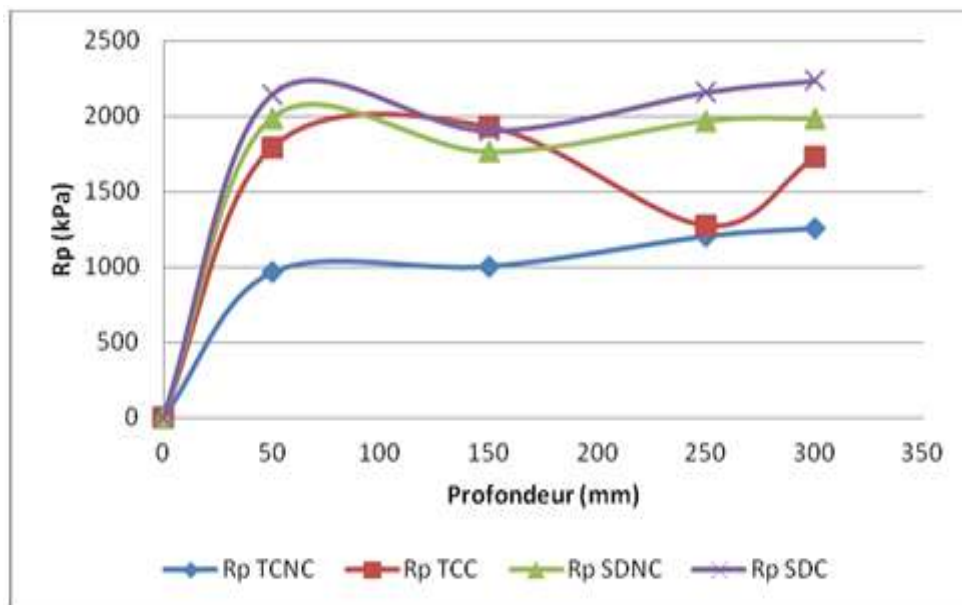


Figure 48: variation de la pénétrométrie du sol en relation avec la profondeur et le compactage au stade levée

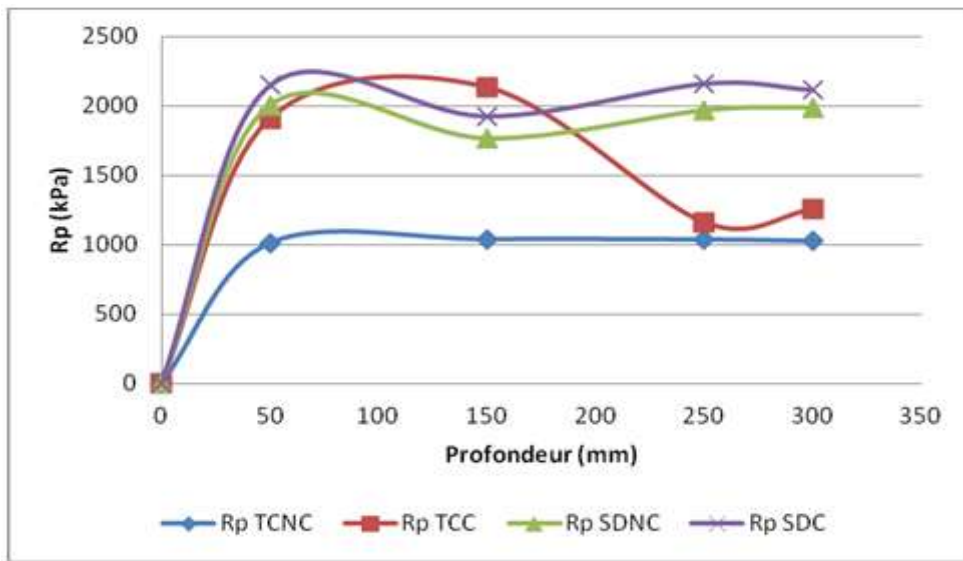


Figure 49: variation de la pénétration du sol en relation avec la profondeur et le compactage au stade tallage

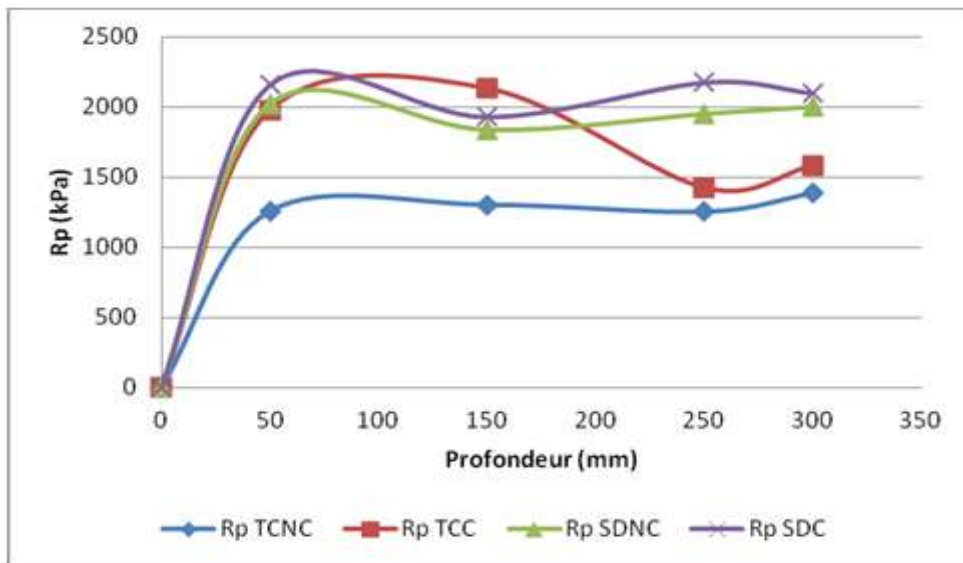


Figure 50: variation de la pénétration du sol en relation avec la profondeur et le compactage au stade épiaison

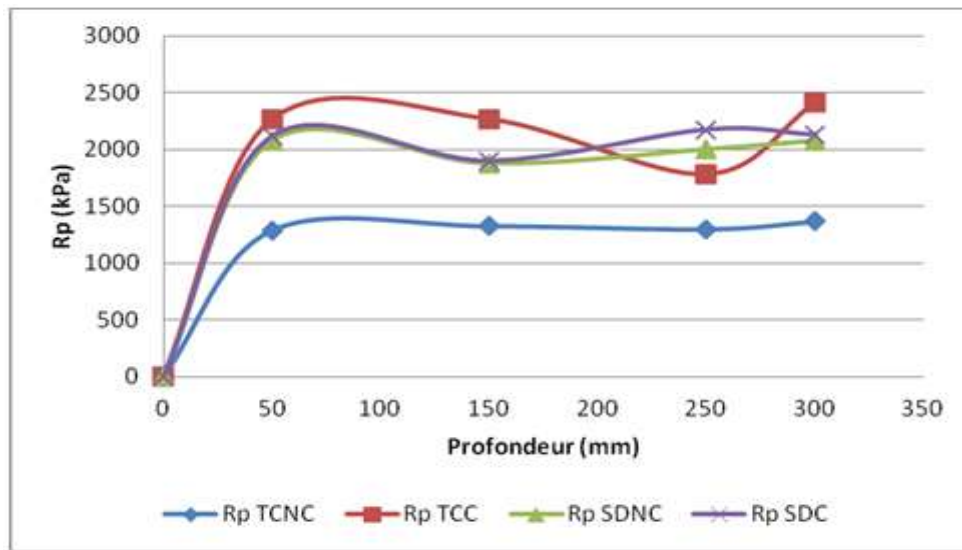


Figure 51: variation de la pénétrométrie du sol en relation avec la profondeur et le compactage au stade maturation

Les résultats obtenus sur terrain, montrent que la résistance pénétrométrique du sol est modifiée par l'augmentation du nombre de passage des engins agricoles utilisés et la technique culturale utilisée. Nous constatons qu'après chaque opération ou passage :

➤ *Zones non compactées en travail conventionnel*

La résistance pénétrométrique diminue fortement après le labour, et elle remonte légèrement après chaque passage du tracteur pendant le travail du sol (environ 1000 kpa), et encore après le passage du pulvérisateur, et aussi après le passage de la moissonneuse batteuse et la ramasseuse presse (environ 1400 kpa). La résistance pénétrométrique augmente légèrement après chaque passage du tracteur et les machines agricoles, surtout dans les horizons superficiels (entres 0-10 cm). Pour les horizons de profondeur, compris entre 20-30 cm, les valeurs de la résistance pénétrométrique sont plus importantes mais avec une faible évolution après les passages des engins.

➤ *Zones compactés en travail conventionnel*

La valeur de la résistance pénétrométrique est plus importante après le compactage, elle atteint des grandes valeurs dans le premier horizon après chaque passage d'un tracteur ou une

machine agricoles. La valeur initiale avant le compactage ne dépasse pas 1000 kpa, puis elle augmente progressivement après le compactage (1700 kpa), après le passage de la moissonneuse batteuse à la récolte, et le passage de la ramasseuse presse, elle atteint une valeur maximale d'environ 2500 kpa.

Pour les horizons en profondeur, compris entre 20-30 cm, les valeurs de la résistance pénétrométrique dans les zones compactées sont plus importantes que celles des zones non compactées, mais avec une faible évolution après les passages des engins agricoles sur le terrain par rapport aux zones superficielles.

En outre, en semis direct, nous avons enregistré des valeurs de la résistance pénétrométrique presque identiques dans les zones compactées et non compactées, avec une légère augmentation en résistance après chaque passage des engins dans le premier horizon seulement. Pour les horizons en profondeur, compris entre 20-30 cm, les valeurs de la résistance pénétrométrique sont plus importantes avec une très faible évolution après les passages des engins.

En conclusion, le compactage a affecté principalement la porosité d'assemblage issue principalement du travail du sol. Contrairement, au semis direct, où le sol résiste mieux au tassement grâce à la porosité naturelle verticale (porosité tubulaire). Ces résultats ont été confirmés par (Vincent Tomis 2021) dans une communication orale, dans un projet de recherche et de développement agricole de Agrotransfer Hauts de France.

Analyse statistique

3.6.1. L'analyse statistique de l'évolution de l'humidité, la porosité et la résistance pénétrométrique en fonction de la technique culturale et le tassement du sol

L'analyse statistique de l'évolution de l'humidité, la porosité et la résistance pénétrométrique en fonction de la technique culturale et le tassement du sol a donné les résultats suivants :

Tableau 9: résultats des analyses statistiques :

	H (%)		n (%) (cm).		Rp (kPa)	
	p-value	Groupes	p-value	Groupes	p-value	Groupes
TCNC	NS	A	NS	A	0,008	B
TCC		A		A		A
SDNC		A		A		HS
SDC		A		A		A

NS: Non significatif / HS : Hautement significatif

3.6.2. La relation entre Rp, H% et n%

L'analyse de la régression multiple entre la variable dépendante Rp et les variables indépendantes H%, n% a donné les résultats suivants :

Tableau 10: Analyse de la variance de Rp, H% et n%

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	41810,271	20905,136	0,954	0,0410
Erreur	13	284789,338	21906,872		
Total corrigé	15	326599,609			

Calculé contre le modèle $Y = \text{Moyenne}(Y)$

En premier lieu, le tableau d'analyse de la variance, qui est un résultat qui doit être analysé attentivement. C'est à ce niveau que l'on teste si l'on peut considérer que les variables explicatives sélectionnées (n) et (H%) apportent une quantité d'information significative au modèle ou non. En d'autres termes, c'est un moyen de tester si la moyenne de la variable à modéliser Rp suffirait à décrire les résultats obtenus ou non. Le test du F de Fisher est utilisé. Étant donné que la probabilité associée au F est dans ce cas inférieure à 0.04, cela signifie que l'on prend un risque de se tromper de moins de 4 % en concluant que les variables explicatives apportent une quantité d'information significative au modèle.

En deuxième lieu, il faut vérifier qu'il n'y a pas de corrélation significative entre les variables indépendantes, et c'est ce qui a été vérifié à partir de la matrice de corrélation.

En troisième lieu, on fournit les détails sur le modèle, nous avons obtenu une p-value associé au test de Student pour les trois paramètres :

Source	Pr > t
n% TC	0,019
H% TC	0,0037

Étant donné que p-value est inférieure à 0,05, on peut dire que les deux paramètres (surtout l'humidité) ont un fort impact sur Rp. L'équation du modèle est la suivante :

$$R_p \text{ TCNC} = 1231,08737753945 - 4,61714646019652 * H\% \text{ TCNC} + 1,36153490040785 * n\% \text{ TCNC}$$

$$R_p \text{ TCNC} = 123 - 4,62xH\% + 1,36 n\% \quad R^2=0,51$$

Le coefficient de détermination $R^2 = 0,51$ les variables humidité et porosité permettent d'expliquer 51 % de la variabilité du Rp.

Donc cette équation illustre la relation entre R_p , n et H . Remarquons **que plus la teneur en eau est élevée, plus la R_p diminue**, on constate aussi que **l' $H\%$ a plus d'effet que la $n\%$ sur R_p** .

Les coefficients normalisés permettent de comparer le poids relatif des variables. Plus la valeur absolue d'un coefficient est élevée, plus le poids de la variable correspondante est important. Lorsque l'intervalle de confiance autour des coefficients normalisés comprend la valeur 0 (cela est facilement visible sur le graphique des coefficients normalisés), le poids d'une variable dans le modèle n'est pas significatif.

Dans notre cas, le coefficient normalisé de la variable $H\%$ est plus élevé que celui de $n\%$, la figure suivante illustre ce résultat :

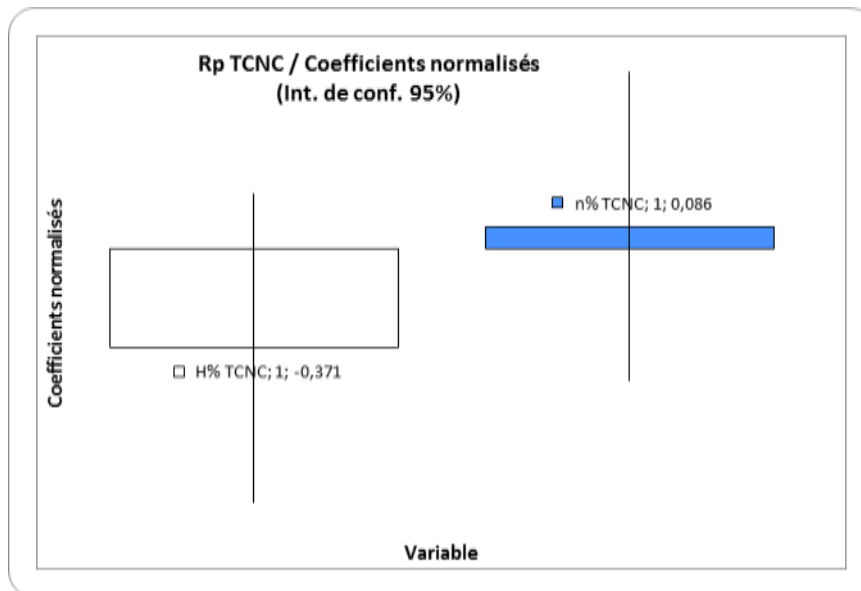


Figure 52: le coefficient normalisé de la variable $H\%$

Outre cela, on peut observer une augmentation importante de la R_p en fonction de la porosité (d'autant plus si le sol est sec). Des chercheurs tel qu'Isabelle Breune en 1997 explique ce résultat, elle affirme que pour un potentiel matriciel de 33 kPa, qui correspond approximativement à la capacité au champ en sol sableux, la relation entre la porosité et R_p est quasiment linéaire.

De plus la porosité est une mesure volumique tandis que R_p est une mesure plus ponctuelle ; les renseignements apportés par l'un ou l'autre des paramètres sont quelque fois forts

différents. Parfois, il est possible d'observer une augmentation de la R_p avec la profondeur sans remarquer de différence notable au niveau de la masse volumique apparente. Ce phénomène s'explique généralement par l'augmentation de la friction le long de la tige avec la profondeur (Soane, 1973). Ainsi, en utilisant uniquement les valeurs de R_p , on peut parfois conclure faussement à la présence d'une zone compacte, il est donc généralement recommandé de mesurer conjointement la R_p avec d'autres paramètres notamment H (%) et n (%).

Pour ce qui est des TCC, SDNC et SDC nous avons tenté d'établir des régressions dans ce sens, mais ils n'étaient pas significatifs.

3.8. Effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur le développement de la plante

3.8.1. Effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur le taux de levée et le nombre d'épis /²

Les résultats de l'effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur le Tallage/m², et épi/m² sont présentés dans les figures suivantes :

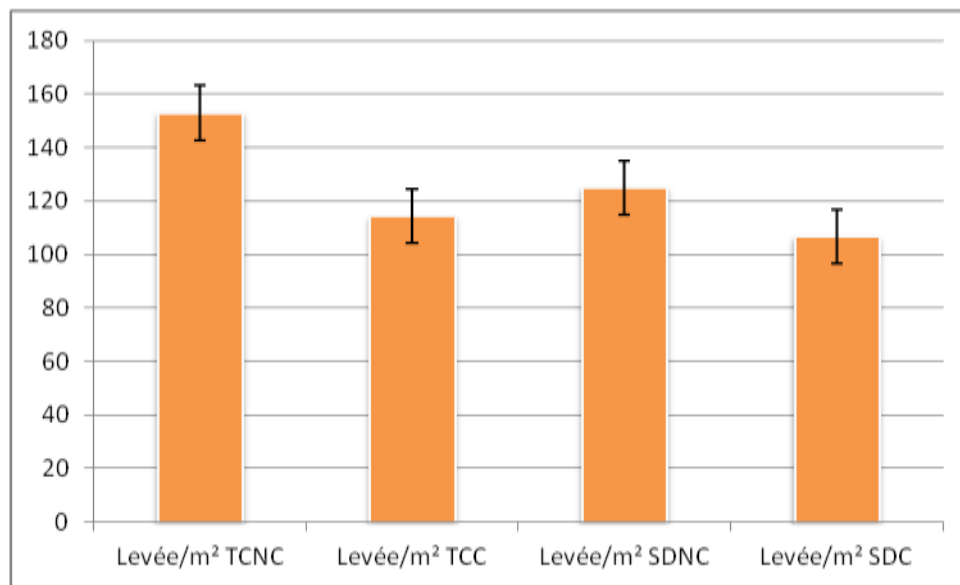


Figure 53: Effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur le taux de levée

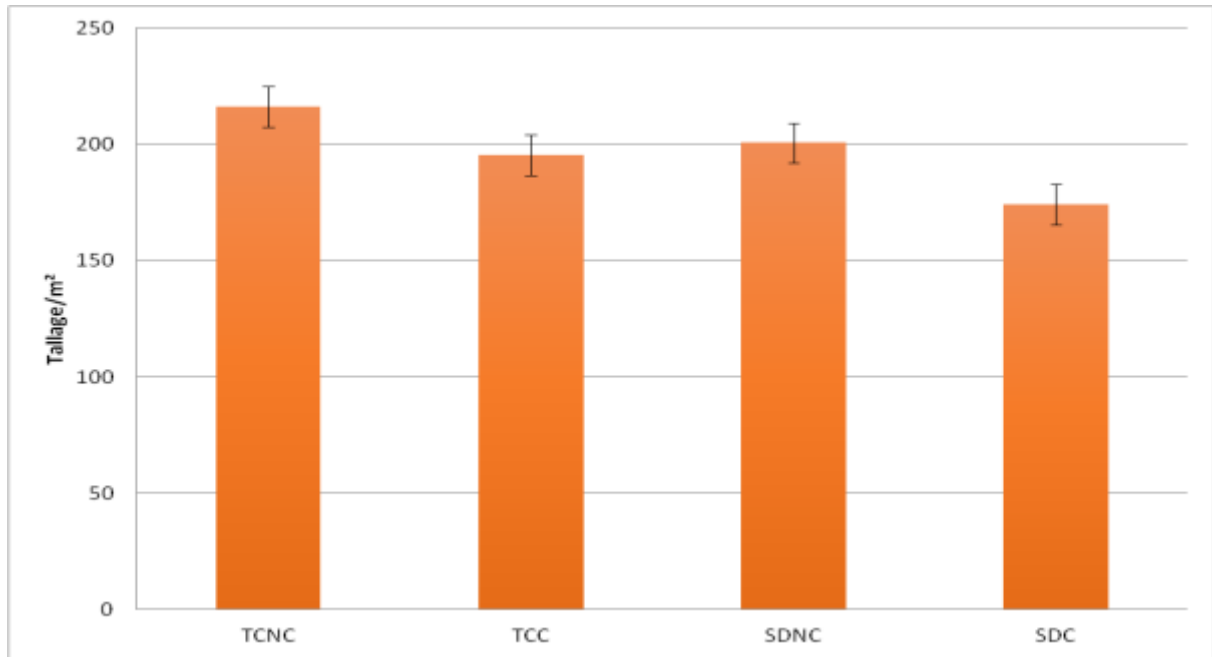


Figure 54: Effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur le tallage/m²

Les résultats montrent clairement que la technique culturale et le compactage ont un effet sur le taux de levée et le nombre d'épis par mètre carré. Les sols travaillés conventionnellement non compactés, permettant un bon tallage par rapport aux sols travaillés et compactés, où on enregistre une différence de 30 plantes / m² entre les deux cas. Le nombre d'épis dans les sols non compactés et compactés en travail conventionnel avoisinant les 220 plantes/m² et 190 plantes/m² respectivement. Pour le semis direct, le constat est le même, puisque le taux de tallage et le nombre de plantes/m² est nettement supérieur dans les sols non compactés, où nous avons enregistré 200 plantes/m², et 165 plantes/m² dans les zones compactés.

3.8.2. Effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur la longueur et le diamètre des tiges

Effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur la longueur représenté dans la figure suivante :

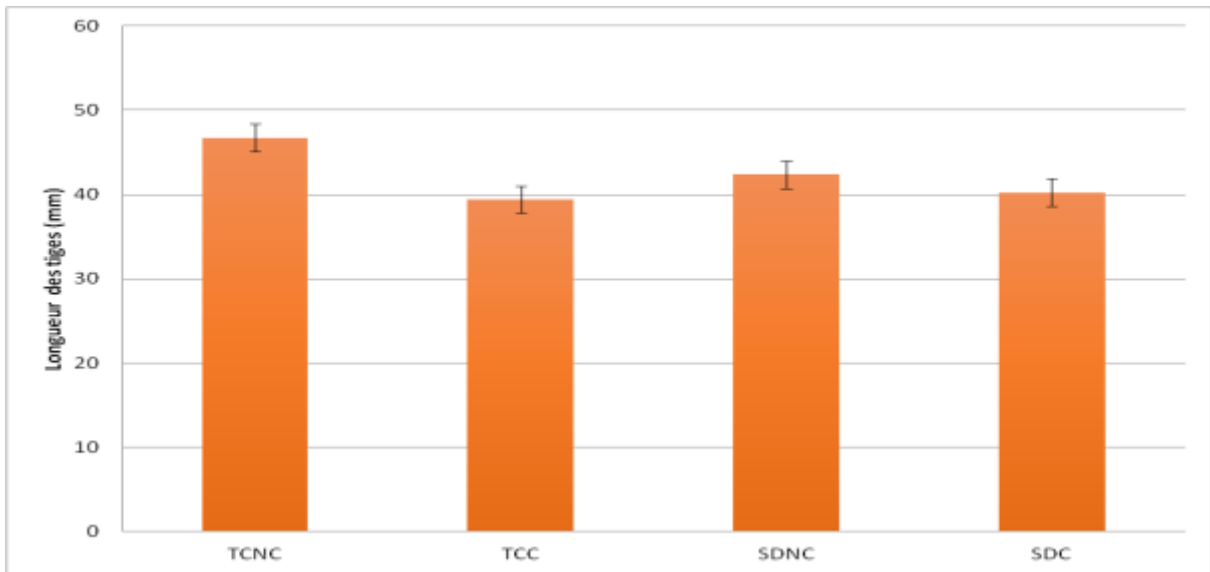


Figure 55: Effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur la longueur des tiges

Effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur le diamètre des épis représenté dans la figure suivante :

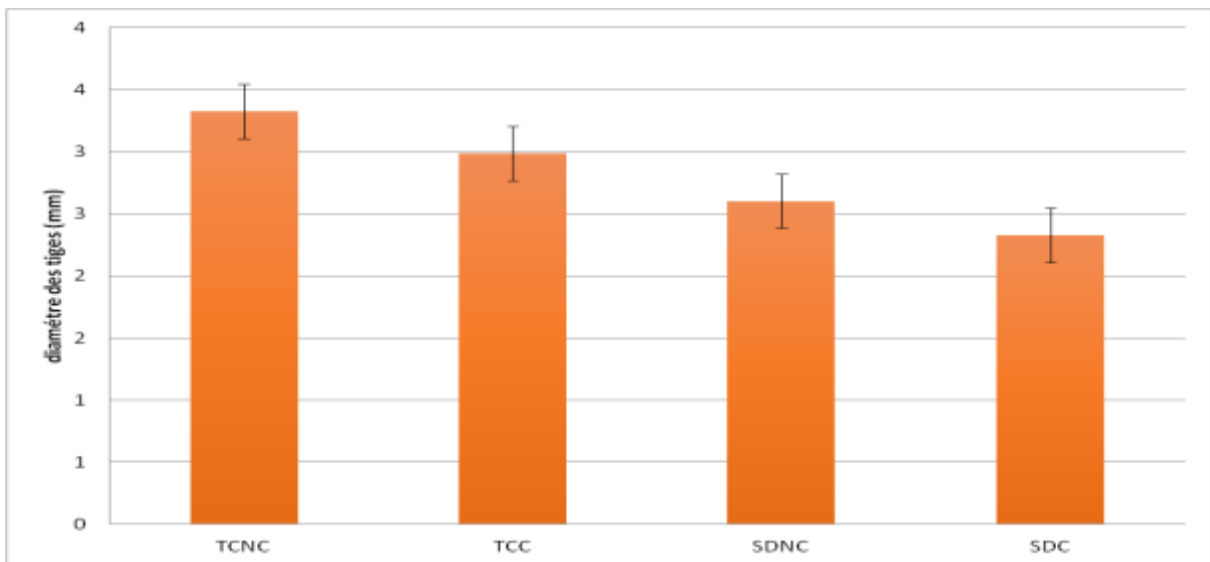


Figure 56: Effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur le diamètre des épis

Les résultats obtenus sur terrain montrent qu'il y a un effet sur la longueur et le diamètre des tiges. Ces derniers sont nettement supérieures dans les sols travaillés conventionnellement non compactés, où on enregistre des valeurs dans les sols non compactés et compactés en travail conventionnel avoisinant 47 cm, 39 cm et 3.3 mm, 2.95 mm respectivement. Pour le semis direct, le constat est le même, puisque la longueur des tiges est nettement supérieure dans les sols non compactés que les sols compactés, où nous avons enregistré respectivement 42.5 cm, 40 cm et 2.6 mm 2.2 mm.

3.8.3. Effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur le nombre des grains par épis et le poids de 1000 grains

Effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur le nombre des grains par épi est représenté dans la figure suivante :

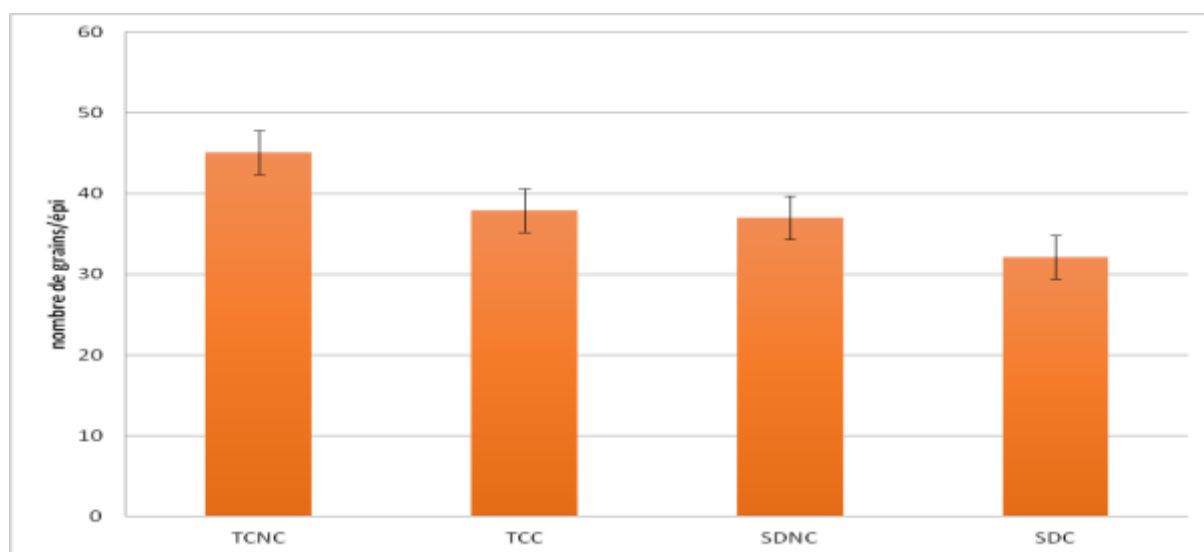


Figure 57: Effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur le nombre des grains par épi

Effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur le poids de 1000 grains par épi est représenté dans la figure suivante :

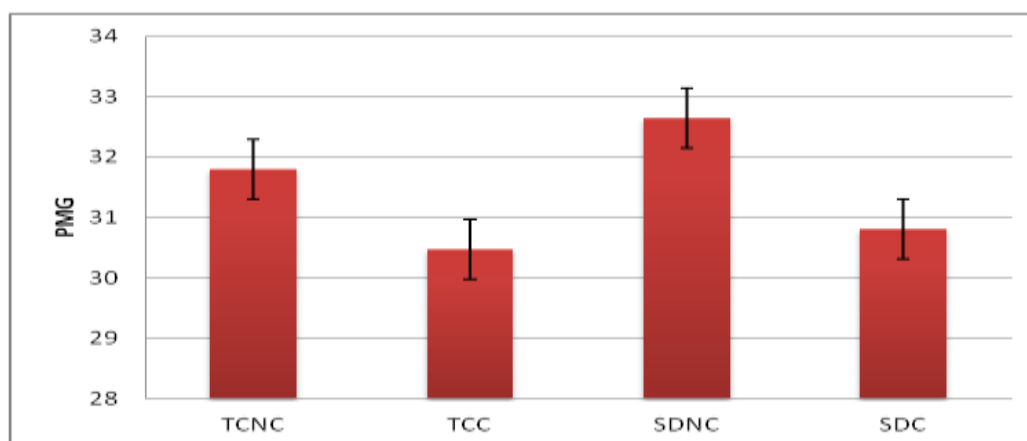


Figure 58: Effet combiné des techniques de préparation du sol avec le compactage du sol sur le poids de 1000 grains.

Ce que nous pouvons constater en premier lieu dans les deux figures ci-dessus, c'est l'effet de la technique culturale et le compactage sur le nombre des grains par épis et sur le poids de mille grains. Pour la première figure, il apparaît que le nombre de grains par épi est légèrement meilleure pour les parcelles travaillées et non compactés, la valeur moyenne enregistrée pour le TCNC et TCC est de 45 grains/épi et 37 grains/épi respectivement, alors que celle obtenue pour le semis direct est 36 grains/épi et 32 grains/épi dans les parcelles non compactées et compactées respectivement.

Pour la deuxième figure, il apparaît que le poids de 1000 grains est hautement meilleur pour les parcelles travaillées et non compactées, la valeur moyenne enregistrée pour le TCNC et TCC est de 32.6 g et 30.8 g respectivement, alors que celle obtenue pour le semis direct est 33.1 g et 31.5 g dans les parcelles non compactées et compactées respectivement.

En conclusion, on peut dire que la technique de travail du sol et le tassement des sols agricoles ont un effet direct sur le développement de l'orge et sa croissance racinaire.

Dans les parcelles labourées non compactées (TCNC), la structure du sol est principalement créée par les opérations de travail du sol tandis que dans les systèmes non travaillés (semis direct) la structure est principalement créée par l'action du climat (en surface dans les régions Tempérées) et par des processus biologiques.

Cependant, le tassement crée artificiellement dans les parcelles labourées et les parcelles de semis direct, se manifeste par des couches superficielles du sol se desséchants rapidement, et

présentant une plus forte résistance à la pénétration, qui empêche une bonne levée et un bon tallage, et empêche aussi le bon développement de la plante en surface, aussi, il empêche le bon développement des racines par rapport aux sols labourés et non compactés. Ceci peut donner lieu à un ensemble de conditions de croissance défavorables durant la période de développement des cultures au niveau des sols compactés. Un des rôles essentiels donc du travail du sol est de faciliter la croissance des racines et le développement des plantes.

Cependant une structure peu poreuse à cause du compactage après un labour, a un effet négatif sur le développement de la plante et le développement racinaire des cultures et ses rendements.

**CHAPITRE 04 : ANALYSE
DU COMPORTEMENT D'UN
SOL ARGILEUX LIMONEUX
SOUS L'ACTION DE TROIS
TECHNIQUES DE MISE EN
PLACE D'UN BLÉ DUR
(TRITICUM DURUM) DANS
LA ZONE DE LA MITIDJA.**

Chapitre 04 : Analyse du comportement d'un sol argileux limoneux sous l'action de trois techniques de mise en place d'un blé dur (*Triticum Durum*) dans la zone de la Mitidja.

Introduction

La question que nous nous sommes posés avant d'entamer cette étude, est : *quelle sera la meilleure manière d'améliorer l'état structural du sol, avec les outils que la majorité des agriculteurs algériens dispose ?* Ainsi, nous savons que la quasi-totalité des agriculteurs dispose dans leurs exploitations d'un cover-crop, d'une charrue à disques ou d'une charrue à socs et parfois d'une herse et/ou d'un rouleau lisse ou croskill.

L'objectif de ce travail, qui rentre dans le cadre d'un programme de recherche de l'ITGC de Oued Smar, est de comparer les effets pédologiques de trois techniques de mise en place d'une céréale (blé dur), et d'observer les conséquences sur l'enracinement.

4.1. Caractéristiques du site d'essai

4.1.1. Description et localisation du site expérimental

Les essais se sont déroulés à la ferme centrale de l'ENSA, qui appartient à la commune de Oued Smar, daïra d'El Harrach, wilaya d'Alger. Elle se situe entre la latitude 36°42'46,9'' et 36°43'16,1'' Nord et les longitudes 03°09'16,7'' et 03°09'44,9'' Est.

4.1.2. Conditions climatiques de la campagne d'essais

La pluie enregistrée durant la campagne d'essai n'a pas dépassé la moyenne calculée sur 100 ans dans cette région, c'est juste 592 mm contre 749 mm la normale de la région, ce qui représente 21% de déficit. La plus importante quantité de pluie a été reçue entre le mois de novembre et le mois de février, et c'est la période labour – semaille – levée. ce qui est exceptionnel pour cette campagne c'est que la pluviométrie a été bien répartie tout au long du cycle de la plante. Pour ce qui est des besoins du blé dur en eau, ils sont estimés à environ 600 mm/an, mais ils doivent toutefois être bien repartis tout au long du cycle.

4.1.3. Caractéristiques pédologiques des parcelles d'essais

L'essai a été mis en place sur un sol à texture clayloam (argileux-loam) selon la classification de l'USDA avec un taux d'argile de 39,5 %, 20,2 % de limon fin et 3,96% de limon grossier, quant au sable il est de l'ordre de 20% et 13,6% entre sable fin et sable grossier

La variété utilisée est le blé dur *Triticum durum* var. Simeto d'origine Italienne. C'est une variété alternative, résultante d'un croisement entre deux variétés Capeit x Valnova. introduite en Algérie en 2004 par l'ITGC de Tiaret, c'est une variété qui s'adapte au climat méditerranéen en général. Elle est caractérisée par une bonne faculté germinative atteignant (98%) et un poids de 1000 grains 50 et 55g. Cette variété caractérise par une Hauteur de la plante 75-85 cm avec un épi compact et Paille creuse.

4.2. Protocole expérimental suivi

Notre expérimentation a été réalisée sur une parcelle de 90 mètres de longueur et 30 mètres de largeur, avec une surface totale de 3456 m². La totalité de la surface a été divisé en 9 micro-parcelle avec un écartement de 1 m entre micro-parcelle. Compte tenu du nombre de facteurs étudiés et du degré d'hétérogénéité présent sur la parcelle, nous avons opté pour le Fisher en bloc.

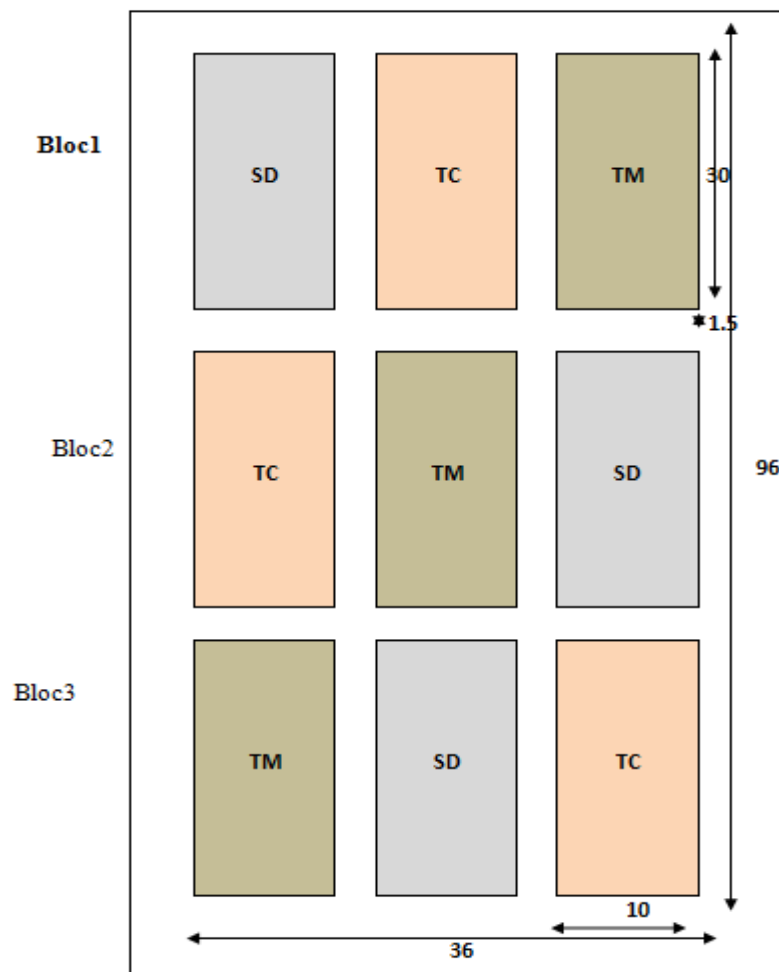


Figure 59: le dispositif adopté

4.3. Les techniques de travail du sol étudiées

Pour faire l'étude comparative entre les trois techniques culturales, on a opté pour les chaînes d'outils de travail du sol suivantes :

- **travail conventionnelle : charrue bisoc + cover crop + vibroculteur + rouleau**
- **travail minimum : chisel + vibroculteur + rouleau**
- **semis direct : semoir de semis direct**

Le choix du matériel de travail du sol utilisés est conditionné par la disponibilité au niveau de la station expérimentale de l'ENSA. Néanmoins, les chaînes d'outils choisies sont les plus répandues chez les agriculteurs dans les zones ayant les mêmes conditions pédo-climatique de la zone d'étude.

4.3.1. Travail conventionnel TC

Le travail du sol conventionnel classique est réalisé par une chaîne d'outils aratoires composée d'une charrue à socs pour le retournement du sol, le cover crop est utilisé après pour l'ameublissement du sol en sectionnant les mottes de grandes dimensions laissées par les labours, il nivelle le sol, et sectionne les débris végétaux laissés par le labour. Le pulvérisateur réduit aussi la porosité excessive provoquée par le labour. Pour le travail superficiel, le vibroculteur est utilisé, il permet d'obtenir un tri des mottes sur la surface travaillée, la terre fine tombe de la moitié au fond de la profondeur de travail tandis que les mottes plus grosses se retrouvent en surface. Ceci procure l'avantage de semer dans une terre fine et donc favorable à la germination tout en laissant un sol motteux peu sensible à la battance en surface. Pour le rouleau, cet outil aratoire entièrement dédié à la préparation des lits de semences, agit de façon très superficielle sur le sol, qu'il tasse légèrement (on parle de rappuyage du lit de semences), tout en complétant l'action de fragmentation des mottes en surface.

4.3.2. Travail minimum TM

Le travail du sol minimum quant à lui a été assuré par deux outils aratoires, le chisel suivi du vibroculteur. La différence majeure avec la technique conventionnelle c'est qu'on supprime totalement le labour donc le retournement du sol, et on parle alors de pseudo labour. Ce dernier est réalisé par le chisel, qui éclate le sol par la forte pression localisée sur une faible surface, ce qui entraîne pour un sol suffisamment cohérent (donc sec) la formation de lignes de ruptures. Le chisel a l'avantage d'effectuer un travail assez profond (jusqu'à 25 cm) sans

diluer la matière organique et surtout en laissant assez de débris en surface pour assurer une protection contre l'action érosive de l'eau et du vent. C'est donc un instrument de premier choix pour la simplification du travail du sol.

4.4. Résultats et Discussion

4.4.1. Variation de l'humidité de sol en fonction de la profondeur et du stade du blé dur pour les trois techniques (TC, TM, SD)

Les résultats de la variation de la teneur en eau du sol en relation avec la profondeur et le stade végétatif pour les trois techniques culturales sont mentionnés sur la figure 2.

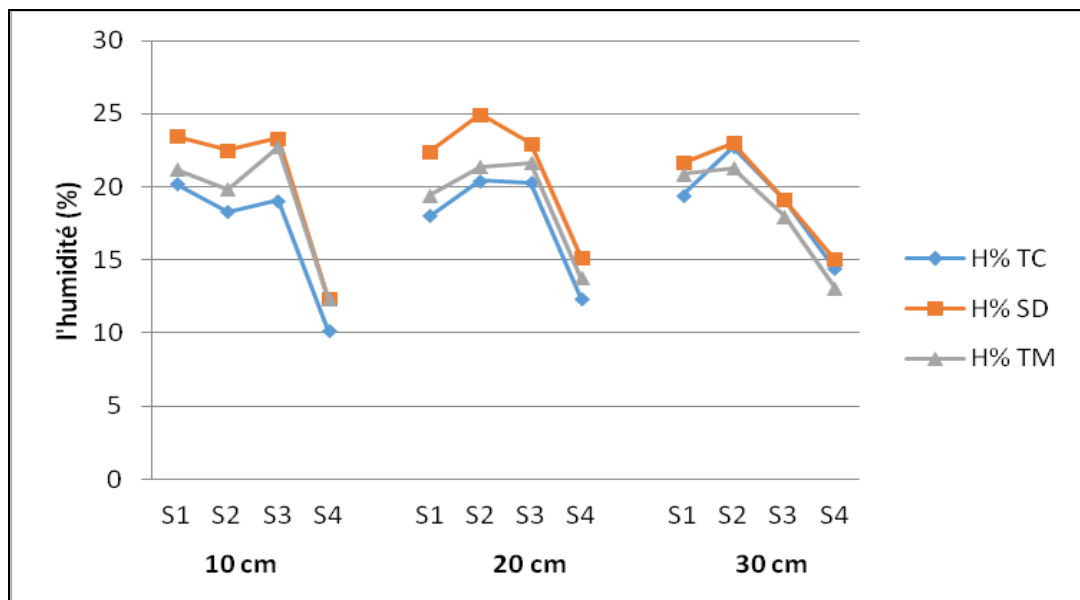


Figure 60: variation de l'humidité de sol en relation avec la profondeur et le stade végétatif pour les trois techniques

Avec :

S1 : levée

S2 : tallage

S3 : montaison

S4 : épiaison

D'une façon générale, les résultats obtenus montrent que le système semis direct permet une bonne conservation de l'eau dans le sol. La présence de la paille sur les parcelles de semis direct empêche l'évaporation du sol d'une part, Et d'autre part, le non retournement du sol permet le stockage de l'eau en surface et en profondeur, ces résultats sont accord avec ceux de (Feddal et al., 2015 ; Pala et al., 2000) qui notent qu'il y a peu de différences dans l'évolution de l'humidité du sol de la culture mise en place sous labour conventionnel comparativement au non labour, et confirme que le semis direct et le travail minimum permettent une meilleure humidité que le travail classique.

D'autre part, l'analyse statistique n'a montré aucune effet significatif de la technique sur l'humidité du sol, le test de KRUSKAL – WALLIS, a donné une p (value) de 0,281.

4.4.2. La variation de la porosité en relation avec la profondeur et les stades de développement du blé dur

Le deuxième paramètre analysé est la porosité, ce dernier conditionne pour une grande partie la rétention d'eau par le sol, l'aération des racines, et leur progression dans le sol. L'analyse de l'effet du travail conventionnel, du travail minimum et du semis direct sur la densité apparente et sur la porosité pour le blé dur est représentée dans la figure 66.

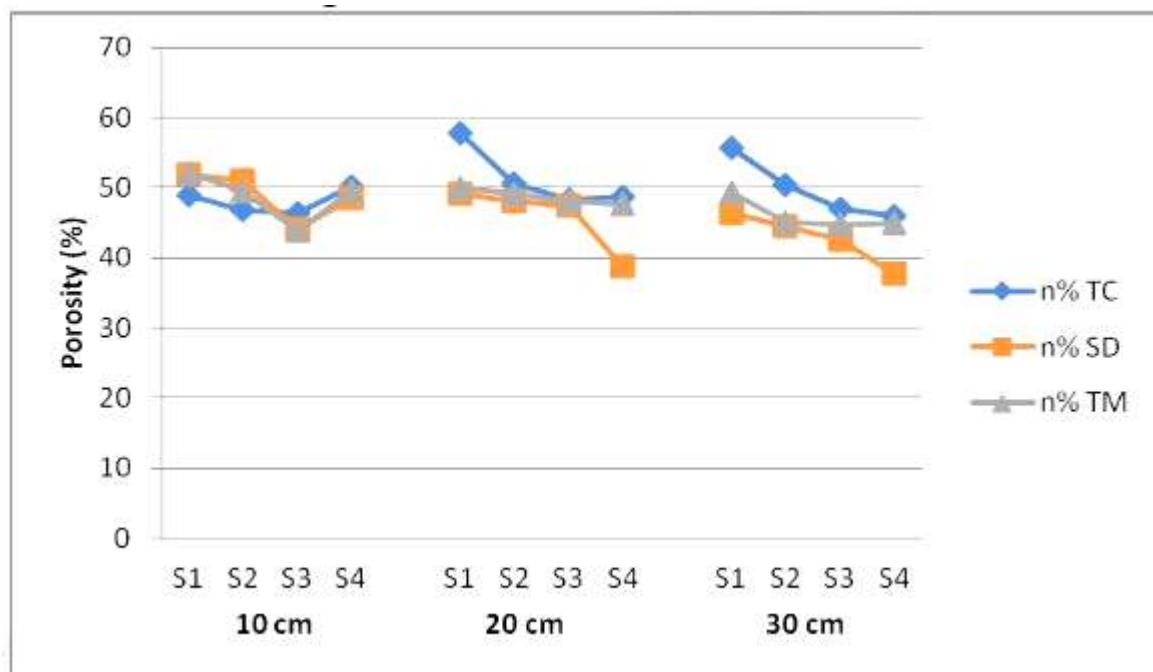


Figure 61: variation de la porosité en relation avec la profondeur et le stade de développement du blé dur

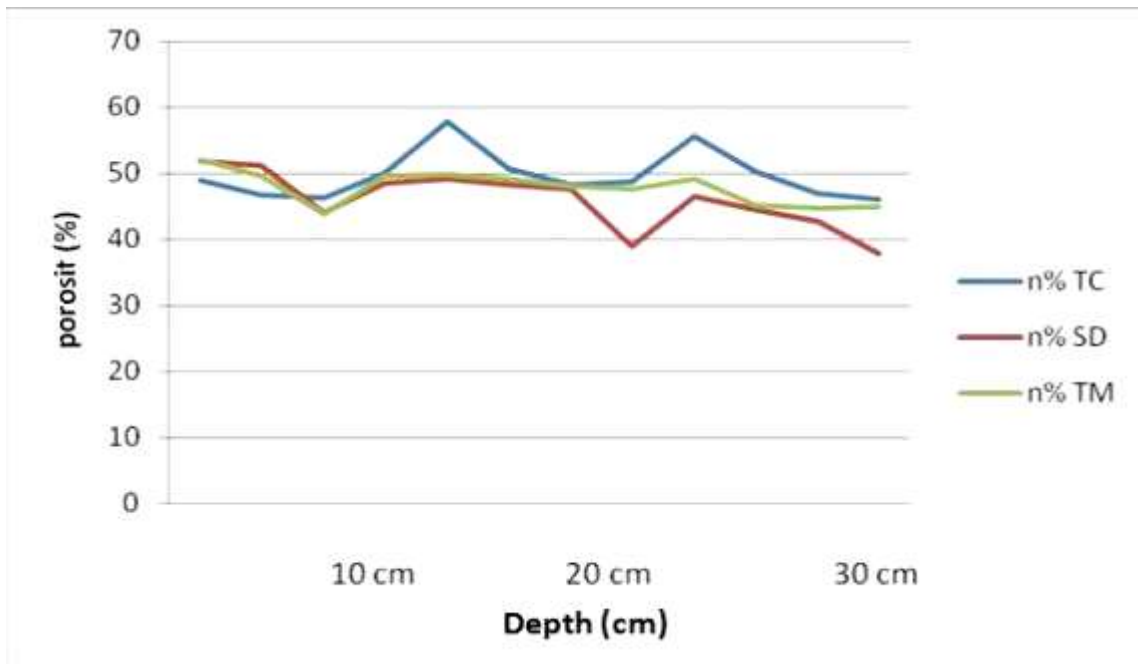


Figure 62: variation de la porosité en fonction de la profondeur.

A l'issue de l'analyse de l'humidité, l'analyse statistique n'a montré aucun effet significatif des techniques sur la porosité du sol, le test de Kruskal – Wallis a donné une P value de 0,224.

On peut conclure que la porosité diminue de la technique TC au SD en passant par une moyenne pour la technique TM. Au niveau des parcelles en TM nous constatons une homogénéité de la porosité du sol sur presque tout le profil ; ce qui n'est pas le cas des autres parcelles où la porosité est plus importante en surface.

Il faut rappeler aussi que ces résultats sont liés directement à la densité apparente qui ne présente pas un changement remarquable durant l'expérimentation. De nombreuses études ont été menées afin de caractériser la porosité en contexte de non labour. Comme le mentionnent (Strudley et al., 2008), les résultats sont difficiles à interpréter car ils peuvent être bruités par d'autres mécanismes (humectation, dessiccation et tassement). Pour (Tebrügge F et Düring R.A., 1999) et (Strudley et al., 2008), le non labour est caractérisé par une diminution de la macroporosité qui est, d'origine, créée par le labour. Donc, la porosité du sol est en général réduite dans les systèmes de conservation mais, tout comme les systèmes biologiques, ils favorisent la formation de macro-pores d'origine biologique. Ces changements s'opèrent progressivement et les différences entre les systèmes sont mesurables après plusieurs années de différenciation.

4.4.3. Variation de la résistance pénétrométrique en fonction de la profondeur et du stade de développement du blé dur pour les trois techniques culturales

La mesure de résistance pénétrométrique est un indicateur souvent utilisé pour évaluer rapidement l'ampleur du compactage des sols et la localisation de la zone compacte. Notre étude a porté sur une analyse de la variation de ce paramètre en relation avec les stades du blé dur pour trois techniques culturales et les premiers résultats obtenus sont mentionnés dans la figure suivante :

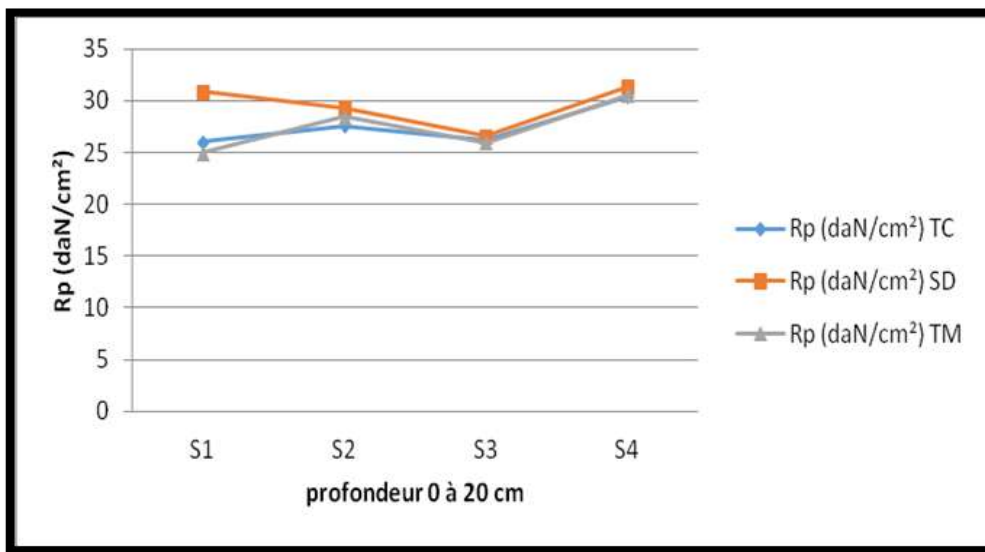


Figure 63: variation de la résistance pénétrométrique en relation avec les stades végétatifs pour les trois techniques

A première vue, les résultats montrent que les trois techniques présentent les mêmes tendances de Rp du premier au dernier stade et les valeurs sont presque similaires, sauf pour le SD au niveau du premier stade qui présente une Rp beaucoup plus importante que TM et TC.

En analysant plus profondément les résultats, il semble que les parcelles travaillées présentent une Rp moins importante par rapport au TM et SD, les Rp vont de 26 jusqu'à 30 daN/cm² au niveau du dernier stade.

Pour les parcelles menées en TM et TC, Rp augmente du premier au deuxième stade, diminue légèrement au niveau du troisième et remonte ensuite au niveau du quatrième stade pour atteindre une valeur maximale de 03 MPa.

Pour les parcelles menées en SD, la Rp est maximale au niveau du premier stade, elle suit ensuite les deux autres techniques pour atteindre 31 daN/cm² au cours du dernier stade végétatif.

On a établi un profil de la Rp en fonction de la profondeur du sol, et on a conclu que la Rp est proportionnelle à la profondeur, plus on va en profondeur et plus la Rp augmente, ce constat est valable pour les trois techniques. Cependant, on remarque une persistance de la résistance à une profondeur de 20 cm, c'est là où se situe la semelle de labour, la résistance diminue ensuite en dépassant la profondeur de 20 cm.

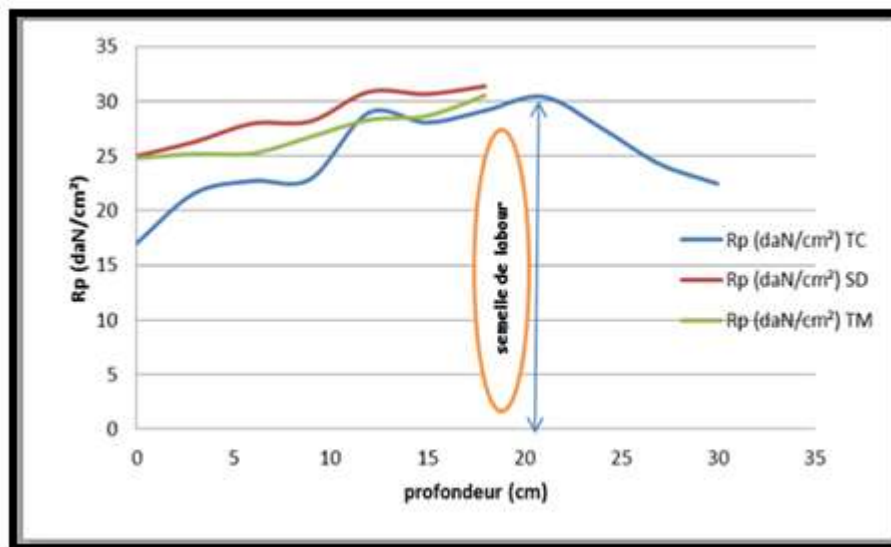


Figure 64: variations de la résistance pénétrométrique en relation avec la profondeur du sol pour les trois techniques culturales

L'analyse statistique n'a montré aucun effet significatif des techniques sur la Rp du sol, le test de Kruskal – Wallis a donné une P value de **0,181**. Globalement, ces résultats nous permettent de dire que les racines se développeront plus facilement sur les parcelles travaillées avec la charrue (TC). Les racines au niveau du semis direct rencontreraient un obstacle bien avant que celles de la technique conventionnelle. Mais il faut rester toutefois prudent, parce qu'aucune relation n'a été établit entre la résistance pénétrométrique et la croissance racinaire.

4.4.4. Relation entre « Rp » et « n »

D'après l'analyse de la corrélation on constate qu'il y a une forte corrélation entre la résistance pénétrométrique comme variable dépendante et la porosité comme variable indépendante.

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation les deux variables a donné la relation suivante :

$$R_p (\$D) = 45,65 - 0,41 * n (\$D)$$

Avec : $R = -0,8$ / $R^2 = 0,7$

Tenant compte de la valeur de p value = **0,181** (inférieure à 0,05) dans le tableau d'ANOVA, le modèle établi montre que la relation entre la Rp et « n » est fortement significative à un niveau de confiance de 95%. Le coefficient de détermination $R^2 = 0,7$ montre que le modèle est expliqué à 70 %. Le coefficient de corrélation est égal à - 0,84, indiquant une forte relation entre les variables.

Donc en système de semis direct, il pourrait y avoir une forte relation entre ces deux paramétrés, ils sont proportionnellement inverse, mais il faut rester toujours prudent quant à l'établissement de cette relation, Il est parfois difficile d'établir une corrélation entre la porosité et Rp. En effet, la porosité est une mesure volumique tandis que Rp est une mesure plus ponctuelle ; ainsi la variabilité entre les mesures n'est pas toujours à la même échelle. De plus, les renseignements apportés par l'un ou l'autre des paramètres sont quelquefois différents. Parfois, il est possible d'observer une augmentation de la Rp avec la profondeur sans remarquer de différence notable au niveau de la masse volumique apparente. Ce phénomène s'explique généralement par l'augmentation de l'action le long de la tige avec la profondeur (Soane, B.D., 1973). Ainsi, en utilisant uniquement les valeurs de Rp, on peut parfois conclure faussement à la présence d'une zone compacte. Il est donc généralement recommandé de mesurer conjointement la Rp avec d'autres paramètres notamment l'humidité et la masse volumique apparente.

4.4.5. La relation entre l'humidité et la porosité

Pour ce qui est de cette relation, il semble qu'il y a une forte corrélation entre les deux paramètres, avec $R=0,81$, plus la porosité augmente plus l'humidité augmenté, ce constat est

marqué en travail minimum ou l'action des outils à dents permet de réaliser des fendillements dans le sol, en aérons le sol et on augmentant sa conservation en eau.

4.4.6. Effet des techniques culturales sur la densité racinaire

Les prélèvements de la biomasse des racines réalisés dans les derniers stades de la vie de plantes (épiaison, floraison et maturation) ont donné les résultats suivants :

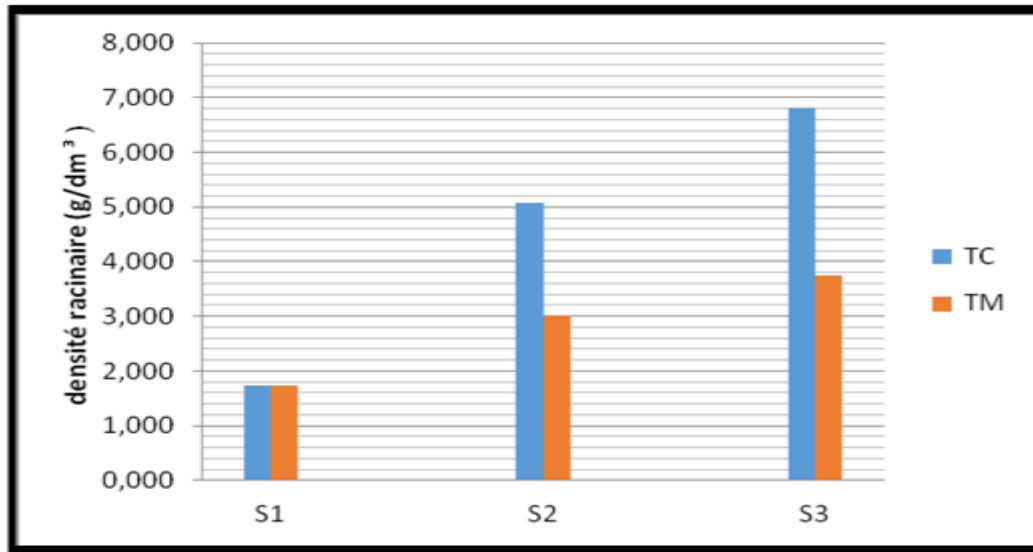


Figure 65: variation de la densité des racines en relation avec les stades végétatifs

Avec :

S1 : stade épiaison

S2 : stade floraison

S3 : stade maturation

Deux rôles sont généralement reconnus aux racines d'un végétal : d'une part, vis-à-vis de l'ensemble de la plante, elles ont les fonctions d'absorption et de transport de l'eau et des éléments minéraux vers les parties aériennes, celle d'organe de réserve éventuellement, celle d'ancrage enfin Il faut y ajouter les fonctions de synthèse et de transport de métabolites organiques. D'autre part, leur développement intervient dans l'évolution des propriétés du sol et plus particulièrement de sa structure et de sa teneur en matière organique.

Le test de student a révélé qu'il n'y a pas un effet significatif de la technique sur la densité racinaire avec P value : 0,09.

Le travail de sol classique favorise le développement des racines mieux que les autres techniques du fait de la bonne structure créée. Un des rôles essentiels donc du travail du sol est de faciliter la croissance des racines dans un milieu contraignant, pour cela, le travail du sol permet souvent de diminuer la résistance mécanique du sol à la pénétration des racines à travers une amélioration de sa structure et par conséquent, de son humidité. Il améliore aussi l'aération du sol, facilitant les échanges gazeux au niveau de la racine. Cependant une structure trop poreuse est à éviter.

Depuis plusieurs années, les chercheurs affirmaient que le non retournement du sol pour le travail minimum, réduit la semelle de labour. Ce qui freine le développement des racines. Mais d'après une étude sérieuse menée sur plusieurs années, par la faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale de l'Université catholique de Louvain (UCL). Sur un essai comparatif de différentes modalités de remaniement d'une semelle de non-labour sur une rotation de cultures. Ils affirment que les techniques culturales simplifiées notamment le travail minimum causent l'apparition de semelle « semelle de non labour » plus que le labour si on le pratique sur plusieurs années. Ils en concluent qu'en présence d'une semelle de (non-)labour, un décompactage annuel ou bisannuel (en fonction de la rotation des cultures) permettra sans doute d'obtenir une structure du sol idéale s'il est réalisable dans de bonnes conditions et s'il est accompagné de bonnes conditions de récoltes et de préparation du lit de semis suivant.

4.4.7. La variation de la teneur relatif en eau

Pour connaître l'influence des techniques culturales sur la teneur relatif en eau des feuilles, une analyse de la variation du TRE sur trois stades du blé a été réalisée et les résultats obtenus sont représentés sur la figure suivante :

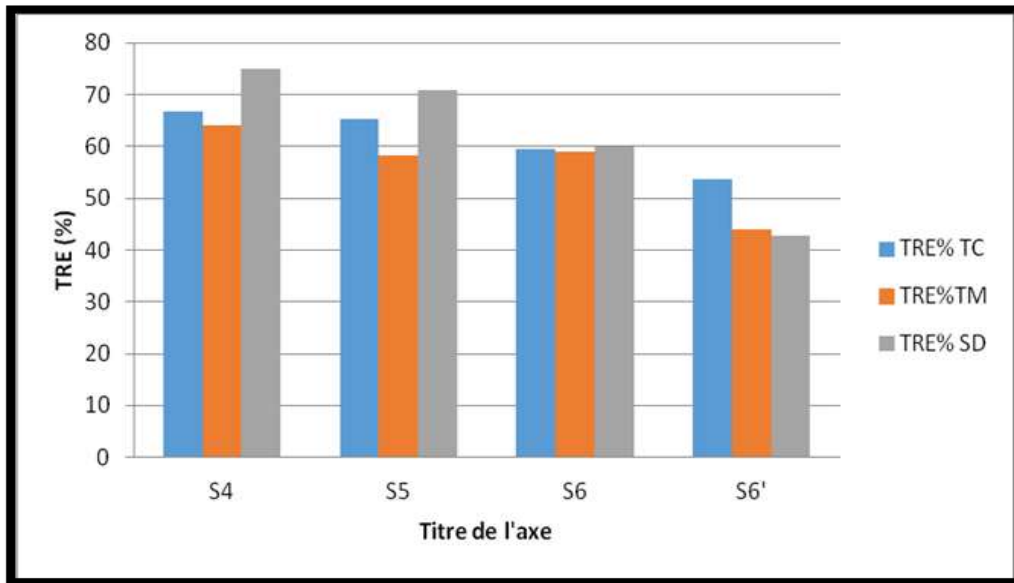


Figure 66: la teneur relative en eau en relation avec les stades végétatifs pour les trois techniques culturales

Avec :

S4 (stade épisaison)

S5 (stade floraison)

S6 (stade remplissage des grains)

S6' (stade laiteux).

Le suivi de l'évolution de la teneur relative en eau de toutes les techniques et pendant les derniers stades de développement de la plante a montré une diminution après chaque stade dans les trois techniques. Pour les deux premiers stades (4 et 5) la teneur relative en eau est importante au niveau du semis direct, contrairement au dernier stade ou la TRE la plus faible est enregistrée au niveau de cette technique.

D'une manière générale, les résultats nous renseignent que la teneur relative en eau baisse au fur et à mesure que le cycle de la culture tire vers sa fin. Il faut signaler aussi que la TRE est importante au niveau du TC à la fin du cycle ou la présence de l'eau est très importante, lorsque le remplissage des grains exige de grandes quantités d'eau en réserve dans les organes des feuilles.

D'autre côté, l'analyse statistique montre qu'il n'y a pas d'effet significatif de la technique sur ce paramètre, la P value obtenu est de 0,472.

La diminution de la TRE au cours du temps signifie que le stress hydrique devient plus important vers la fin de cycle de la culture. Ce déficit est le résultat de manque des pluies et les hautes températures pendant la journée que favorise l'évapotranspiration de l'eau réservé dans les feuilles et aussi l'eau du sol, ces résultat ont été confirmé par (Bajji et al., 2001) la teneur en eau des feuilles de blé diminue proportionnellement avec la réduction d'eau contenue dans le sol et (Slafer G. A. et Andrade F. H. 1990.), la diminution de la teneur relative en eau est due à la fermeture des stomates à cause de l'élévation de la température.

4.4.8. Variation de la matière sèche en fonction des stades végétatifs pour les trois techniques

Le poids sec ou bien la matière sèche est le résultat du poids frais de la plante et son poids après le séchage dans une étuve, donc c'est le poids de la plante après élimination de l'eau de réserve dans ces particules. Dans cette partie nous présentons la variation de la matière sèche des plantes en fonction des stades épiaison, floraison, remplissage des grains et maturation, et la matière sèche des épis dans les deux derniers stades pour les trois techniques.

Les résultats de la variation de matière sèche dans les différents stades sont représentée dans la figure 71 pour la matière sèche de la plante et la figure 72. pour la matière sèche des épis

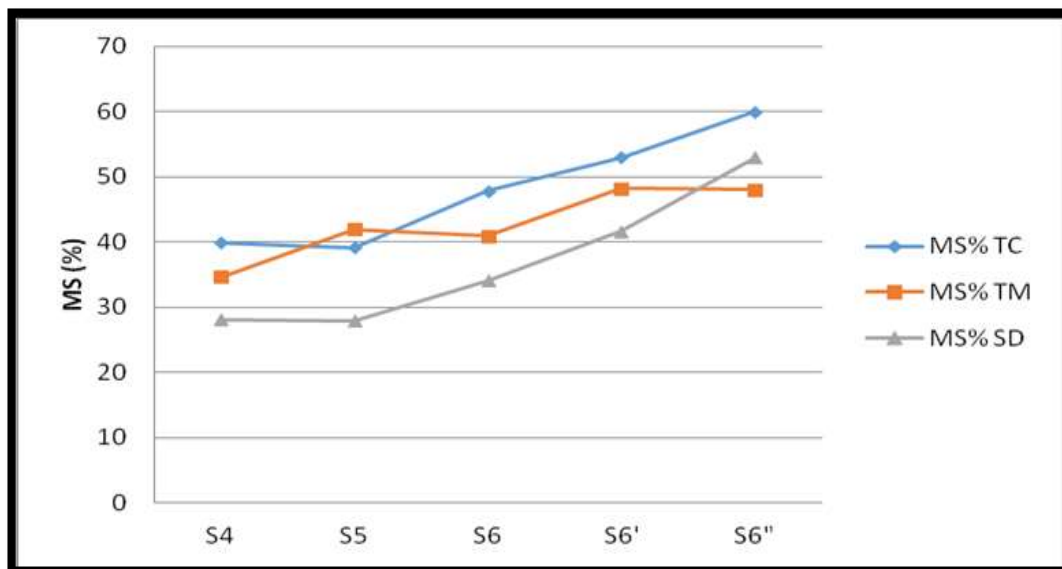


Figure 67: la variation de la matière sèche des plantes de blé dur en fonction des stades végétatifs pour les trois techniques.

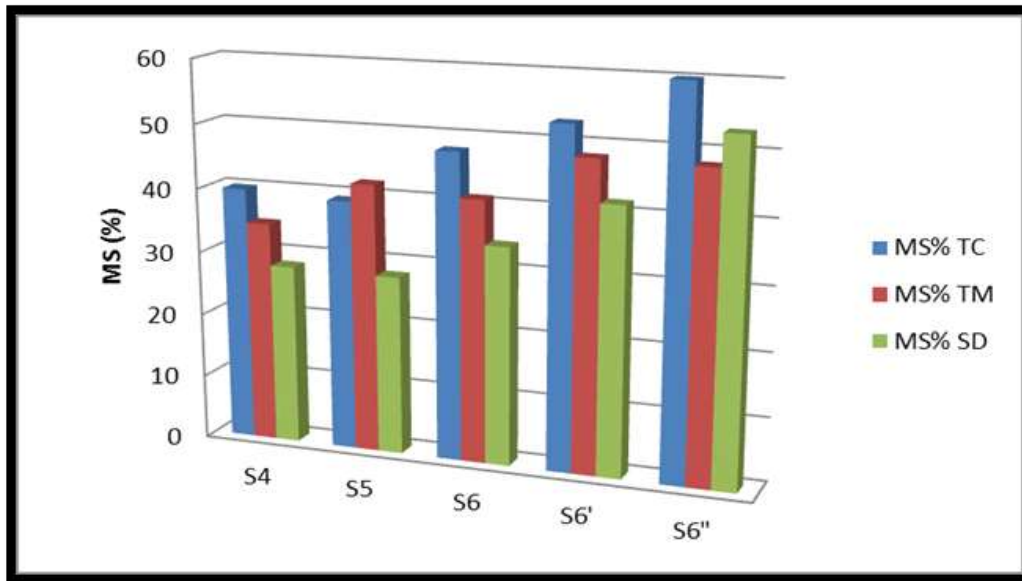


Figure 68: comparaison de la matière sèche pour les trois techniques

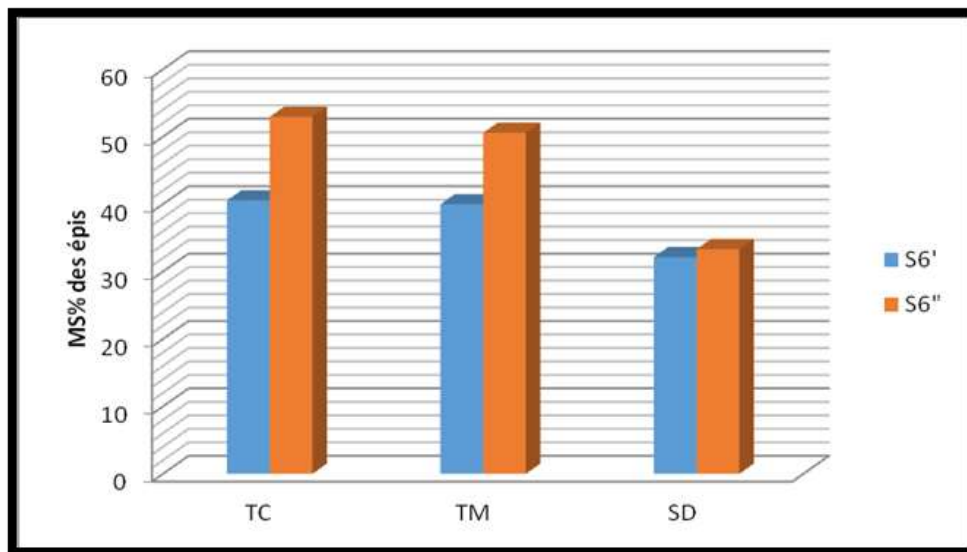


Figure 69: la variation de la matière sèche des épis de blé dur en fonction de deux derniers stades pour les trois techniques.

Les courbes d'évolution de la MS se superposent bien avec un avantage pour la TC. Le décalage entre les trois techniques diminue au fur et à mesure que le cycle de la plante tire à sa fin. Les données disponibles ne permettent pas d'attribuer cet écart aux conditions pédoclimatiques ou à la génétique ou même à la technique utilisée.

L'analyse statistique ne montre pas d'effet significatif de la technique sur la matière sèche : des plantes dans les sols travaillés est presque supérieure dans les stades épiaison, remplissage des grains et maturation finale, pour le stade floraison la valeur la plus importante est enregistrée dans le travail minimum et dans le stade maturation la valeur la plus haute est enregistrée dans le semis direct.

Globalement, l'évapotranspiration du sol est une source majeure de perte d'eau (Van Damme P.L. J. 1990.). La présence de résidus de culture à la surface du sol en semis direct joue un rôle primordial de la diminution de l'évaporation du sol, la présence de résidus prolonge la durée de dessèchement de la surface en gardant le sol plus humide pendant une période de temps plus longue. Durant cette expérimentation, l'humidité du sol durant la période de suivi de l'accumulation de la matière sèche diminue dans l'horizon du sol. Ce qui indique que la culture utilise l'eau contenue dans le sol pour produire la biomasse. Donc, la sensibilité au stress de fin de cycle est diminuée. La capacité de produire une biomasse aérienne acceptable à maturité est une caractéristique désirable surtout en zones semi-arides suite à la variabilité du climat.

D'autre part, les mesures effectuées ont confirmé l'évolution très rapide de la teneur en MS : on passe de 47 % à 60 % de MS en quelques jours. Il est donc intéressant de se baser sur la somme des températures moyennes depuis l'épiaison pour anticiper la réservation de la machine de récolte en évitant de dépasser une teneur en MS compatible avec la conservation. Il y a antagonisme entre d'une part la recherche du rendement ou de valeur énergétique, liés à la teneur en épis, et d'autre part l'assurance d'une bonne conservation.

4.4.9. L'influence des techniques culturales sur les composantes de rendement

4.4.9.1. Le nombre des épis/m²

Le nombre d'épi par mètre carré est un paramètre important pour la détermination du rendement, la figure ci-dessous représente la variation du nombre d'épi par m² pour deux techniques culturales :

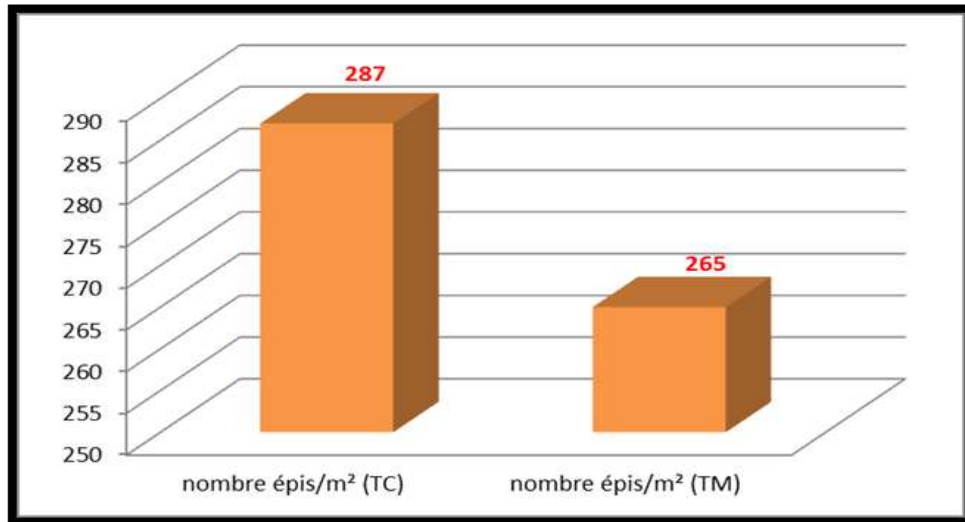


Figure 70: la variation de nombre des épis/m² en relation avec les techniques culturales

La figure ci-dessus montre que le meilleur peuplement a été obtenu au niveau des parcelles travaillées avec une moyenne de 287 épis /m², alors qu'on a enregistré une valeur légèrement plus basse pour le SD de 265 épis/m². L'analyse de la variance montre qu'il n'y a pas d'effet significatif de la technique culturale sur nombre d'épi/m².

D'une manière générale, le nombre d'épi par unité de surface est important, il reflète aussi bien le potentiel de la variété que les conditions dans lesquelles se développe et s'exteriorise cette culture. Les valeurs obtenus sont plus ou moins faibles relativement au potentiel de la variété qui possède un bon pouvoir de tallage et donc un bon peuplement épi. Ceci nous a amené à penser à la technique culturale utilisée dans le but d'éviter un mauvais développement racinaire et par conséquent, un faible peuplement épi par unité de surface.

4.4.9.2. Le nombre des grains/épi

La deuxième composante du rendement étudiée est le nombre des grains par épi, La figure ci-dessous illustre la variation du nombre de grains par épi pour les deux techniques culturales qui sont le travail conventionnel et la technique minimum :

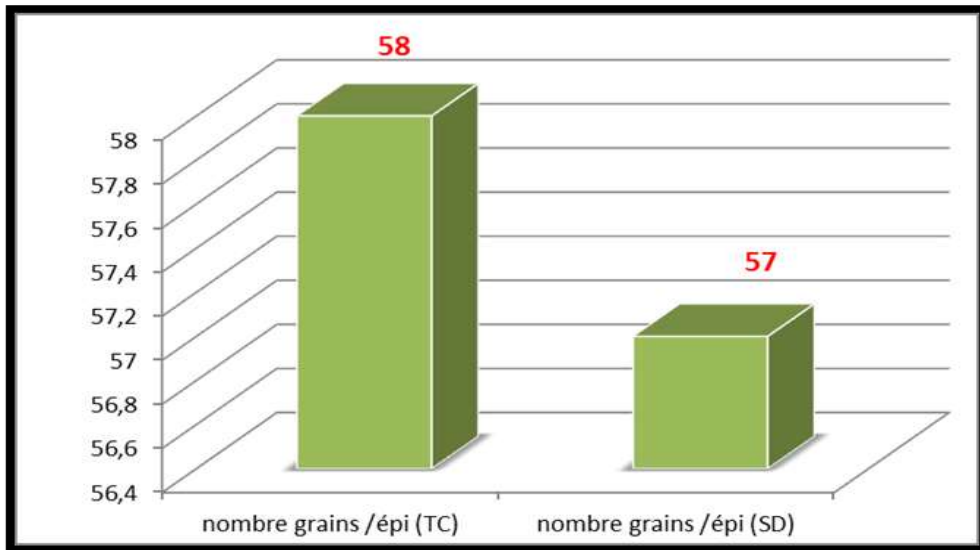


Figure 71: variation du nombre de grains par épi en fonction des techniques culturales

Les résultats montrent que le nombre de grains est à peu près égal pour les deux techniques avec un léger avantage pour le TC ou on a une moyenne qui avoisine les 58 grains contre 57 grains pour les parcelles TM.

Le test de Student ne montre aucun effet significatif de la technique sur ce paramètre, Selon plusieurs auteurs, l'expression du nombre de grains par épi est liée aux conditions climatiques au cours de la période (gonflement-épiaison), les quantités importantes de pluies avec des températures moyennes favorisent une augmentation du nombre de grains par épi. Et selon (Morsli Lakhdar ,2010) ; Tout froid tardif et/ou sécheresse associé à des hautes températures précoces à cette période peuvent induire une stérilité de l'épi par suite d'un non ouverture des stigmates plumeux. Donc la technique qui favorise plus la rétention en eau du sol va avoir une influence indirecte sur le nombre de grain par épi, d'ailleurs d'après des études menées par (Abdellaoui et al.,2011) précédemment, il a été conclu que le nombre de grains est lié à la technique culturale, Ils ont enregistré des faibles valeurs pour la technique qui consiste à travailler le sol en surface seulement. Donc, un travail du sol de faible profondeur, ne permet pas à la plante d'explorer les profondeurs convenablement.

4.4.9.3. Le poids de mille grains

La figure ci-dessous représente la variation du poids de mille grains pour les deux techniques utilisées à savoir le travail conventionnel et minimum :

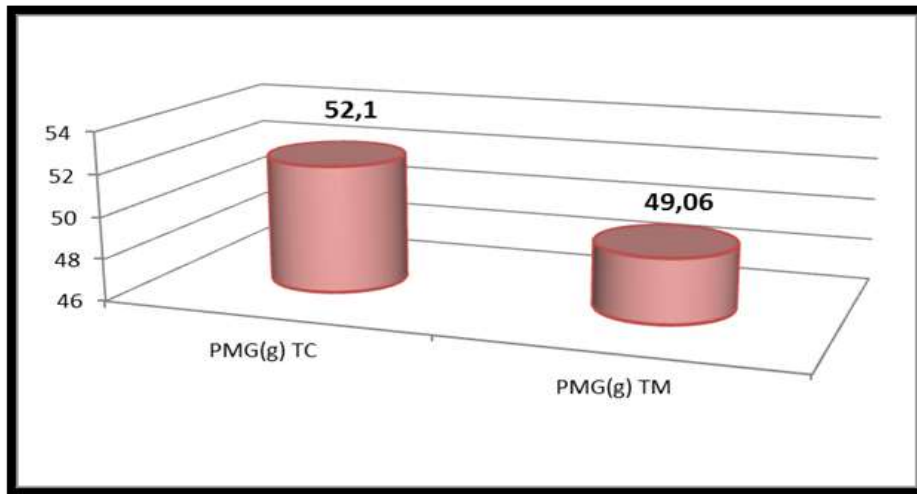


Figure 72: la variation PMG en relation avec les techniques culturales

D'après les résultats obtenus, Il apparaît que le poids de mille grains est légèrement meilleure pour le travail conventionnel 52.1 g, par rapport à celle de travail minimum 49.06 g . Le test de Student ne montre aucun effet significatif de la technique sur le PMG.

4.4.9.4. Le rendement estimatif du blé dur

Le rendement est le paramètre le plus important et déterminant pour comprendre l'influence des facteurs étudiés sur la culture. Tous les paramètres étudiés jusqu'ici laissent croire que celui-ci serait plus important en TC, et c'est ce que nous allons voir dans les histogrammes qui suivent :

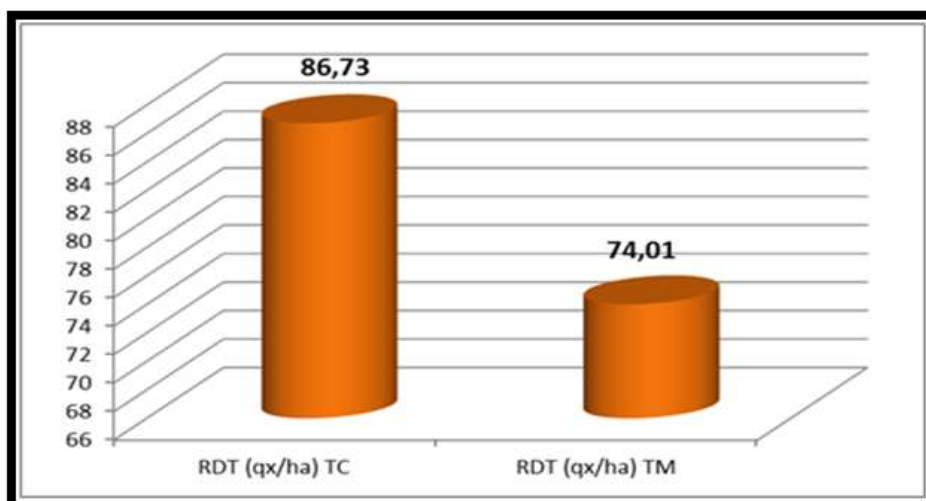


Figure 73: le rendement estimatif du blé dur

La figure ci-dessus montre que le rendement obtenu dans les sols labourés est supérieur à celui du travail minimum. On enregistre 86.73 qx/ha en TC et 74.01qx/ha en TM avec une différence de 12.72qx/ha.

Le test de Student ne montre pas d'effet significatif de la technique sur le rendement de la culture, A la lumière de nos résultats, on conclue que le rendement est influencé par plusieurs paramètres, dont le travail de sol. Selon (Chennafi, 2011), en agriculture pluviale, les pratiques du labour représentent une alternative d'amélioration par la préservation de l'eau dans le sol. (Hannachi A. et Fellahi Z. 2010); (Latrèche F. 2011); (Nelson W., 1980); considèrent que la disponibilité de l'eau pour la culture au stade critique dépend de la contenance du sol en eau au moment de sa plantation et il dépend du travail du sol, des résidus de cultures affectant l'efficacité de stockage des précipitations. (Nelson W., 1980) estime que l'efficacité d'utilisation de l'eau est une composante de la résistance de la culture au stress hydrique, elle est déterminante du rendement. Il faut signaler toutefois que l'infestation en mauvaises herbes a eu cause du rendement en SD, le traitement tardif à l'herbicide n'a pu limiter les pertes en rendement enregistrées dans ces parcelles (Abdellaoui, 2011) démontrent une évolution considérable de l'infestation par les adventices dans les parcelles de semis direct, une densité plus importante de mauvaises herbes est recensée sur les parcelles non labourées, ce sont généralement des vivaces à grand pouvoir colonisateur de ces milieux relativement non perturbés, et selon (Clavien Y. et Delabays N., 2006) le désherbage chimique printanier paraît particulièrement favorable pour cette espèce vivace; de par la profondeur de son enracinement, jusqu'à 2 m, il n'est pas (ou très peu) affecté par les herbicides à action racinaire, qui agissent habituellement à la surface ou dans les couches superficielles du sol. En outre, l'adjonction d'herbicides à action foliaire diminue la concurrence qui aurait pu être induite par d'autres espèces. Et peut-être le dosage d'herbicide utilisé n'est pas effectif.

Conclusion

Ce travail a traité les problèmes pédologiques liés à l'introduction des techniques culturales simplifiées en Algérie et le problème de la maîtrise le système semis direct. Il a aussi peut être permis comme références techniques sur ces systèmes en climat tempéré méditerranéen pour des sols argileux limoneux.

Les rendements obtenus lors de nos travaux et même dans des travaux menés précédemment à l'instar de ceux de Feddal, 2011, Hamani, 2013, Delmadji, 2014, et Benosmane, 2015; sont

pratiquement similaires entre le semis direct et le semis classique, si ce n'est pas meilleurs au niveau des parcelles travaillées conventionnellement. Cela nous pousse à dire que plusieurs critères qu'on doit prendre en considération, donc une analyse à caractère environnemental est plus que nécessaire, notamment sur les zones aquifères. Une étude de la structure du sol est nécessaire aussi pour se prononcer sur la technique à pratiquer pour un blé dur.

Conclusion générale

Afin de développer des stratégies pour atténuer les effets néfastes du compactage, une approche combinant la science du sol et physiologie de la plante est nécessaire.

Dans ce contexte, et à afin de promouvoir le développement d'une agriculture durable, les effets combinés du compactage du sol, et du travail conventionnel et simplifié du sol, ont été étudiés dans cette thèse, pour concevoir des systèmes de culture qui maximisent les rendements et minimisent la dégradation du sol.

Pour atteindre cet objectif, nous avons eu recours à plusieurs expérimentations, au laboratoire de RDM à l'ENSA, mais également à la station expérimentale de l'ENSA et de l'ITGC de Oued Smar, afin d'évaluer les effets du compactage du sol et de différents systèmes de travail du sol sur les propriétés physico-mécaniques du sol semé en blé dur et orge.

Nos résultats ont été axés sur deux grandes parties :

La première partie a porté sur l'étude de compactage des sols agricoles au laboratoire, et au site expérimental de l'ITGC. Il s'agit d'une part, d'analyser l'effet de l'intensité du compactage sur la structure du sol, et conséquences sur le développement racinaire de trois variétés du blé dur, et d'autre part, une étude de la compressibilité du sol en fonction de la variation de l'humidité.

Les résultats obtenus montrent un effet significatif du compactage sur le développement du blé dur, nous avons conclu que le développement du système racinaire est inversement proportionnel au degré de compactage. Les résultats ont montré aussi qu'en sol humide, le risque de compactage devient de plus en plus grand. Nos résultats sont conformes aux résultats des travaux précédents de plusieurs chercheurs sur la sensibilité du sol humide au compactage.

En conditions de plein champ, les différents passages du tracteur par l'action des pneus et son poids ont eu un effet sur le comportement du sol, principalement sur la porosité, l'humidité et la résistance pénétrométrique du sol. Les résultats montrent que le labour permet une augmentation de la porosité au niveau du premier horizon par rapport au semis direct. Après le compactage par les passages des roues, la porosité a diminué fortement dans les sols labourés.

Nous avons tiré conclusion que la résistance pénétrométrique diminue avec un travail du sol avec retournement, mais elle atteint des valeurs maximales après les passages des roues du tracteur après le labour en conditions humides. Contrairement au semis direct, la résistance à la pénétration augmente légèrement après les passages des engins en surface.

Dans les sols non compactés, les résultats de l'humidité ont montré que le semis direct semble avoir une meilleure rétention d'eau par rapport au travail conventionnel. Après le compactage, l'humidité du sol varie en diminuant légèrement en semis direct, et fortement en travail conventionnel au niveau du premier horizon.

Le premier constat concernant la porosité en travail conventionnel, est qu'elle augmente fortement après le labour, mais elle diminue aussi fortement après le compactage.

En semis direct, les résultats montrent bien que la porosité diminue légèrement après un compactage. Ce qui confirme que le type de porosité créée après un labour « *porosité d'assemblage* », qu'est très sensible au compactage. Au contraire, en semis direct, le sol contient un type de porosité différent « porosité tubulaire » liée à l'activité biologique des vers de terres et les racines, ce type de porosité est moins sensible au compactage.

Les conclusions tirées de ces essais expérimentaux, affirment que le compactage a un effet sur les sols agricoles labourés, ainsi, les sols humides sont plus sensibles au compactage.

Les résultats relatifs au développement des racines et des caractéristiques morphologiques de la plante, montrent nettement que le compactage et la technique culturale ont un effet sur le développement de la plante. Le système racinaire est très développé sur les parcelles labourées non compactées (TCNC), ensuite c'est celui des parcelles non travaillées et non compactées (SD).

Au niveau des parcelles labourées et compactées (TCC), nous avons enregistré la valeur la plus faible de la densité des racines. Nous avons remarqué également que le développement des caractéristiques morphologiques des céréales sont plus importants sur les parcelles travaillées non compactées, et toujours les valeurs les plus faibles dans les parcelles en TCC.

Les résultats de nos essais montrent aussi une chute de rendement estimé dans les parcelles labourées et compactées, et les parcelles compactées de semis direct. Les meilleurs rendements ont été obtenus sur les parcelles labourées non compactées.

D'après tous les résultats de la première partie obtenus, nous pouvons conclure que les sols labourés en travail conventionnel sont plus sensibles au compactage dû au nombre de passages et au poids des machines agricoles, par rapport au semis direct. Donc, le semis direct résiste mieux au compactage dû aux passages des pneumatiques, par rapport au travail conventionnel.

La deuxième partie des expérimentations a porté sur l'analyse de l'effet des techniques culturales sur les paramètres de production du blé. Cette expérimentation a été menée à la ferme centrale de l'ENSA. L'examen de l'ensemble des résultats portant sur les répercussions sur le développement de la culture du blé dur et de son rendement finale, nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les résultats relatifs au développement des racines montrent nettement que le système racinaire est très développé sur les parcelles labourées (TC) par rapport aux parcelles travaillées avec le chisel (TM).
- On a pu conclure que la densité racinaire est fortement corrélée avec la résistance pénétrométrique : $Densité\ racinaire\ (TC) = 13,89 - 0,41 * Rp\ (TC)$ $R = - 0,93$
- Les résultats de nos essais montrent aussi que le PMG du blé dur est meilleur sur les parcelles labourées, il est de 52 grammes, ce qui donne donc une meilleure qualité du blé. Ceci se répercute sur les rendements de la culture. Ce dernier est donc meilleur sur les parcelles labourées, il est de 86 quintaux à l'hectare. Sur les autres parcelles (TM), les rendements sont de 74 q/ha.
- Il faut signaler toutefois que les résultats ont montré que le rendement dépend de Rp et de la densité racinaire, l'analyse par régression multiple entre ces paramètres a donné la relation suivante : $Rdt\ (TM) = 207,3 - 0,87 * Rp\ (TM) + 6,22 * densité\ racinaire\ (TM)$ $R^2 = 0,98$

Perspectives

Il existe plusieurs facteurs de détermination de la sensibilité du sol au compactage, où sa teneur en humidité est le facteur principal à maîtriser avant de travailler le sol. Pour éviter ou diminuer le compactage il faut :

- Eviter de circuler sur les sols humides ou les travaillés
- Diminuer la pression exercée au sol par les machines agricoles
- Réduire le nombre de passages des engins agricole sur le terrain
- Diminuer la charge sur les essieux des remorques et/ou augmenter le nombre d'essieux
- Minimiser le travail du sol
- Maintenir un bon taux de matière organique dans le sol.

Pour restaurer les sols compactés, il faut impliquer des mécanismes biotiques (les racines des plantes, et la variation de la faune du sol), et à des moyens abiotiques : l'intervention par les machines agricoles pour un travail du sol (décompactage).

L'introduction des techniques culturales simplifiées en Algérie doit être sérieusement réfléchi, elle doit prendre en considération les impacts qu'auront sur le blé à mettre en place.

Nous recommandons la mise en place par les pouvoirs publics, d'un système de vulgarisation, sur les techniques culturales à adopter par les agriculteurs pour différentes spéculations dans les conditions pédoclimatiques diversifiées.

Aussi la mise en place et l'encouragement des jeunes entrepreneurs techniciens, à acquérir un matériel diversifié spécifique aux différentes conditions, ils contribueront certainement d'une manière directe à l'amélioration de l'installation des céréales en Algérie.

Enfin, ces résultats révèlent l'efficacité des outils aratoires par rapport au semis direct, ces résultats restent préliminaire une suite des essais avec plus de variétés dans différents sites expérimentales s'impose pour mieux évaluer les différents systèmes.

Les résultats présentés dans cette thèse nous ont peut-être permis d'ouvrir de nouveaux axes de recherche et des interrogations qu'il faudra traiter à l'avenir :

- ***Faut-il sensibiliser les agriculteurs aux conditions idéales d'utilisation des machines agricoles afin d'éviter le compactage des sols ?***
- ***N'est-il pas urgent de quantifier les effets actuels du compactage sur la production des céréales en Algérie ?***
- ***Et enfin, quelles sont réellement les critères et les mesures à prendre au futur pour choisir la mécanisation de l'agriculture Algérienne ?***

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

Ahuja, R., M., Timlin, J., 2006. Trans-disciplinary soil physics research critical to synthesis and modeling of agricultural systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70 (2), 311–326.

Aikins, S., Afuakwa, J., 2012. Effect of four different tillage practices on soil physical properties under cowpea. *Agric. Biol. J. N. Am.*, 3, 17–24.

Alegre, C., Cassel, K., Amezquita, E., 1991. Tillage systems and soil properties in Latin America. *Soil Till. Res.* 20 (2–4), 147–163.

Alvarez, R., Steinbach, H., 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil Tillage Res.*, 104, 1–15.

Amara, M., Boudhar, L., Adli N., Feddal, M.A., 2008. Evolution de la résistance pénétrométrique du sol en relation avec l'humidité et la porosité, sous l'action des pièces travaillantes d'une chaîne classique de préparation du sol. Vol. 2, n° 1 et 2 — Janvier-décembre 2008, Science et technique, Sciences appliquées et Technologies. Burkina Faso.

Arvidsson, J., 1998. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory compression experiments. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00164-0](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00164-0)

Augustin, K., Michael, K., Joachim, B., Rainer, D., 2020. Wheel Load and Wheel Pass Frequency as Indicators for Soil Compaction Risk: A Four-Year Analysis of Traffic Intensity at Field Scale. *Geosciences* 2020, 10(8), 292; <https://doi.org/10.3390/geosciences10080292>.

Aziz, I., Tarik, M., Rafiq, I., 2013. Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.03.002>

Azooz, R.H., Arshad, M.A., 1996. Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no-tillage and conventional tillage systems. *Can. J. Soil Sci.* 76 (2), 143–152.

Azooz, R.H., Arshad, M.A., 2001. Soil water drying and recharge rates as affected by tillage under continuous barley and barley–canola cropping systems in northwestern Canada. *Can. J. Soil Sci.* 81 (1), 45–52.

- Barley, K., Greacen, E., 1967.** Mechanical Resistance as a Soil Factor Influencing the Growth of Roots and Underground Shoots. *Adv. Agron.* 19, 1–40 [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60731-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60731-2).
- Batey, T., McKenzie, D., 2006.** Soil compaction: identification directly in the field. *Soil Use and Management*; 22(4):414-414.
- Batey, T., 2009.** Soil compaction and soil management – a review. *Soil Use and Management*, December 2009, 25, 335–345.
- Baver, L., ; Gardner, W., Gardner, R., 1987.** *Física de suelos*. CRAT. Mexico (México). 1972. 529p.
- Bengough, A., McKenzie, M., 1997.** Sloughing of root cap cells decreases the frictional resistance to maize (*Zea mays* L.) root growth. *Journal of Experimental Botany*, Volume 48, Issue 4, April 1997, Pages 885–893, <https://doi.org/10.1093/jxb/48.4.885>
- Bengough, A., Mullins, C., 1990.** Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *European Journal of Soil Science* 41: 341–358.
- Benhalima, Y., 2019.** Analyse de l'évolution des productions céréalières en fonction de la variabilité pluviométrique à l'horizon 2100. Cas de la wilaya de Tiaret.
- Bennie, A., Krynauw, G., 1985.** Causes, adverse effects and control of soil compaction. *South African Journal of Plant and Soil*.;2:109-114
- Bessou, C., Mary B., Leonard, J., Roussel, M., Gréhan, E., Gabrielle, B., 2010.** Modelling soil compaction impacts on nitrous oxide emissions in arable fields. *European Journal of Soil Science* 61 (3), 348-363.
- Bessou, C., Ferchand, F., Gabrielle, B., Mary, B., 2010.** Biofuels, green house and climate change. A review. *Agronomy for sustainable development*. 31. 1-79.
- Biriş, S., Ungureanu, N., Cujbescu, D., 2019.** Modelling of soil compaction under heavy duty tractors. *INMATEH – Agricultural Engineering*.;57(1): 261-270
- Birkás, M., Dexter, T., Szemok, A. 2009a.** Tillage-induced soil compaction as a climate threat increasing stressor. *Cereal Res. Commun.* 37:379–382.

Boiffin, J., Malezieux E., et Picard, D., 2001. Cropping systems for the future. In Nösberger J. Geiger, H. H., Struik, P. C. (eds.), *Crop Science*, pp 261-280.

Boonjung, H., Fukai, S., 1996. Effects of soil water deficit at different growth stages on rice growth and yield under upland conditions. 2. Phenology, biomass production and yield.
[https://doi.org/10.1016/0378-4290\(96\)00039-1](https://doi.org/10.1016/0378-4290(96)00039-1)

Botta, G., Becerra, T., Tourn B., 2009. Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes. *Soil and Tillage Research.*;103:381-386.

Botta, G., Jorajuria, D., Rosatto, H., 2006. Light tractor frequency on soil compaction in the rolling Pampa region of Argentina. *Soil and Tillage Research.* 86:14-19

Botta, G.F.; Tolón-Becerra, A.; Bienvenido, F.; Rivero, D.; Laureda, D.A.; Ezquerra-Canalejo, A. 2018; Contessotto, E.E. Sunflower (*Helianthus annuus* L.) harvest: Tractor and grain chaser traffic effects on soil compaction and crop yields. *Land Degrad. Dev.*, 29, 4252–4261.

Brandt, S., 1992. Zero vs. conventional tillage and their effects on crop yield and soil moisture. *Canadian Journal of Plant Science* • July 1992 • <https://doi.org/10.4141/cjps92-084>

Byszewski, W., Haman, J., 1974. The effect of mechanization on the soil environment. In *Gleba, Maszyna, Roślina (Soil, Machine, Crop)*; PWN:Warszawa, Poland,; pp. 59–142.

Cairns E., Audebert A., Townend J., Price A. H. & Mullins C. E., 2004. Effect of soil mechanical impedance on root growth of two rice varieties under field drought stress. *Plant and Soil* volume 267, pages 309–318

Cairns, 2009. <http://dx.doi.org/10.1080/10920277.2009.10597538>.

Carter, M.R., Mele, P.M., Steed, G.R., 1994. The effects of direct drilling and stubble retention on water and bromide movement and earthworm species in a duplex soil. *Soil Sci.* 157 (4), 224–231.

Chabane, M., Boussard, J., 2012. La production céréalière en Algérie: Des réalités d’aujourd’hui aux perspectives stratégiques de demain. [Autre], 20 p.

Chamen, W., Longstaff J., 1995. Traffic an tillage effects on soil conditions and crop
Mechanical Energetics of Bioturbation of Compacted Soils. plos one 10, e0128914.

Références Bibliographiques

- Chang, C., Lindwall, C.W., 1989.** Effect of long-term minimum tillage practices on some physical properties of a chernozemic clay loam. *Can. J. Soil Sci.* 69 (3), 443–449.
- Chang, C., Lindwall, C.W., 1990.** Comparison of the effect of longterm tillage and crop rotation on physical properties of a soil. *Can. Agric. Eng.* 32 (1), 53–55.
- Chang, C., Lindwall, C., 1992.** Effects of tillage and crop rotation on physical properties of a loam soil. *Soil Till. Res.* 22 (3–4), 383–389.
- Chehaibi, S., Khelifi, M., Boujelban, A., Abrougui, K., 2012.** Effects of tire inflation pressure and field traffic on compaction of a sandy clay soil as measured by cone index and permeability. *Canadian Biosystems Engineering.* 54:2.9-2.15.
- Chen, G., Weil, R., 2011.** Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.08.001>
- Chervet, A., Ramseier, L., Sturny, W. G. & Tschannen S. 2005.** Comparaison du semis direct et du labour pendant 10 ans. *Revue suisse Agric.* 37 (6): 249-256.
- Clark, L J, Whalley, R, Dexter, R, Barraclough, B., and Leigh A., 1996.** Complete mechanical impedance increases the turgor of cells in the apex of pea roots. *Plant Cell Environ.* 19, 1099–1102.
- CNIS, 2018.** Conseil National de l'Information Statistique, 2018. les-importations-des-cereales-et-laits-au-1er-trimestre. www.commerce.gov.dz/statistiques, 25-04-2018.
- Comia, A., Stenberg, M., Nelson, P., Rydberg, T., Hakansson, I., 1994.** Soil and crop responses to different tillage systems. *Soil Till.Res.* 29 (4), 335–355.
- Cruz, J., Zosa-Feranil, I., et Goce, C., 1986.** Population Pressure and Migration : Implications for Upland Development in the Philippines. Philippine Institute for Development Studies and Center for Policy and Development Studies Working Paper No. 86-06: viii + 205 pp., illustr.
- Czyż, E.A., Tomaszewska, J., Dexter, A.R., 2001.** Response of spring barley to changes of compaction and aeration of sandy soil under model conditions. *Int. Agrophys.* 15:9–12.

Da Silva, R., Iori, P., De Souza, Z., Pereira, D., Filho, O., De Melo, Silva F., 2016. Contact pressures and the impact of farm equipment on Latosol with the presence and absence of sugarcane straw. *Ciência e Agrotecnologia*; 40(3):265-278.

Dang, Y., Balzer, A., Crawford, M., Rincon-Florez, V., Liu, H., Melland, A.R., Antille, D., Kodur, S., Bell, M.J., Whish, J.P.M., Lai, Y., Seymour, N., Carvalhais, L.C., Shenk, P., 2018. Strategic tillage in conservation agricultural systems of north-eastern Australia: why, where, when and how? *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 1000–1015.

DeJong-Hughes, J., Moncrief, J., Voorhees, W., Swan, J., 2001. Soil Compaction: Causes, Effects and Control [Internet].. Available from:
<https://conservancy.umn.edu/handle/11299/55483> [Accessed: 2021-05-08]

Derdour, H., Angers, D.A., Laverdiere, M.R., 1993. Characterization of the pore space of a clay soil—influence of soil constituents and tillage practices. *Can. J. Soil Sci.* 73 (3), 299–307.

Derpsch, R., Friedrich, T. 2009. Development and Current Status of No-till Adoption in the World. In Proceedings of the 18th Triennial Conference of the International Soil Tillage Research Organization (ISTRO), Proceedings on CD, Izmir, Turkey, 15–19 June; pp. 1–13.

Drees, L.R., Karathanasis, A.D., Wilding, L.P., Blevins, R.L., 1994. Micromorphological characteristics of long-term and no-till and conventionally tilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58 (2), 508–517.

Ernst, G., Emmerling, C., 2013. Impact of five different tillage systems on soil organic carbon content and the density, biomass, and community composition of earthworms after a ten year period. *Eur. J. Soil Biol.*, 45, 247–251.

FAO, 2013 ; stat FAO, 2013, Algérie, <http://fao.com/algerie>.

Fidalski, J., Yagi, R., Tormena, C.A., 2015. Occasional soil turnover and liming in a clayey oxisol under a consolidated no-tillage system. *Soil Use Manag.* 39, 1483–1489.

Franke, A.C., Laberge, G., Oyewole, B.D. 2008. A comparison between legume technologies and fallow, and their effects on maize and soil traits, in two distinct environments of the West African savannah. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 82:117–135.

Guerif, J., Richard, G., Durr, C., Machet, J.M., Recous, S., RogerEstrade, J., 2001. A review of tillage effects on crop residue management, seedbed conditions and seedling establishment. *Soil Till. Res.* 61 (1–2), 13–32.

Gupta, S.C., Lowery, B., Moncrief, J.F., Larson, W.E., 1991. Modeling tillage effects on soil physical properties. *Soil Till. Res.* 20 (2–4), 293–318.

Guy, R., 2012. Evaluation et maîtrise du risque de tassement, de la parcelle au territoire national. *Innovations Agronomiques, INRAE*, 21, pp.45-57.

Håkansson, I., Reeder, R., 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load—extent, persistence and crop response. *Soil and Tillage Research.*;29(2-3):277-304.

Hakeem, K. R., Akhtar, M. S., et Abdullah, S., (2016). *Plant, Soil and Microbes*. doi:10.1007/978-3-319-27455-3.

Hamza, M., Anderson, W., 2005. Soil compaction in cropping systems A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research.*;82:121-145.

Hawkesford, M.J., Araus, J.L., Park, R.; Calderini, D., Miralles, D., Shen, T., Zhang, J., Parry, M.A., 2013. Prospects of doubling global wheat yields. *Food Energy Secur.* , 2, 34–48.

Hobbs, P., Gupta, R., 2004. Resource-conserving technologies for wheat in the rice-wheat systems. In: Ladha JK, Hill JE, Duxbury JM, Gupta RK, Buresh RJ (eds) *Improving the productivity and sustainability of rice-wheat systems: issues and impacts*. ASA Special Publication Number 65. ASA-CSSA-SSSA, Madison, pp 149–172

Horne, D.J., Ross, C.W., Hughes, K.A., 1992. 10 years of a maize oats rotation under three tillage systems on a silt loam in New Zealand. 1. A comparison of some soil properties. *Soil Till. Res.* 22 (1–2), 131–143.

Huang, H., Yu, Z., Zhang, S., Liang, X., Chen, J., Li, C., Ma, J., Jiao, R. (2010). *Drosophila* CAF-1 regulates HP1-mediated epigenetic silencing and pericentric heterochromatin stability. *J. Cell Sci.* 123(16): 2853--2861.

Ijoyah, M.O., Iorlamen, T., Idoko, J.A. 2012. Yield response of intercropped maize (*Zea mays* L.) and okra (*Abelmoschus esculentus* L. Moench) to seasonal conditions at Makurdi, Nigeria. *J. Nat. Sci. Res.* 2:79–85.

- Ingram, K.T., Bueno, F.D., Namuco, O.S., Yambao, E.B. and Betrouly, C.A. 1994.** Rice root traits for drought resistance and their genetic variation. In G.J.D.Kirk ed. Rice Root: Nutrient and Water Use. IRRI, Los Banos. 67-77.
- Ishaq, M., Hassan, A., Saeed, M., Ibrahim, M., Lal R., 2001 .**Subsoil compaction effects on crops in Punjab. Pakistan I. Soil physical properties and crop yield. Soil Till Res 59:57–65.
- Nawaz J., Muhammad H., Abdul J., Ghulam A., Muhammad S., Mashood S., and Imran S., 2013.** Seed Priming A Technique. Intl J Agri Crop Sci. Vol., 6 (20), 1373-1381, 2013.
- Roger-Estrade J., Adamiade V., Arrouays D., Bartoli, M., Baranger E., 2011.** Dégradation physique des sols agricoles et forestiers liée au tassement : principaux résultats du projet GESSOL ADD-DST. Etude et Gestion des Sols, Association Française pour l'Etude des Sols, ,18 (3), pp.187-199. hal-02647836.
- Jimenez K., Rolim M., Gomes I., de Lima R., Berrío LLA, Ortiz P., 2021.** Numerical analysis applied to the study of soil stress and compaction due to mechanised sugarcane harvest. Soil and Tillage Research.;206:104847.
- Jones, A.J., Siemens, J.C., Voorhess, W.B., Grisso, R.D., Schumacher, T.E. 1995.** Soil Compaction (Chap 14). In: Moldenhauer, W.C., Mielke, L.N. (eds), Crop Residue Management to Reduce Erosion and Improve Soil Quality –North Central. USDA-ARS Conservation Research Report 42. Washington, USA. pp. 61–64.
- Kadra, N., 1974.** Principales caractéristiques des variétés de céréales cultivées en Algérie. Ministère de l'agriculture et de la reforme agraire. Alger. 72p.
- Kern, J. S., & Johnson, M. G., 1993.** *Conservation Tillage Impacts on National Soil and Atmospheric Carbon Levels. Soil Science Society of America Journal, 57(1), 200.* doi:10.2136/sssaj1993.03615995005.
- Kettler, A., Lyon, D., Doran, J.W., Powers, W.L., Stroup, W.W., 2000.** Soil quality assessment after weed-control tillage in a no-till wheat-fallow cropping system. Soil Sci. Soc. Am. J. 64, 339–346.
- Kirkegaard, A., So, B., Troedson, J., Wallis, S. 1992.** The effect of compaction on the growth of pigeonpea on clay soils. I. Mechanisms of crop response and seasonal effects on a vertisol in a sub-humid environment. Soil Till. Res. 24:107–127.

- Kosutic, S., Husnjak, S., Filipovic, D., Bogunovic, M., 2001.** Influence of different tillage systems on soil water availability in the A horizon of an albic luvisol and yield in northwest Slavonia, Croatia. *Bodenkultur* 52 (3), 215–223.
- Kristoffersen, A., Riley, H., 2005.** Effects of soil compaction and moisture regime on the root and shoot growth and phosphorus uptake of barley plants growing on soils with varying phosphorus status. *Nutr Cycl Agroecosys* 72:135–146.
- Lefebvre, A., 2010.** Spatialisation de modèles de fonctionnement hydromécanique des sols appliquée à la prévision des risques de tassement à l'échelle de la France. Thèse Doc. INRA Orléans. 267 P.
- Lilley, J., Fukai S., 1994.** Effect of timing and severity of water deficit on four diverse rice cultivars I. Rooting pattern and soil water extraction. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)90099-X](https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)90099-X)
- Lindstrom, M.J., Voorhees, W.B., 1995.** Soil Properties across a Landscape Continuum as Affected by Planting Wheel Traffic, Site-specific Management for Agricultural Systems. ASA-SSSA, Madison, WI, pp. 351–363.
- Lipiec, J., Nosalewicz, A., Smarz, M. 2002.** Root growth and water uptake of wheat as affected by soil compaction. In: Proc. 3rd INCO Workshop, 14–18 June, 2001. Brasov, Romania. pp. 171–177.
- Logsdon, S.D., Cambardella, C.A., 2000.** Temporal changes in small depth-incremental soil bulk density. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64 (2), 710–714.
- Madsen, 1995.** <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.1995.tb08459.x>
- Mahboubi, A., Lal, R., Faussey, N.R., 1993.** 28 years of tillage effects on two soils in Ohio. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57 (2), 506–512.
- Mambani, B., Lal R., 1983.** Response of upland rice varieties to drought stress.II. Screening rice varieties by means of variable moisture regimes along a toposequence. *Plant and Soil* volume 73, pages 73–94
- Marshall, P., 1996.** Redox-sensitive homodimerization of Pex11p: a proposed mechanism to regulate peroxisomal division. *J Cell Biol* 135(1):123-37.

- Materechera, A., Alston, M., Kirby, J., et Dexter, R., 1992.** Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. *Plant and Soil* volume 144, pages 297–303
- MDRP, 2016.** Baisse de 11% de la production céréalière, <https://www.liberte-algerie.com/actualite/baisse-de-11-de-la-production-cerealiere-253871>.
- Misra, R., Dexter A., Alston, A., 1986.** Maximum axial and radial growth pressures of plant roots. *Plant and Soil* 95: 315–326.
- Mitchell, A., Romano G., Groisman B., Yona A., Dekel E., Kupiec, M., Dahan, O., Pilpel Y., 2009.** Adaptive prediction of environmental changes by microorganisms. 460, pages 220–224.
- Moinfar, A., Shahgholi, G., Abbaspour-Gilandeh, Y., Herrera-Miranda, I., Hernández-Hernández, J.L., Herrera-Miranda, M., 2021.** Investigating the Effect of the Tractor Drive System Type on Soil Behavior under Tractor Tires. *Agronomy*, 11, 696.
- Mouazen, A.M., Ramon, H., Baerdemaeker, J.D. 2003b.** Modelling compaction from on-line measurement of soil properties and sensor draught. *Precis. Agric.* 4:203–212.
- Nawaz M., Bourrié G., Trolard F., 2013.** Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development.*;33:291-309.
- Or, D., Ghezzehei, T.A., 2002.** Modeling post-tillage soil structural dynamics: a review. *Soil Till. Res.* 64 (1–2), 41–59.
- Orrben, L., Thorp, E. 1931.** Soil survey of Monroe Country, Iowa. USDA, Bureau of Chemistry and Soils. Waverly, IA, USA.
- Orzech, K., Zaluski, D., 2020.** Effect of companion crops and crop rotation systems on some chemical properties of soil. *J. Elem.*, 25, 931–949.
- Osunbitan, J.A., Oyedele, D.J., Adekalu, K.O., 2005.** Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamysand soil in southwestern Nigeria. *Soil Till. Res.* 82 (1), 57–64.
- O'Toole, C., 1982.** Adaptation of rice to drought-prone environments. In J.C. O'Toole ed. *Drought Resistance in Crops with Emphasis on Rice*. IRRI, Los Banos. 195-213.

- Parent, C., Bélanger, C., Parent, L.E., Santerre, R., Viau, A.A., Anctil, F., Bolinder, M.A., Tremblay, C. 2008.** Soil properties and landscape factors affecting maize yield under wet spring conditions in eastern Canada. *Biosys. Eng.* 99:134–144.
- Passioura, 1991.** <https://www.researchgate.net/publication/240506043>. Soil structure and plant growth.
- Pierce, J., Fortin, C., Staton, J., 1994.** Periodic plowing effects on soil properties in a no-till farming system. *Soil Sci. Soc. Am. J.*58 (6), 1782–1787.
- Poincelot, P., 1986.** *Toward a More Sustainable Agriculture*. AVI Publ. Westport, CT, USA
- Porterfield, J., Carpenter T., 1986.** Soil compaction: an index of potential compaction for agricultural tires. *Transactions of ASAE*, 29:917-922.
- Raghavan, V., Alvo, P., McKyes, E., 1990.** Soil compaction in agriculture: a view toward managing the problem. In: Lal, R., Stewart, B.A. (eds.), *Soil Degradation. Advances in Soil Science*. Springer Verlag. Berlin, Germany. 11:1–36.
- Raghavan, V., McKyes, E., Taylor, F., Richard, P., Watson, A., 1979.** The relationship between traffic and corn yield reductions in successive years. *Transactions of the ASAE*. University of California. Davis, CA, USA.
- Raper L., Bailey A., Burt E., Way T., 1994.** Liberati P. Inflation pressure and dynamic load effects on soil deformation and soil tyre interface stress. *Transactions of ASAE.*;38(3):685-689.
- Raper L., Schwab E., Dabney S., 2005.** Measurements and variation of site-specific hardpans for silty upland soils in the southeastern United States. *Soil and Tillage Research*; 84:7-17.
- Rastoin J., et Benabderrazik E., 2014.** Céréales et oléo protéagineux. Pour un co-développement de filières territorialisées. Chapitre1, pp 6.
- Rátonyi, T., Huzsvai, L., Nagy, J., Megyes, A. 2005.** Evaluation of soil tillage systems in maize production. *Acta Agron. Hungarica* 53:53–57
- Richards, G., and Greacen, L., 1986.** Mechanical stresses on an expanding cylindrical root analogue in granular media. *Austral. J. Soil Res.*, 24: 393-404.

Roger-Estrade J., Adamiade V., Arrouays D., Bartoli M., Baranger E., et al., 2011.

Dégradation physique des sols agricoles et forestiers liée au tassement : principaux résultats du projet GESSOL ADD-DST. *Etude et Gestion des Sols*, Association Française pour l'Etude des Sols, 18 (3), pp.187-199.

Rusanov V., 1994. USSR standards for agricultural mobile machinery: permissible influences on soils and methods to estimate contact pressure and stress at a depth of 0.5 m. *Soil and Tillage Research.*;29:249-252

Sakai H., Nordfjell T., Suadicani K., Talbot B., Bøllehuus E., 2008. Soil compaction on forest soils from different kinds of tires and tracks and possibility of accurate estimate. *Croatian Journal of Forest Engineering.*;29:15-27.

Schjøning, P., (2018). The role of soil organic matter for maintaining crop yields: evidence for a renewed conceptual basis. In: *Advances in agronomy*, vol 150. Elsevier, New York, pp 35–79.

Schlüter, 2018. Long term effects of conventional and reduced tillage on soil structure soil ecological and soil hydraulic properties. [researchgate.net/publication/326264874](https://www.researchgate.net/publication/326264874).

Scofield, S., 1902. The Algerian durum wheats: A classified list with description. USDA. bureau of plant industry, bulletin N°.7, 74 pages.

Shah, A., Tanveer M., Shahzad B., Yang G., Fahad S., Ali S., Bukhari A., Tung A., Hafeez, A., Souliyanonh, B., 2017. Soil compaction effects on soil health and crop productivity: an overview. *Environmental Science and Pollution Research.*;24:10056-10067

Silva, S., Barros N., Costa, L., Leite F., 2008. Soil compaction and eucalyptus growth in response to forwarder traffic intensity and load. *The Revista Brasileira de Ciência do Solo.*;32:921-932

Six, J., K. Paustian, Elliott T., and Combrink C., 2000. Soil structure and soil organic matter: I. Distribution of aggregate size classes and aggregate associated carbon. *Soil Science Society of America Journal* 64:681-689.

Smith, H., Dickson, L., 1992. The contributions of vehicle weight and ground pressure to soil compaction. *Journal of Agricultural Engineering.*;46:13-29.

Smucker, M., Ferguson C., DeBruyn W., Belford, R., and Ritchie J., 1987. Image analysis of video recorded plant root systems. *In* Minirhizotron Observation Tubes: Methods and Applications for Measuring Rhizosphere Dynamics. Ed. H M Tayler. pp 67–80. ASA special publication, 50, Madison, WI.

Somasundaram, J.; Chaudhary, R.S.; Awanish Kumar, D.; Biswas, A.K.; Sinha, N.K.; Mohanty, M.; Hati, K.M.; Jha, P.; Sankar, M.; Patra, A.K.; et al, 2018. Effect of contrasting tillage and cropping systems on soil aggregation, carbon pools and aggregate-associated carbon in rainfed Vertisols. *Eur. J. Soil Sci.*, 69, 879–891.

Strudley, M., , Green T., AscoughII J., 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. Volume 99, Issue 1, Pages 4-48.

Szollosi, I., 2003. A 3T SYSTEM készülékkel mért penetrációs ellenállás és nedvességtartalom összefüggése vályog fizikai féleségű talajon (Correlations between the penetration resistance registered with a 3T SYSTEM instrument and the moisture content of a soil with loam texture.) *Agrokémiai és Talajtan* 52:263–274. (in Hungarian with English abstract)

Taboada, A., Alvarez, R., 2008. Root abundance of maize in conventionally tilled and zero-tilled soils in Argentina. *Brazilian J. Soil Sci.* 32:769–779.

Taser, F., Kara, O., 2005. Silage maize (*Zea mays* L.) seedlings emergence as influenced by soil compaction treatments and contact pressure. *Plant Soil Environ.* 51:289–295.

Taylor, H., Ratliff, L., 1969. Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and soil water content. *Soil Sci* 108:113–119.

Tekin, Y., Kul, B., Okursoy, R., 2008. Sensing and 3D Mapping of Soil Compaction. *Sensors* (Basel). 2008;8(5):3447-3459.

Tisdall et Oades 1982. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>

Unger, W., Cassel, K., 1991. Tillage implement disturbance effects on soil properties related to soil and water conservation aliterature review. *Soil Till. Res.* 19 (4), 363–382.

Vine, A., 1987. Yield development in cassava under different soil physical conditions. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(87\)90034-7](https://doi.org/10.1016/0378-4290(87)90034-7)

Références Bibliographiques

- Voltr V., Menšík L., Hlisnikovský L., Hruška M., Pokorný E., Pospíšilová L., 2021.** The soil organic matter in connection with soil properties and soil inputs. *Agronomy*, 11: 779.
- Whiteley, G., and Dexter, A., 1982 .** Root development and growth of oilseed, wheat and pea crops on tilled and non-tilled soil. *Soil Tillage Res.* 2, 379–393.
- Wolfe, W., Topoleski, T., Gundersheim, A., Ingall, A., 1995.** Growth and yield sensitivity of four vegetable crops to soil compaction. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 120:956–963.
- Wolkowski, R., Lowery, B., 2008.** *Soil Compaction: Causes, Concern, and Cures.* University of Wisconsin- Extension, WI, USA. pp. 1–8.
- Wozniak, A., 2020.** Effect of various systems of tillage on winter barley yield, weed infestation and soil properties. *Appl. Ecol. Environ. Res.*, 18, 3483–3496.
- Yoshida, S., and Hasegawa, S., (1982).** The Rice Root System, its Development and Function. In: *Drought Resistance in Crops with the Emphasis on Rice*, IRRI, Manila, 83-96.
- Zhang, X., Cruse, R., Sui Y., Jhao, Z., 2006.** Soil compaction induced by small tractor traffic in Northeast China. *Soil Science Society of America Journal.*70:613-619.
- Ziyace, A., Roshan, M., 2012.** Survey study on soil compaction problems for new methods in agriculture. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences.*;3(9):1787-1801

LES ANNEXES

Annexes 1

Variétés du blé

BOUTALEB (Hedba 3 X ofanto)

➤ Les caractéristiques générales :

Plante (port au tallage) : Demi-dressé

Cycle végétative : Moyenne

Epi (glaucescence) : Très forte

Plante (hauteur de la tige et de l'épi) : Longue

Paille moelle en section transversale: Peu épaisse

Epi (couleur à maturité) : Blanc

Epi (forme) : Parallèle

Epi (compacité) : Moyen

Barbes et arrêtes (Présence) : Barbes présentes

Couleur des barbes à maturité : Noire

Date de semis : Novembre – Mi décembre

Densité de semis : 350 à 400 grain/m²

Rendement moyen : 41 qx/ha

Rendement maximal : 70 qx/ha

PMG : 60.4 g

➤ La résistance aux conditions climatiques :

Au froid : Tolérante

A la vers : Tolérante

Sécheresse : Tolérante

Egrenage : Résistante

➤ Fertilisation (u/ha)

Azotée : 46 u/ha

Phosphatée : 46u/ha

Potassique: 46 u/ha

➤ La résistance aux maladies :

Rouille jaune : Tolérante

Rouille brune : Tolérante

Rouille noire : Tolérante

Piétin échaudage : Tolérante

Piétin verse : Tolérante

Oïdium : Tolérante

Septoriose : Tolérante

Fusariose : Tolérante

Annexe 2

Tableau : Caractéristiques de la variété *Bousselam*.

Culture	Blé dur
Variété	Bousselam
L'origine	Croisement entre Waha (précoce) et Mohamed ben Bachir (tardive)
Rendement max	<60 Q /ha
Hauteur de tige	90-100 cm
PMG	Elevée (50 gr)
Teneur en protéine	Faible quantité <13%
Teneur en eau	7.4%

Analysis of the physical and mechanical behaviour of uncompacted soils under the action of cultivation techniques and consequences on cereal development: case of durum wheat

M.N. Mebarki¹, M.A. Feddal^{1*}, S. Feddal Taibi²

¹Laboratory for the control of water in agriculture, National Higher school of agronomy (ENSA), ES16.03, Dept. of agricultural engineering, El Harrach, Algeria.

²Saad Dahleb university, Dept. Of engineering of water and the environment Blida, Algeria

*Corresponding author: feddalamine@gmail.com ; Tel: +213 559 655 632

ARTICLE INFO

ABSTRACT/ RESUME

Key Words :

Cultivation techniques ;
Soil properties ;
Roots ;Yield.

Abstract: This work, which is a part of a research program about the problem of introducing simplified cultivation techniques in Algeria, focuses on an analysis of the effect of three cultivation techniques for the establishment of a cereal crop on the physical properties of the soil and the consequences on root development and the yield of durum wheat. The experimentation was carried out at the central farm of ENSA. The results clearly show that the technique used affects the evolution of soil moisture, porosity, and penetrometric resistance. The water content in the soil is better conserved with direct seeding, the porosity is slightly higher with the conventional technique. As far as penetrometric resistance is concerned, the soil is more resistant on the no-till plot. Root development is better in the plowed plots. It could be concluded that root density is strongly correlated with penetrometric resistance $\text{Root density (TC)} = 13.89 - 0.41 * R_p \text{ (TC)}$. The soil compressibility test showed that the water content increases the compaction phenomenon.

I.Introduction

Cereal growth continues to occupy an important place in Algerian agriculture. The three main kinds of cereal (barley, durum wheat, and soft wheat) cover about 5 million hectares annually, i.e. 60% of the country's UAA, the majority of these crops being located in semi-arid and arid areas. They are essentially rain-fed, depending directly on rainfall, which fluctuates greatly from one year to the next. These rainfall conditions are the first explanation for the low yields in these areas. In addition, cultivation techniques are often poorly adapted to these climatic constraints [13].

Producing more cereals has become a worrying issue for Algeria, whose needs, for a growing population, are estimated at over 111 million quintals by 2020 [11].

There are a large number of more or less well-defined cultivation systems or techniques for soil preparation and crop establishment.

The classic approach is to group them according to whether or not they involve deep tillage, which gives two main groups: tillage and no-till. A third major group is generally accepted, that of direct seeding, i.e. where the drill is the only tillage equipment used. Each of these techniques has advantages but also disadvantages. [3]

Plowing, with a moldboard plow, is still the most widely used tillage technique in the world. This practice has increased crop productivity by controlling weed growth and breaking up the soil structure. However, during the 20th century, new soil fertility problems appeared, particularly in the United States where serious erosion problems ("Dust Bowl") led to the development of alternative techniques to tillage. Since then, the results of numerous research studies, such as those of [14]; [15], in different climatic zones around the world, have revealed problems common to plowed soils: compaction, reduction in soil organic matter content,

erosion, limitation of water circulation. Therefore, a gradual transition from conventional plowing (plowing with mouldboard, turning over the topsoil to a depth of 20-30 cm) to various forms of preparation without turning over the soil layers, up to direct seeding (working only on the seed line), has been taking place throughout the world for some decades. [3]

The tests carried out by [2] also showed that the action of the tillage pieces strongly modifies the values of porosity, moisture, and penetrometric resistance of the soil. The porosity increases considerably after ploughing, from 40.4% to 49.3%. After tillage, the porosity increases significantly from 40.4% to 49.3%. After tillage, the porosity increases to 51.02% and after tillage, the total porosity increases to 52.65%. According to [12], tillage affects biotic and abiotic soil factors either directly by changing the structural properties of the soil such as void arrangement, aggregates, pore connectivity or indirectly by changing the conditions of aeration, temperature and root penetrability of the soil.

The tests carried out by [2] also showed that the action of the working parts strongly modifies the values of porosity, moisture, and penetrometric resistance of the soil. The porosity increases considerably after ploughing, from 40.4% to 49.3%. After tillage, the porosity increases significantly from 40.4% to 49.3%. After tillage, the porosity increases to 51.02% and after tillage, the total porosity increases to 52.65%. According to [12], tillage affects biotic and abiotic soil factors, either directly by changing the structural properties of the soil such as void arrangement, aggregates, pore connectivity, or indirectly by changing the conditions of aeration, temperature and root penetrability of the soil.

According to [21], roots lead a secret life in the soil. One hectare of winter wheat can hide 300,000 km of roots that bring water and nutrients to the crop. A well-developed root system is the result of a good soil structure and is essential for a high yield. Cultivation methods, therefore, have a profound and definite influence on the shape and development of the roots, as they affect many aspects of the root environment, namely: soil moisture and temperature, pore space, oxygen concentration, distribution of organic matter, mobilization of nutrients and the physical configuration of the soil surface.

This observation led us to focus our work on conventional soil preparation techniques. Our work is part of a research project to identify tillage tools and models to predict their effects under different conditions and soil types. Thus, our contribution in this field consists in reviewing the cultivation techniques, (to choose adequate technical itineraries that take into account the climatic, edaphic, and economic parameters and that slow down at the same

time the degradation of the natural environment, notably the soil.

The question we asked ourselves before starting this study was what would be the best way to improve the structural state of the soil, with the tools that most Algerian farmers have. Thus, we know that almost all farmers have a cover crop, a disc plough or a share plough and sometimes a harrow and/or a smooth or croskill roller on their farms.

The objective of this work, which is part of a research program of the ITGC of OuedSmar, is to compare the effects of three techniques for planting a cereal, durum wheat.

II. Materials and methods

The tests took place at the central farm of ENSA, which belongs to the commune of OuedSmar, daïra of El Harrach, Algiers. It is located between latitude 36°42'46.9" and 36°43'16.1" North and longitude 03°09'16.7" and 03°09'44.9" East. The rainfall recorded during the test season did not exceed the 100-year average for this region, just 592 mm compared to the normal 749 mm for the region, which represents a 21% deficit. The most important amount of rain was received between November and February, and this is the period of ploughing - sowing - emergence. What is exceptional for this crop is that the rainfall was well distributed throughout the crop cycle.

The water requirements of durum wheat are estimated at about 600 mm/year, but they must be well distributed throughout the cycle. The trial was set up on a clayloam soil according to the USDA classification with a clay content of 39.5%, 20.2% fine silt and 3.96% coarse silt, while the sand content was around 20% and 13.6% between fine and coarse sand.

The variety used is durum wheat *Triticum durum* var. Simeto of Italian origin. It is an alternative variety, the result of a cross between two Capeit x Valnova varieties. Introduced in Algeria in 2004 by the ITGC of Tiaret, it is a variety that adapts the Mediterranean climate in general. It is characterized by a good germination capacity reaching (98%) and a weight of 1000 grains 50 and 55g. This variety is characterized by a plant height of 75-85 cm with a compact spike and hollow straw.

Our experiment was carried out on a plot 90 meters long and 30 meters wide, with a total area of 3456 m². The whole area was divided into 9 microplots with spacing of 1 m between microplots.

Given the number of factors studied and the degree of heterogeneity present on the plot, we opted for the Fisher block design.

- Tillage techniques studied

For the comparative study between the three cultivation techniques, the following tillage tool chains were chosen

- Conventional tillage: bisoc plough + cover crop + vibrocultivator + roller

- Minimum tillage: chisel + vibro-cultivator + roller
- Direct seeding: direct seeding drill

The choice of tillage equipment used is conditioned by the availability at the ENSA experimental station. Nevertheless, the tool chains chosen are the most popular with farmers in areas with the same soil and climatic conditions as the study area.

A chain of ploughing implements consisting of a ploughshare for turning the soil carries out conventional tillage; the cover crop is used afterwards for loosening the soil by cutting the large clods left by ploughing, levelling the soil, and cutting the plant debris left by ploughing. The pulveriser also reduces excessive porosity caused by ploughing.

For shallow tillage, the vibrating tiller is used, which allows the clods to be sorted over the tilled surface, with the fine soil falling from halfway down the tillage depth and the larger clods falling to the surface. This has the advantage of sowing in fine soil and therefore favorable to germination while leaving a cloddy soil that is not very sensitive to surface compaction. For the roller, this tool, entirely dedicated to the preparation of seedbeds, acts in a very superficial way on the soil, which it compacts slightly (we speak of re-compaction of the seedbed), while completing the action of breaking up the clods on the surface.

Two ploughing tools, the chisel followed by the vibrating tiller, carried out the minimum tillage. The major difference with the conventional technique is that ploughing is eliminated, and therefore the turning of the soil and this is referred to as pseudo ploughing. The latter is carried out by the chisel, which bursts the soil by the strong pressure localized on a small surface, which leads to the formation of brake lines for a sufficiently coherent soil (therefore dry). The chisel has the advantage of working deep enough (up to 25 cm) without diluting the organic matter and, above all, leaving enough debris on the surface to ensure protection against the erosive action of water and wind. It is therefore a first-choice tool for simplifying soil cultivation.

III. Results and discussion

III.1. Soil compressibility study

The increasing need for equipment in modern agriculture has led to the birth and development of powerful agricultural machinery industry. And the introduction of new no-till techniques is constantly causing a reduction in the pore volume in the soil, which will have a negative impact on root development. It is in this context that we wanted to study the compressibility of the soil, to highlight the effect of machinery on the soil structure. To this end, we carried out a test in the RDM laboratory of ENSA, which aims to determine the sensitivity of

soils to compaction. This test consists of placing a sample of reworked soil in cylinders and varying the moisture content in each cylinder. The soil is compacted in each cylinder using a piston, the pressure exerted and the apparent density are then calculated and the variation curve of the apparent density ρ_{as} (g/cm^3) as a function of the moisture content w (%) is plotted in the following figure.

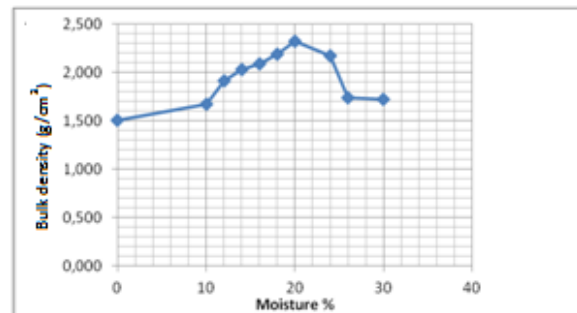


Figure 1. the variation of bulk density with water content

The figure above shows the variation of bulk density with humidity, the curve can be interpreted in three phases:

- First phase: moisture content < 10

In this part of the curve, the density attained remains low and hardly varies with the moisture content. Settling is the result of rearranging and possibly crushing the aggregates placed in the mould.

- Second phase: $10\% < \text{moisture content} < 20\%$.

At the 20% moisture content threshold, the slope of the curve increases sharply. The aggregates become deformable under the effect of the stresses they undergo and this all the more so as they are more humid. The porosity that existed between them gradually disappears. The apparent density reached is $2.41 \text{ g}/\text{cm}^3$ which is close to the real density, which means that the porosity is close to 0. For some materials, if the energy applied is sufficient, textural settlement can be observed. FAURE described this as plastic behaviour and equated the compaction sensitivity threshold with a plasticity entry threshold.

- Third phase: moisture $> 20\%$.

The end of the plastic domain is marked by the existence of a density maximum called the Proctor optimum. Beyond this maximum, the density decreases. The sample is then saturated. As water is incompressible, it can be further compacted, and the

higher the water content, the less it can be compacted. The water content - bulk density relationship is hyperbolic and the representative curve is called the saturation hyperbola.

The application of high pressures of up to 10 daN/cm² eliminates all the pressure that exists between the soil particles, increasing the apparent density to 2.32 g/cm³, thus causing strong compaction of the soil. According to previous tests, ploughed soils can withstand pressures of 0.8 to 1 bar without damage in dry conditions. Above this limit, they start to settle. The pressure the soil receives is not directly the load of the machine, but the pressure exerted by the tire. This pressure is equal to the inflation pressure plus the stiffness coefficient of the tire carcass. In other words, a tractor tyre inflated to 0.6 bar exerts a ground pressure of 0.8 bar, the difference being due to the stiffness of the tyre. Compaction is influenced by the water status of the soil, and this is all the more important when the pressure is high. It is important not to forget the texture of the soil, which plays a major role in compaction.

III.2. Variation of soil moisture with depth and stage of durum wheat for the three techniques (TC, TM, SD).

The results of the variation of soil water content in relation to depth and vegetative stage for the three cultivation techniques are shown in figure 2.

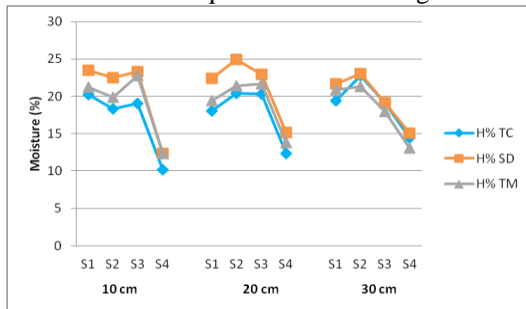


Figure 2. variation of soil moisture concerning depth and vegetative stage for the three techniques

With :

S1: emergence

S2 :tillering

S3 : bolting

S4 : heading

In general, the results obtained show that the no-till system allows good conservation of water in the soil. The presence of straw on the no-till plots prevents soil evaporation on the one hand. And on the other hand, the non-turning of the soil allows water storage on the surface. And in-depth, These results are in agreement with those of [9], [20] who note that there is little difference in the evolution of soil moisture of the crop planted under conventional tillage,

compared to no-till and confirm that no-till and minimum tillage allow better moisture than conventional tillage.

On the other hand, the statistical analysis showed no significant effect of the technique on soil moisture, the KRUSKAL - WALLIS test gave a p (value) of 0.281.

III.3. Variation of porosity concerning depth and development stages of durum wheat

The second parameter analysed is porosity, which largely determines soil water retention, root aeration and root progress in the soil. The analysis of the effect of conventional tillage, minimum tillage and no-till on bulk density and porosity for durum wheat is shown in figure 4.

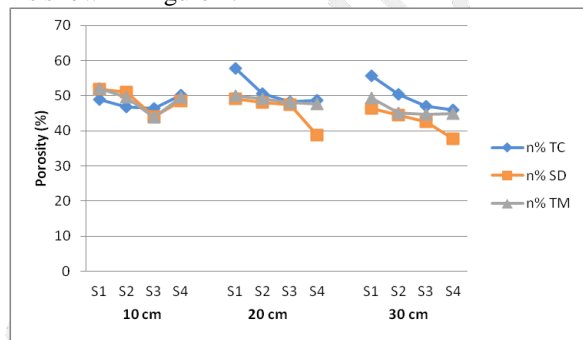


Figure 3. variation in porosity in relation to depth and stage of development of durum wheat

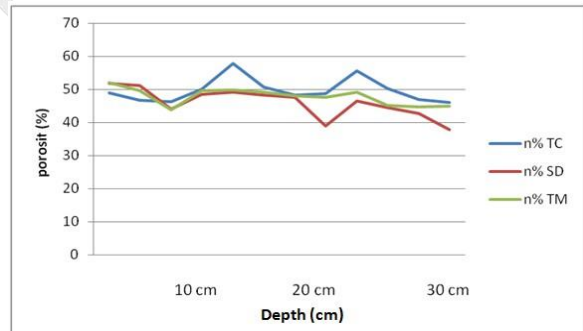


Figure 4 .variation of porosity with depth.

As for moisture, the statistical analysis showed no significant effect of the techniques on soil porosity, the Kruskal - Wallis test gave a P-value of 0.224.

It can be concluded that the porosity decreases from the TC technique to the SD through an average for the TM technique. In the TM plots we observe a homogeneity of the soil porosity on almost the whole profile; this is not the case for the other plots where the porosity is more important on the surface.

It should also be remembered that these results are directly related to the bulk density, which did not show a remarkable change during the experiment. Numerous studies have been carried out to characterize porosity under no-tillage conditions. As mentioned in [24], the results are difficult to interpret as they may be affected by other mechanisms (wetting, drying and settling). For [25] and [24], no-tillage is characterized by a decrease in macroporosity that is originally created by tillage. Thus, soil porosity is generally reduced in conservation systems but, like organic systems, they favor the formation of biologically derived macropores. These changes take place gradually and the differences between the systems can be measured after several years of differentiation.

III.4. Variation of penetrometric resistance according to depth and development stage of durum wheat for the three cultivation techniques

Penetrometric resistance measurement is an indicator often used to quickly assess the extent of soil compaction and the location of the compacted area. Our study focused on an analysis of the variation of this parameter in relation to the stages of durum wheat for three cultivation techniques and the first results obtained are shown in the following figure:

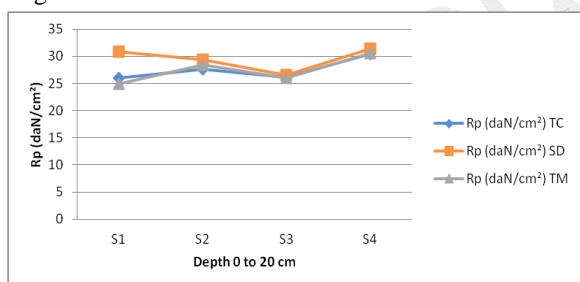


Figure 5. variation in penetrometric resistance in relation to vegetative stages for the three techniques.

At first sight, the results show that the three techniques present the same trends of Rp from the first to the last stage and the values are almost similar, except for SD at the first stage which presents a much higher Rp than TM and TC.

When analysing the results in more detail, it seems that the plots that worked have a lower Rp than TM and SD, with Rp ranging from 26 to 30 daN/cm² at the last stage.

For the TM and TC plots, Rp increases from the first to the second stage decreases slightly at the third stage and then increases again at the fourth stage to reach a maximum value of 03 MPa.

For the SD plots, Rp is highest at the first stage, then follows the other two techniques to reach 31 daN/cm² at the last vegetative stage.

A profile of the Rp according to the depth of the soil was established, and it was concluded that the Rp is proportional to the depth, the deeper you go the more the Rp increases, this observation is valid for the three techniques. However, we notice a persistence of the resistance at a depth of 20 cm, where the ploughing sole is located, the resistance then decreases beyond the 20 cm depth.

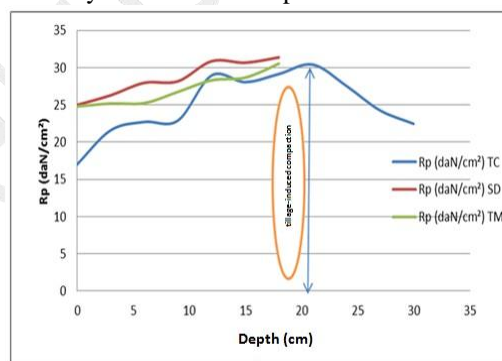


Figure 6. variations in penetrometric resistance with soil depth for the three cultivation techniques

The statistical analysis showed no significant effect of the techniques on soil Rp, the Kruskal - Wallis test gave a P value of 0.181.

Overall, these results allow us to say that roots will develop more easily on plots worked with the plough (TC). Roots in no-till would encounter an obstacle much earlier than those in the conventional technique. However, we must be cautious, because no relationship has been established between penetrometric resistance and root growth.

III.5. Relation between « Rp » and « n »

From the correlation analysis it can be seen that there is a strong correlation between penetrometric strength as a dependent variable and porosity as an independent variable.

The linear regression analysis, relating the two variables gave the following relationship:

$$R_p (SD) = 45,65 - 0,41 * n (SD)$$

Avec: $R = -0,84$
 $R^2 = 0,7$

Taking into account the p-value of less than 0.05 in the ANOVA table, the model established shows that the relationship between Rp and "n" is highly significant at the 95% confidence level. The coefficient of determination $R^2 = 0.7$ shows that the model is 70% explained. The correlation coefficient is equal to -0.84, indicating a strong relationship between the variables.

So in a no-till system, there could be a strong relationship between these two parameters, they are proportionally inverse, but one should always be careful about establishing this relationship. It is sometimes difficult to establish a correlation between porosity and Rp. It is sometimes difficult to correlate porosity and Rp because porosity is a volumetric measurement whereas Rp is a more punctual measurement; thus the variability between the measurements is not always on the same scale. Moreover, the information provided by one or the other parameter is sometimes different. Sometimes it is possible to observe an increase in Rp with depth without noticing a significant difference in bulk density. This is usually explained by the increase of the action along the rod with depth [23]. Thus, using Rp values alone can sometimes lead to the false conclusion that a compacted zone is present. It is therefore generally recommended that Rp be measured in conjunction with other parameters such as moisture and bulk density.

III.6. Relation between humidity and porosity

As far as this relationship is concerned, it seems that there is a strong correlation between the two parameters, with $R=0.81$. The more the porosity increases the more the humidity increases, this observation is marked in minimum tillage where the action of the tine tools makes it possible to carry out cracks in the soil, aerating the soil and increasing its water conservation.

III.7. Effect of cultivation techniques on root density

Root biomass samples taken in the later stages of plant life (heading, flowering and maturation) gave the following results:

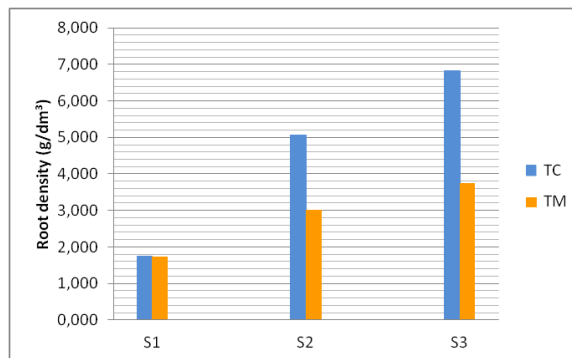


Figure 7. variation in root density in relation to vegetative stages

With:

- S1: heading stage
- S2: flowering stage
- S3: maturation stage



Figure 8 . Roots development

Two roles are generally recognised for the roots of a plant: on one hand, the plant as a whole. they have the function of absorbing and transporting water and mineral elements to the aerial parts, possibly acting as a reserve organ, and finally as an anchor, to which must be added the functions of synthesis and transport of organic metabolites. In addition, their

development plays a role in the evolution of soil properties and more particularly its structure and organic matter content.

The weld test revealed that there was no significant effect of the technique on root density with P value: 0.09.

Conventional tillage favors root development better than other techniques due to the good structure created. One of the essential roles of tillage is to facilitate root growth in a constraining environment. To this end, tillage often decreases the mechanical resistance of the soil to root penetration by improving its structure and, consequently, its moisture. It also improves soil aeration, facilitating gas exchange at the root level. However, a structure that is too porous should be avoided. For several years, researchers have claimed that not turning the soil for minimum tillage reduces the ploughing sole. This hinders root development, but according to a serious study conducted over several years by the Faculty of Biological, Agronomic and Environmental Engineering of the Catholic University of Leuven (UCL) on a comparative trial of different modalities of reshaping a no-till sole on a crop rotation. In a comparative trial of different methods of reshaping a no-till seedbed in a crop rotation, they stated that simplified cultivation techniques, especially minimum tillage, cause the appearance of a "no-till seedbed" more than ploughing if practiced over several years. and concluded that, in the presence of a no-till seedbed, annual or biennial decompacting (depending on the crop rotation) will undoubtedly make it possible to obtain an ideal soil structure, if it is possible to do so under good conditions and if it is accompanied by good harvesting conditions and preparation of the next seedbed.

III.8. The variation of the relative water content

In order to know the influence of the cultivation techniques on the relative water content of the leaves, an analysis of the variation of the ERR on three stages of the wheat was carried out and the results obtained are represented in the following figure:

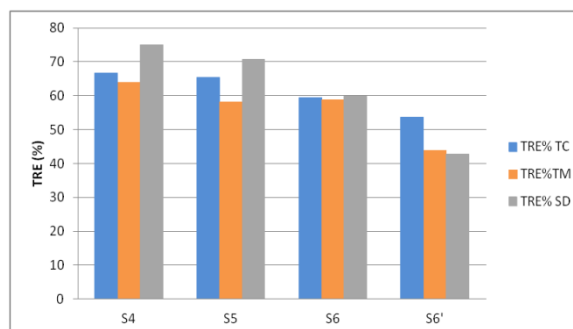


Figure 9: The relative water content in relation to the vegetative stages for the three cultivation techniques

With :

S4 : (heading stage)

S5 : (flowering stage)

S6 : (grain filling stage)

S6' : (milky stage).

Monitoring the evolution of the relative water content of all techniques and during the last stages of plant development showed a decrease after each stage in all three techniques. For the first two stages (4 and 5) the relative water content is high in no-till, in contrast to the last stage where the lowest ERR is recorded in this technique.

In general, the results indicate that the relative water content decreases as the crop cycle draws to a close. It should also be noted that the ERR is high in the TC at the end of the cycle when the filling of the grains requires large amounts of water in reserve in the leaf organs.

On the other hand, statistical analysis shows that there is no significant effect of the technique on this parameter, the P value obtained is 0.472.

The decrease in ERR over time means that water stress becomes more important towards the end of the crop cycle. This deficit is the result of lack of rainfall and high temperatures during the day that favors the evapotranspiration of the water reserved in the leaves. And also the water in the soil, these results have been confirmed by [5] the water content of the wheat leaves decreases proportionally with the reduction of the water contained in the soil and [22], the decrease of the relative water content is due to the closing of the stomata because of the rise of the temperature

III.9. Variation of dry matter according to vegetative stages for the three techniques

The dry weight or dry matter is the result of the fresh weight of the plant and its weight after drying in an oven, so it is the weight of the plant after elimination

of the reserve water in its particles. In this section we present the variation of plant dry matter according to the stages heading, flowering, grain filling and ripening, and the dry matter of the ears in the last two stages for the three techniques. The results of the dry matter variation in the different stages are shown in figure 10 for the plant dry matter and figure 11 for the cob dry matter

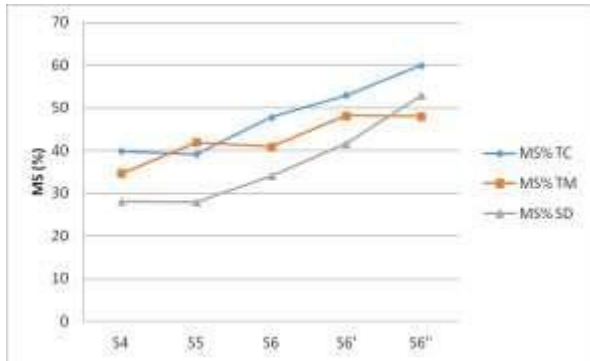


Figure 10 : The variation of the dry matter of durum wheat plants according to the vegetative stages for the three techniques.

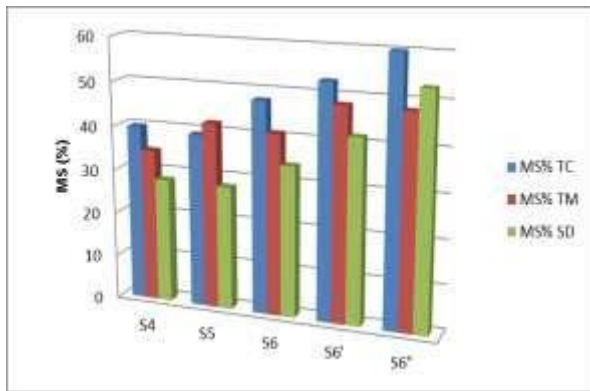


Figure 11. comparison of dry matter for the three techniques

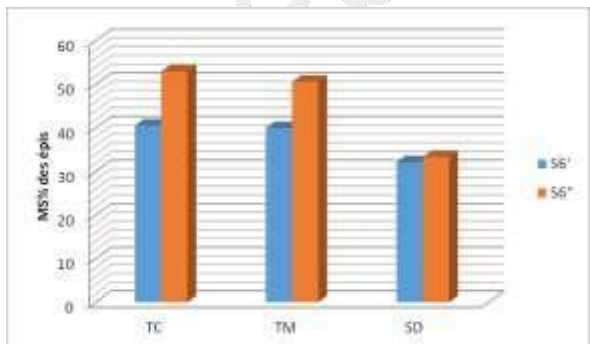


Figure 12 . The variation of the dry matter of durum wheat ears according to the last two stages for the three techniques.

The DM evolution curves overlap well with an advantage for CT. The gap between the three techniques decreases as the plant cycle draws to a close. The available data do not allow us to attribute

this difference to soil and climatic conditions or genetics or even the technique used.

The statistical analysis does not show a significant effect of the technique on the dry matter: plants in the tillage soils are almost higher in the heading, grain filling and final ripening stages, for the flowering stage the highest value is recorded in minimum tillage and in the ripening stage the highest value is recorded in direct seeding.

Overall, soil evapotranspiration is a major source of water loss [26]. The presence of crop residues on the soil surface in no-till plays a major role in decreasing soil evaporation, as the presence of residues, prolongs the drying time of the soil surface by keeping the soil wetter for a longer time. In this experiment, soil moisture during the follow-up period of dry matter accumulation decreases in the soil horizon. This indicates that the crop uses the water in the soil to produce biomass. Thus, the sensitivity to end-of-cycle stress is reduced. The ability to produce acceptable above-ground biomass at maturity is a desirable characteristic, especially in semi-arid areas due to climate variability.

On the other hand, measurements confirmed the very rapid evolution of DM content: from 47% to 60% DM in a few days. It is therefore interesting to use the sum of the average temperatures since heading to anticipate the reservation of the harvesting machine and avoid exceeding a DM content compatible with conservation. There is an antagonism between the search for yield or energy value, linked to the ear content, and the assurance of good conservation.

III.10. The influence of cultivation techniques on yield components

III.11. The number of ears/m²

The number of ears per square meter is an important parameter for the determination of the yield, the figure below represents the variation of the number of ears per square meter for two cultivation techniques:

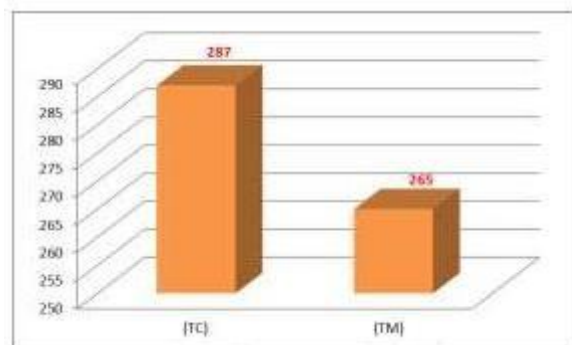


Figure 13 . variation in the number of ears/m² concerning cultivation techniques

The figure above shows that the best stand was obtained in the tilled plots with an average of 287 ears/m², while a slightly lower value was recorded for the SD of 265 ears/m². The analysis of variance shows that there is no significant effect of the cultivation technique on the number of ears/m². In general, the number of ears per unit area is important and reflects the potential of the variety as well as the conditions in which the crop develops and grows. The values obtained are more or less low with the potential of the variety which has a good tillering power and therefore a good ear population. This leads us to think about the cultivation technique used in order to avoid poor root development and, consequently, a low ear stand per unit area.

III.12. The number of grains/epi

The second yield component studied is the number of kernels per year. The figure below illustrates the variation in the number of kernels per ear for the two cultivation techniques, conventional and minimum tillage:

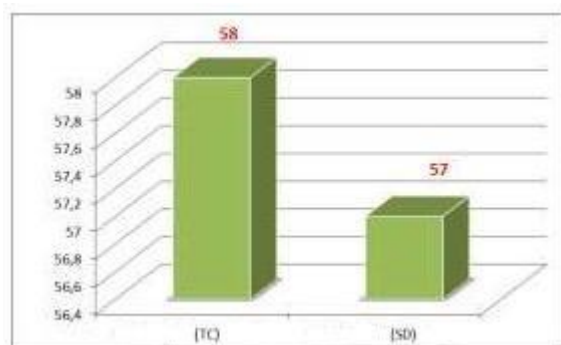


Figure 14. variation in the number of grains per ear according to cultivation techniques

The results show that the number of grains is almost equal for both techniques with a slight advantage for the TC where the average is around 58 grains against 57 grains for the TM plots.

The Student's t-test shows no significant effect of the technique on this parameter,

According to several authors, the expression of the number of grains per ear is linked to the climatic conditions during the period (swelling-heading), the important quantities of rain with average temperatures favor an increase in the number of grains per year. In addition, according to [17]; Any late cold and/or drought associated with early high temperatures at this period can induce sterility of the ear as a result of non-opening of the feathery stigmas. Thus the technique that favors more soil water retention will have an indirect influence on the number of grains per year, and from studies

conducted by [1] previously, it was concluded that the number of grains is related to the cultivation technique, they recorded low values for the technique that consists of surface tillage only. Thus, shallow tillage does not allow the plant to explore the depths properly.

III.13. The weight of a thousand grains

The figure below shows the variation in thousand-grain weight for the two techniques used, i.e. conventional and minimum work:

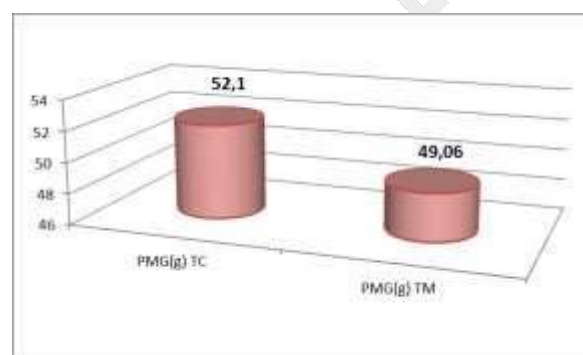


Figure 15. PMG variation in relation to cultivation techniques

From the results obtained, it appears that the thousand kernel weight is slightly better for the conventional work 52.1 g, compared to the minimum work 49.06 g

The Student's t-test shows no significant effect of the technique on the GMP.

III.14. Estimated yield of durum wheat

Yield is the most important and determining parameter for understanding the influence of the factors studied on the crop. All the parameters studied so far suggest that it is more important in CT, and this is what we will see in the following histograms:

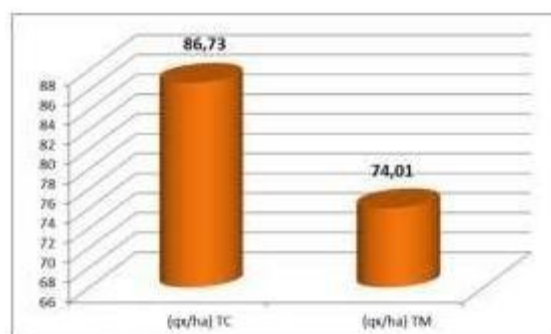


Figure 16. The estimated yield of durum wheat

The figure above shows that the yield obtained in ploughed soils is higher than that of minimum tillage. We record 86.73 qx/ha in CT and 74.01qx/ha in MT with a difference of 12.72qx/ha.

The Student's t-test did not show a significant effect of the technique on the crop yield,

In the light of our results, we conclude that yield is influenced by several parameters, including tillage. According to [7], in rained agriculture, tillage practices represent an alternative for improvement by preserving water in the soil. [10]; [16]; [18]; [6] consider that the availability of water for the crop at the critical stage depends on the water content of the soil at the time of planting and it depends on tillage, with crop residues affecting rainfall storage efficiency. [19] considers that water use efficiency is a component of the crop's resistance to water stress and is a determinant of yield.

However, it should be noted that weed infestation caused yield loss in SD, late herbicide treatment could not limit the yield losses recorded in these plots. [1] Demonstrate a considerable change in weed infestation in no-till plots, a higher density of weeds is recorded on the no-till plots. These are generally perennials with a high colonizing power. In these relatively undisturbed environments, and according to [8] the spring chemical weeding seems particularly favorable for this perennial species. Because of its deep rooting, up to 2 m, it is not (or only slightly) affected by root-active herbicides, which usually act on the surface or in the superficial layers of the soil. In addition, the addition of foliar herbicides reduces the competition that might have been induced by other species. And perhaps the dosage of herbicide used is not effective.

IV. Conclusion

This work has dealt with the pedagogical problems linked to the introduction of simplified cultivation techniques in Algeria and the problem of weed control in direct seeding systems. It has also provided technical references on these systems in a temperate Mediterranean climate for clayey loam soils.

The yields obtained in our work and even in previous works such as those of FEDDAL, 2011, HEMANI, 2013, DELMADJI, 2014 are practically similar between direct seeding and conventional seeding, if not better in conventionally worked plots. This leads us to say that the criterion that must be taken into consideration is soil and groundwater pollution, so an environmental analysis is more than necessary, especially in aquifer areas. An economic study is also necessary to decide which technique to use for durum wheat.

V. References

1. Abdellaoui, Z. ; Teskrat, H.; Belhadj, A.; Zaghouane, O. Étude comparative de l'effet du travail conventionnel, semis direct et travail minimum sur le comportement d'une culture de blé dur dans la zone subhumide. *Options Méditerranéennes*(2011)96 :71-87.
2. Amara, M.; Boudhar, L.; Adli, N.; Feddal, M.A. Evolution de la résistance pénétrométrique du sol en relation avec l'humidité et la porosité, sous l'action des pièces travaillantes d'une chaîne classique de préparation du sol. *Science et technique, Sciences appliquées et Technologies. Burkina Faso.*(2008)Vol. 2, n° 1 et 2 — Janvier-décembre
3. Amara, M.; Feddal, M.A.; Hamani, A. Analyse du comportement du sol sous l'action de trois techniques de mise en place d'un blé dur (*Triticum durum*). Effet sur le développement des racines et conséquences sur le rendement. *Revue « Nature & Technologie ». B-Sciences Agronomiques et Biologiques, n° 12/ Janvier* (2015)130-141.
4. Araus, J.; L. The problem of sustainable water use in the Mediterranean and research requirements for agriculture. *Ann. of applied Biol.* (2004). 144: 229-272.
5. Bajji, M.; Lutts, S. ; Kinet, J.M. Water deficit effects on solute contribution to osmotic adjustment as a function of leaf ageing in three durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars performing differently in arid conditions. *Plant Science.* (2001)160. 669 – 681.
6. Blum, A. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Research.*(2009)112:119-123.
7. Chennafi, H.; Saci, A.; Harkati, N.; Adjabi, A.; Mébarkia, A. L'optimisation du rendement de la culture du blé sous l'effet du précédent cultural et; outil de labour en environnement semi-aride. *Options Méditerranéennes*, (2010) 96 : 213-220.
8. Clavien, Y.; Delabays, N. Inventaire floristique des vignes de Suisse romande: connaître la flore pour mieux la gérer. *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.*, (2006) Vol 38 (6): 335-341 335-341.
9. Feddal, M.A.; Amara, M.; Hamani, A. Behavior of the ground under the action of three techniques of installation of a durum wheat analyzes (*Triticum durum*). Effect on the development of the roots and effects on the output. *Wulfenia journal.* (2015) Vol 22, No. 3.
10. Hannachi, A.; Fellahi Z. Effets des résidus et du travail du sol sur le comportement du blé dur (*triticum durum* Desf.) en milieu semi-aride. *Mémoire ingénieur d'Etat. UFAS*(2010) 82p.
11. Hervieu, B.; Capone, R.; ABIS, S. The challenge posed by the cereals sector in the Mediterranean. *Ciheam analytical note*(2006) N°9: 14.
12. Huwe, B. The rôle of soil tillage for soil structure, In A. El Titi, ed. *Soil Tillage in Agroecosystems. CRC Press LLC, Boca Raton. Improving dryland and agriculture in the Middle East and North Africa. Food Research Institute and the Ford*(2003)27-50
13. Jouve, P.; Daoudi, A. Effets de la date du semis sur l'élaboration du rendement du blé tendre et de l'orge en zones semi-arides et arides (cas du Maroc atlantique). *L'agronomie tropicale* (1984) 39 (3), 216-228.
14. Köller, K. Techniques of Soil Tillage, In A. El Titi, ed. *Soil Tillage in Agroecosystems. CRC Press LLC, Boca Raton* (2003) 1-25.
15. Lal, R.; Reicosky, D.C.; Hanson, J.D. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil and Tillage Research* (2007) 93:1-12.
16. Latrèche, F. Le rendement et l'efficacité d'utilisation de l'eau de la culture de blé dur (*Triticum durum* Desf.)

- sous les effets du précédent cultural et de outil delabour du sol en environnement semi-aride. *Mémoire Magister, Département Agronomie, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, UFAS.* (2011) 83p.
17. Morsli, L. Adaptation du blé dur (triticum durum desf) dans les conditions des hautes plaines constantinoises. *Thèse doctorat. Sciences biologie végétales et amélioration des plantes. Badji Mokhtar. Annaba* (2010)
 18. Nelson, W. Managements for increased wheat production in Algeria. *In improved dryland agriculture in the middle East and the North Africa. Edited by carl Gotsch, Food reaserch institute, Stanford university and the Ford Foundation, Cairo*(1980).
 19. Pala, M.; Harris, H.C.; Ryan,J.; Makboul, R.; Dozom, S. Tillage systems and stubble management in a Mediterranean-type environment in relation to crop yield and soil moisture. *Experimental Agriculture* (2000) 36: 223- 242.
 20. Richard, G.; Mary, B.; Boizard, H.; Roger-Estrade, J.; Chenu, C. Impacts des techniques culturales sans labour sur le fonctionnement des sols cultivés: composantes physique et organique. In: *Techniques culturales sans labour. Paris : éditions CORPEN*(2004).
 21. Slafer, G.A.; Andrade, F.H. Genetic improvement effect on pre- anthesis phenological attributes related to wheat grain yield. *Field Crop Research*(1990) 23, 255-263.
 22. Soane, B.D. Techniques for measuring changes in the packing state and cone resistance of soil after the passage of wheels and tracks. *Jornal Soil Science*(1973) 24 (3): 311-323.
 23. Strudley, M. W.; Green, T. R.; Ascough J. C. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time : State of the science. *Soil and Tillage Research*,(2008) 99(1): 4-48.
 24. Tebrügge, F.; Düring R.A.Reducing tillage intensity -- a review of results from a long-term study in Germany. *Soil and Tillage Research*(1999) 53:15-28.
 25. Van Damme, P.L. Adaptation to drought stress in plants. *Med. Fac. Laud bouw. Rijks Univ. Gent.* (1990) 55: 121-126.

Please cite this Article as:

Mebarki M.N., Feddal M.A., Feddal Taibi S., Analysis of the physical and mechanical behaviour of uncompacted soils under the action of cultivation techniques and consequences on cereal development: case of durum wheat., *Algerian J. Env. Sc. Technology*, 2021.