

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة الحراش - الجزائر

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE AGRONOMIQUE El-Harrach –ALGER-

## Thèse

En vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat 3<sup>ème</sup> cycle LMD.

Département : Génie rural.

Spécialité : Eau, Sol et Agroéquipements.

## Sujet

**«Effet des techniques culturales sur le développement  
des racines et conséquences sur le rendement des  
cultures»**

Présenté par Melle : BENTAHAR Djamila

Soutenue le : 14 / 07 /2019

### Devant le Jury :

Président : FEDDAL Mohamed Amine (MCA - ENSA-El-Harrach)

Directeur de thèse : AMARA Mahfoud (professeur- ENSA-El Harrach)

Examineurs : CHABACA Mohamed Nacer (Professeur – ENSA-El Harrach)

BEHIDJ Nassima (Professeur – Université M' Hamed Bougara Boumerdès)

FEKKOUN Soumiya (MCA – Université M' Hamed Bougara Boumerdès)

Promotion : 2018-2019

# REMERCIEMENTS

*A l'issue de ce travail, je tiens à remercier tout d'abord notre bon DIEU le Tout Miséricordieux, de m'avoir donné le courage et la santé pour achever ce travail.*

*Je voudrais remercier très chaleureusement Mr AMARA Mahfoud, mon promoteur, pour le temps qu'il a consacré pour moi et précieux conseils qu'il a pu me donner pour l'orientation scientifique de ce travail*

*Je tiens à remercier Monsieur FEDDAL Mohamed Amine, Maître de Conférences Classe A à l'ENSA, pour ses encouragements, son soutien et pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.*

*Je prie Monsieur CHABACA Mohamed Nacer, Professeur à l'ENSA de trouver, ici, l'expression de ma considération et de ma sympathie pour avoir accepté d'être membre du jury.*

*Je remercie Madame BEHDJ Nassima, professeur à l'Université M' Hamed Bougara Boumerdès, de m'avoir fait l'honneur d'accepter être membre du jury.*

*Je remercie aussi Madame FEKKOUN Soumiya, Maître de Conférences à l'Université M' Hamed Bougara Boumerdès, de m'avoir fait l'honneur d'accepter être membre du jury.*

*J'exprime ma gratitude à l'ensemble du personnel de la station expérimentale de l'ITGC- Oued Smar pour leur gentillesse, disponibilité et leur aide.*

*Ces travaux doivent aussi beaucoup au labeur d'étudiants en particulier DELMADJ Assam, ZENKHRJ mahdi, BENSEBTJ Hana Anfal Oum saad, ZIBANJ Mohamed Nadjib, YACHJ Abdelouahid et BELKACEMJ Amina qui ont bien voulu, pour un temps, partager avec moi ce parcours de recherche.*

*Aux bibliothécaires de L'institut Technique des Grandes Cultures*

*Merci à BOUGHANEM Wassila, qui m'a soutenue et encouragée tout au long de ce travail, et bien plus encore.*

*Une mention particulière est adressée à Mr Houassine D. pour ses conseils ses orientations et l'aide très précieuse qu'il m'a apporté.*

*À toutes les Personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

# DEDICACE

*Je dédie ce travail :*

*A ma très chère mère*

*Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.*

*A mon père*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi.*

*A mes chers frères YUCEF, MOUSSA, AREZKI, NADIR,*

*Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.*

*A mes tantes ZOUHRA, NADIA et FATIMA et mon oncle MOHAMED*

*Vous avez toujours été présents pour les bons conseils. Votre affection et votre soutien m'ont été d'un grand secours au long de ma vie professionnelle et personnelle.*

*A tous les membres de ma famille, petits et grands, veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon affection*

*A mon amie et ma sœur Boughanem Wassila, un remerciement particulier et sincère pour tous tes efforts fournis, tu as toujours été présente.*

*A*

*Forma Fatmazahra, Fahas Amine, Oubellil Yasmine Anissa, Attabi Sarah, Zakari, Mehde.*

*Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des frères, sœurs et des amis sur qui je peux compter.*

*Djamila*

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Classement des systèmes de cultures .....	12
Tableau 2 : Les ressources fourragères en Algérie .....	14
Tableau 3 : Incidence des pâturages sauvages dans la rotation bersim-blé.....	34
Tableau 4: Caractérisation de l'enracinement d'un plan de blé au tallage dans trois sols de textures différentes. ...	49
Tableau 5 : Effet de labour à la charrue et le non-travail sur le poids des racines (g/dm <sup>3</sup> ) des principales cultures annuelles du Sénégal. ....	59
Tableau 6 : Valeurs moyennes de la densité et des diamètres des racines dans le sol pour chaque technique. ....	57
Tableau 7: Le temps et la consommation du carburant pour les différents types de sol et des itinéraires techniques.....	70
Tableau 8: La consommation de fuel (L/ha) et le temps de travail (min/ha) hors récolte pour la mise en place d'une céréale (Blé dur) .....	70
Tableau 9 : Analyse granulométrique du sol au niveau de la parcelle de l'ENSA .....	76
Tableau 10 : Analyse granulométrique du sol au niveau de la parcelle de l'ITGC D'Oued Smar. ....	77
Tableau 11 : Conditions climatiques de la campagne 2013/2014.....	78
Tableau 12 : Conditions climatiques des campagnes 2014/2015 et 2015/2016 .....	79
Tableau 13 : Dates et doses des apports en fertilisant.....	81
Tableau 14: Les différentes cultures utilisées lors de l'expérimentation .....	83
Tableau 15: Résultats de l'étalonnage .....	93
Tableau 16 : Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95% ( nombre de pieds levée/m <sup>2</sup> -sorgho fourrager) .....	112
Tableau 17: Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95% ( nombre de plants levée/m <sup>2</sup> -blé dur).....	114
Tableau 18: Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95% ( nombre de plants levée/m <sup>2</sup> de Bersim)...	115
Tableau 19 : Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95% (hauteur et diamètre des tiges-sorgho fourrager) .....	117
Tableau 20: Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95% ( hauteur de la partie aérienne -Bersim) ...	119
Tableau 21: Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95% (longueur des racines-sorgho fourrager).122	
Tableau 22: Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95% (Diamètre des racines-sorgho fourrager).123	
Tableau 23: Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95% (Densité racinaire-sorgho fourrager) .....	123
Tableau 24: Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95% (longueur et diamètre de la racine principale, la densité racinaire du blé dur).....	126
Tableau 25: Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95% ( densité racinaire-Bersim).....	128
Tableau 26 : Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95% (Rendement en vert et sèche de sorgho fourrager) .....	129

Tableau 27: Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95% (rendement du blé dur et ses composantes).....	131
Tableau 28: Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95%( rendement -Bersim) .....	134
Tableau 29 : Les différents paramètres utilisés pour établir les modèles .....	171
Tableau 30: Nombre de p termes pour chaque culture.....	171
Tableau 31: Tableau comparatif entre le rendement mesuré et le rendement calculé en fonction de la technique culturale pour la culture de sorgho .....	173
Tableau 32: Tableau comparatif entre le rendement mesuré et le rendement calculé en fonction de la technique culturale pour la culture de bersim .....	174
Tableau 33: Tableau comparatif entre le rendement mesuré et le rendement calculé en fonction de la technique culturale pour la culture du blé .....	178

## Liste des figures

Figure 1 : Formation d'ornières sous le poids d'un engin ayant circulé sur un sol trop humide. ....	37
Figure 2 : Le tassement de surface avec ornière, la semelle de labour, et le tassement du sous-sol. ....	38
Figure 3 : Racines déformées en «pieds de poule» se développant à angle droit en évitant des zones compactes, ou en «arête de poisson» le long d'une face lisse, occasionnant une exploration seulement partielle du sol. ....	39
Figure 4 : Représentation schématique des processus impliqués dans le devenir des produits phytosanitaires dans les sols. ....	40
Figure 5 : Le méristème apical racinaire. ....	43
Figure 6 : Les différents types de racines. ....	45
Figure 7 : Production comparative de matière sèche de racines selon la texture et le pouvoir alimentaire du sol. ....	49
Figure 8 : Plants de maïs provenant d'une zone de compaction, à gauche, présentent 77 % moins de racines que les plants non affectés. ....	55
Figure 9: Relations entre développement racinaire et rendement de différentes cultures au Sénégal. ....	58
Figure 10 : Sous-soleuse. ....	61
Figure 11: Charrue à versoir (vert) et charrue à disques (orange). ....	61
Figure 12: Outils de pseudo-labour. ....	62
Figure 13: Matériels de travail superficiel. ....	63
Figure 14: Semoir en ligne conventionnel. ....	63
Figure 15 : Coutre. ....	64
Figure 16: Ouvre Sillon. ....	64
Figure 17: Roue tasseuse. ....	65
Figure 18 : Distribution mécanique des graines au niveau d'un semoir. ....	65
Figure 19: Système de distribution pneumatique. ....	66
Figure 20: Semoir du semis direct. ....	66
Figure 21: Semoir « BOUDOUR » de CMA-SOLA. ....	67
Figure 22: Semoir de semis direct Ets Refoufi. ....	67
Figure 23: Situation géographique de l'institut technique des grandes cultures(ITGC) Oued Smar. ....	75
Figure 24: Situation géographique de la parcelle expérimentale de l'ENSA. ....	75
Figure 25: Endroits des échantillons sur la micro parcelle. ....	76
Figure 26: Triangle USDA de texture du sol (ENSA). ....	76
Figure 27: Triangle USDA de texture du sol (ITGC). ....	77
Figure 28 : Conditions climatiques de la campagne 2013/2014. ....	78
Figure 29 : Conditions climatiques des deux campagnes 2014/2015 et 2015/2016. ....	79
Figure 30 : Schéma de dispositif expérimental. ....	80

Figure 31: Photos des différentes variétés cultivées .....	83
Figure 32: Tracteur C6807.....	84
Figure 33 : Tracteur C6006 .....	84
Figure 34 : Tracteur Agrolux 80.....	84
Figure 35: Tracteur C 4006. ....	85
Figure 36: Charrue bisocs.....	85
Figure 37 : Cover-crop .....	85
Figure 38 : Cultivateur canadien. ....	86
Figure 39 : Rouleau croskill. ....	86
Figure 40 : Charrue bisocs.....	86
Figure 41 : Vibroculteur. ....	87
Figure 42 : Semoir classique. ....	87
Figure 43: Semoir du semis direct SEMEATO SHM 11/13.....	87
Figure 44: Semoir de semis direct .....	88
Figure 45: Pulvérisateur. ....	88
Figure 46: Asperseur C30.....	88
Figure 47: Faucheuse alternative.....	89
Figure 48: Cylindre .....	89
Figure 49 : Balance électronique .....	89
Figure 50 : Pénétrromètre. ....	90
Figure 51: Pieds à coulisse .....	90
Figure 52: Etalonnage d'un pénétrromètre.....	93
Figure 53: Droite d'étalonnage.....	94
Figure 54: Les étapes de la technique de carottage .....	95
Figure 55: Evolution de la teneur en eau du sol dans le temps en % .....	97
Figure 56: Variation de la teneur en eau du sol en fonction de la technique et de la profondeur en % cas du sorgho fourrager.....	98
Figure 57: Evolution de la teneur en eau du sol dans le temps en % .....	99
Figure 58: Variation de la teneur en eau du sol en fonction de la technique et de la profondeur en % cas du blé dur. ....	100
Figure 59: Evolution de la teneur en eau du sol dans le temps en % .....	101
Figure 60: Variation de la teneur en eau du sol en fonction de la technique et de la profondeur en % cas du bersim.....	102
Figure 61: Evolution de la porosité du sol dans le temps en % .....	103
Figure 62: Variation de la porosité du sol en fonction de la technique et de la profondeur en % cas du sorgho fourrager.....	104
Figure 63: Evolution de la porosité du sol dans le temps en % .....	105

Figure 64: Variation de la porosité du sol en fonction de la technique et de la profondeur en % cas du blé dur.	105
Figure 65: Evolution de la porosité du sol dans le temps en % .....	106
Figure 66: Variation de la porosité du sol en fonction de la technique et de la profondeur en % cas du bersim..	107
Figure 67: Variation de la résistance pénétrométrique du sol (daN/cm <sup>2</sup> ) en fonction de la technique, cas du sorgho fourrager.....	108
Figure 68: Variation de la résistance pénétrométrique du sol (daN/cm <sup>2</sup> ) en fonction de la technique, cas du blé dur. ....	109
Figure 69: Variation de la résistance pénétrométrique du sol (daN/cm <sup>2</sup> ) en fonction de la technique, cas du bersim.....	110
Figure 70: Taux de levée du sorgho fourrager en fonction de la technique et la dose de semis en %.....	112
Figure 71:Taux de levée du blé dur en fonction de la technique et la dose de semis en %.....	113
Figure 72: Taux de levée du bersim en fonction de la technique et la dose de semis en %.....	115
Figure 73: Hauteur des tiges du sorgho fourrager en fonction de la technique et de la dose de semis.....	116
Figure 74: Diamètre des tiges du sorgho fourrager en fonction de la technique et de la dose de semis.....	116
Figure75: Evolution de la hauteur de la partie aérienne du bersim en fonction de la dose et la technique culturale.....	118
Figure 76: Evolution de la longueur de la racine principale du sorgho fourrager en fonction de la dose de semis et le stade végétatif.....	120
Figure 77: Evolution de diamètre de la racine principale du sorgho fourrager en fonction de la dose de semis et le stade végétatif.....	120
Figure 78: Densité racinaire de la culture du sorgho fourrager en fonction de la dose de semis et le stade végétatif.....	121
Figure79: Evolution de la longueur de la racine principale du blé dur en fonction de la dose de semis et de la technique au stade épiaison. ....	124
Figure 80: Evolution de diamètre de la racine principale du blé dur en fonction de la dose de semis et la technique au stade épiaison.....	125
Figure 81: Densité racinaire de la culture du blé dur en fonction de la dose de semis et de la technique au stade épiaison. ....	125
Figure 82: Densité racinaire de la culture de bersim en fonction de la dose de semis et de la technique.....	127
Figure 83: Estimation des rendements en matière vert et sèche du sorgho fourrager en fonction de la dose de semis et de la technique culturale .....	128
Figure 84: Evolution des composantes de rendement de blé dur en fonction de la technique et de la dose de semis .....	130
Figure 85: Evolution de rendement théorique du blé dur en fonction de la technique et de la dose de semis.....	130
Figure 86: Rendement en matière verte du bersim en fonction de la technique culturale et la dose de semis.....	132
Figure 87: Rendement en matière sèche du bersim en fonction de la technique culturale et la dose de semis.....	133

## Liste des abréviations

**Cste** : Constante de régression

**D<sub>tige</sub>** : Diamètre des tiges

**D1** : Dose faible.

**D2** : Dose élevée.

**Dr** : Densité racinaire

**Ds** : Dose de semis

**g** : Accélération terrestre

**H (%)** : Taux d'humidité.

**H<sub>tiges</sub>** : Hauteur des tiges

**H, H<sub>p.a</sub>** : Hauteur de la partie aérienne

**K** : Coefficient de tallage.

**M.S** : Matière sèche.

**M.V** : Matière verte.

**Nbr<sub>grains/épi</sub>, Gr** : Nombre de grains par m<sup>2</sup>

**Nbr<sub>épis/m<sup>2</sup></sub>** : Nombre d'épis par m<sup>2</sup>

**Nbr<sub>plants/m<sup>2</sup></sub>** : Nombre de plants par m<sup>2</sup>

**P** : Porosité du sol

**Pr** : Probabilité.

**Ph** : Poids humide.

**PMG** : Poids de mille grains

**PS** : Poids sec.

**r** : Coefficient de corrélation.

**R<sup>2</sup>** : Coefficient de détermination.

**RDT** : Rendement en q/ha

**Rp** : Résistance pénétrométrique

**SD** : Semis direct

**TC** : Technique conventionnelle

**TG** : Taux de germination.

# Sommaire

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

## *Synthèse bibliographique*

### **Chapitre 1 : La céréaliculture en Algérie et dans le monde**

Introduction.....	4
1.1.Problématique de la céréaliculture en Algérie .....	4
1.2.Principales zones céréalières en Algérie.....	5
1.3.Les contraintes environnementales de production de Blé en Algérie.....	5
1.3.1. Contraintes climatiques .....	5
1.3.1.1.Précipitations .....	6
1.3.1.2.Températures .....	6
1.3.1.3.Vents.....	7
1.3.2.Contraintes techniques.....	7
1.4.Place et importance de blé dur dans l'agriculture mondiale et algérienne .....	8
Conclusion .....	10

### **Chapitre 2 : Les cultures fourragères en Algérie**

Introduction.....	11
2.1.Système de culture en Algérie .....	11
2.1.1.Caractéristiques des systèmes de production en Algérie.....	12
2.2.Principales zones de production des fourrages en Algérie.....	12
2.3.Principales contraintes à la production des fourrages en Algérie.....	13
2.4.Les ressources fourragères .....	13
2.5.Généralités sur les cultures étudiées .....	14
2.5.1.Sorgho Fourrager.....	14
2.5.1.1.Place du sorgho dans l'agriculture mondiale et algérienne .....	14
2.5.1.2.Utilisation et intérêt de la culture.....	15
2.5.1.3.Mode d'exploitation du sorgho fourrager .....	16
2.5.1.4.Le sorgho dans la rotation .....	16
2.5.2.Bersim ou trèfle d'Alexandrie.....	16
2.5.2.1.Utilisation et intérêt de la culture.....	17
2.5.2.2.Caractéristiques générales des trèfles d'Alexandrie.....	17
2.5.2.3.Mode d'exploitation du bersim .....	18
2.5.2.4.Le bersim dans la rotation avec les céréales .....	18
Conclusion.....	19

### **Chapitre 3 : Les techniques culturales et leurs effets sur l'état du sol**

Introduction.....	20
3.1.Les itinéraires techniques de la mise en place d'une culture .....	20
3.1.1.La notion d'itinéraire technique .....	20
3.1.2.Le choix des itinéraires de la mise en place de la culture .....	20
3.1.3.Classification des itinéraires techniques .....	21
3.1.3.1.Classification des itinéraires techniques en relation avec la profondeur de travail du sol.....	21

3.1.3.2. Classification des itinéraires par leurs objectifs.....	22
3.1.3.2.1. Les systèmes conventionnels (labours).....	22
3.1.3.2.2. Technique culturale simplifiée, Travail simplifié, Technique sans labour.....	23
3.1.3.2.3. Agriculture de Conservation.....	24
3.2. Problématique de l'introduction du semis direct en Algérie.....	24
3.3. Impact des techniques culturales sur l'état structural du sol et l'environnement.....	25
3.3.1. Effet sur les propriétés physiques du sol.....	25
3.3.1.1. Structure du sol.....	25
3.3.1.2. La perméabilité du sol.....	26
3.3.1.3. Masse volumique et porosité du sol.....	26
3.3.1.4. La conservation de l'eau.....	28
3.3.2. Effet de la technique culturale sur les propriétés chimiques du sol.....	28
3.3.2.1. Teneurs et stocks en Carbone (C) et azote (N) totaux.....	28
3.3.2.2. Azote minérale.....	29
3.3.2.3. Phosphore.....	30
3.3.2.4. Autres éléments minéraux.....	30
3.3.3. Effet des techniques culturales sur les propriétés biologiques.....	31
3.3.3.1. La matière organique du sol.....	31
3.3.4. Influence des techniques culturales sur les mauvaises herbes.....	33
3.3.5. Effet des techniques culturales sur les propriétés mécaniques du sol.....	35
Conclusion.....	41

#### **Chapitre 4 : Etude et analyse des relations sol, racines et plante.**

Introduction.....	42
4.1. Quelques aspects de la morphologie des racines.....	42
4.1.1. Structure d'une racine.....	42
4.1.2. La coiffe racinaire.....	42
4.1.3. Méristème apical.....	42
4.1.4. Zone d'élongation.....	43
4.1.5. Zone pilifère.....	43
4.1.6. Zone de maturité.....	43
4.2. Croissance racinaire.....	44
4.3. Les fonctions externes et internes de la racine.....	44
4.4. Classification des racines.....	44
4.4.1. Selon l'importance de la racine principale.....	44
4.4.2. Selon la durée de vie.....	45
4.5. Relations entre la plante, le sol et les micro-organismes.....	45
4.6. Méthodes d'étude des systèmes racinaires.....	46
4.7. Méthodes descriptives.....	46
4.7.1. Etude du profil cultural.....	46
4.7.2. Méthode des profils racinaires.....	47
4.8. Méthodes quantitatives.....	47
4.8.1. Prélèvements de blocs de sol.....	47
4.8.2. Méthode des sondages.....	48
4.9. Effets des facteurs environnementaux sur le développement racinaire.....	48
4.9.1. Les facteurs physiques.....	48
4.9.2. Les facteurs chimiques.....	53

4.9.3.Les facteurs mécaniques.....	54
4.9. Impacts des différentes techniques culturales sur le développement des racines.....	55
4.10.L'effet de la densité racinaire sur le développement de la culture.....	57
4.11.Effets des techniques culturales sur le rendement et ses composantes.....	58
Conclusion.....	59

### **Chapitre 5 : Moyens matériels utilisés pour la mise en place des cultures.**

Introduction.....	60
5.1.Technique conventionnelle.....	60
5.1.1.Le travail profond avec charrue.....	60
5.1.2.Le Pseudo-labour avec les outils à disques et à dents.....	62
5.1.3.Le travail superficiel.....	62
5.1.4.Le semis.....	63
5.2.Système du semis direct.....	64
5.2.1.Elément de préparation de la ligne de semis (coutre).....	64
5.2.2.Elément de mise en place (ouvre sillon).....	64
5.2.3.Elément de fermeture de sillon (roue tasseuse).....	65
5.2.4.Eléments de distribution.....	65
Conclusion.....	68

### **Chapitre 6 : Synthèse de quelques résultats des travaux relatifs aux effets des techniques culturales sur l'état du sol et les conséquences sur le rendement des cultures.**

Introduction.....	67
6.1.Etude économique comparative des techniques culturales.....	69
6.1.1.Travaux de Barthélémy (1992).....	69
6.2.Travaux de Frédéric (2005).....	70
Conclusion.....	71
Conclusion bibliographique.....	72

## ***Démarche expérimentale***

### **Chapitre 7 : Sites d'études et protocole expérimental.**

Introduction et objectifs de l'expérimentation.....	74
7.1.Présentation des sites de suivis.....	74
7.2.Caractéristiques pédologiques des parcelles.....	75
7.2.1.L'analyse granulométrique du sol.....	75
7.3.Conditions climatiques des campagnes d'essais.....	77
7.4.Protocole expérimental.....	79
7.4.1.Dispositif expérimental.....	79
7.4.2.Facteurs étudiés et leur niveaux.....	80
7.5.Conduite et suivi des essais expérimentaux.....	80
7.5.1.La campagne agricole 2013/2014 : 1 <sup>ère</sup> année.....	80
7.5.2.La campagne agricole 2014/2015 : 2 <sup>ème</sup> année.....	81
7.5.3.La campagne agricole 2015/2016 : 3 <sup>ème</sup> année.....	81

## Chapitre 8 : Matériels et Méthodes

8.1.Moyens matériels .....	83
8.1.1.Matériel végétal.....	83
8.1.2.Matériel de travail .....	84
8.1.3.Les outils de préparation du sol .....	85
8.1.4.Matériels de semis .....	87
8.1.5.Matériel de la lutte chimique .....	88
8.1.6.Matériel d'irrigation .....	89
8.1.7.Matériel de récolte.....	89
8.1.8.Matériels de mesure.....	89
8.2.Méthodologie expérimentale .....	90
8.2.1.Méthodologie de réglage pour le matériel de semis .....	90
8.2.2.Méthodologie des mesures liées au sol.....	91
8.2.3.Méthodologie des mesures liées à la culture.....	94
8.3.Méthodologie de mesure liée au rendement et ses composantes.....	96

### *Résultats et discussion*

## Chapitre 9 : Analyse de l'effet des techniques culturales sur l'état structural du sol

Introduction.....	97
9.1.Effet des techniques culturales sur la teneur en eau du sol .....	97
9.1.1.Cas de la culture du sorgho fourrager .....	97
9.1.2.Cas de la culture du blé dur .....	99
9.1.3.Cas de la culture du bersim .....	101
9.2.1.Cas de la culture du sorgho fourrager .....	103
9.2.2.Cas de la culture du blé dur .....	105
9.2.3.Cas de la culture du bersim .....	106
9.3.Effet des techniques sur la résistance pénétrométrique.....	107
9.3.1.Cas de la culture du sorgho fourrager.....	108
9.3.2.Cas de la culture du blé dur .....	109
9.3.3.Cas de la culture du bersim .....	109
Conclusion .....	110

## Chapitre 10 : Analyse de l'effet des techniques culturales sur paramètres caractéristiques des cultures

Introduction.....	111
10.1.Effet des techniques culturales sur la levée de cultures .....	111
10.1.1.Taux de levée en fonction de la technique et de la dose de semis.....	111
10.2.Effet des techniques sur la partie aérienne de cultures.....	116
10.2.1.Cas de la culture du sorgho fourrager .....	116
10.2.2.Cas de la culture du bersim.....	118
10.3.Effet des techniques sur la partie souterraine de cultures .....	120
10.3.1.Longueur et diamètre de la racine principale, densité racinaire en fonction de la dose de semis et le stade végétatif.....	120
10.4.Effet des techniques sur le rendement de cultures .....	128
10.4.1.Cas de la culture du sorgho fourrager .....	128

10.4.2.Cas de la culture du blé dur .....	129
10.4.3.Cas de la culture du bersim.....	132
Conclusion .....	135

## **Chapitre 11 : Analyse des corrélations entre les différents paramètres liés au sol et la culture.**

Introduction .....	136
11.1.Analyse de l'interaction entre l'humidité, la porosité et la résistance pénétrométrique .....	136
11.1.1.Effet de l'humidité sur la résistance pénétrométrique.....	136
11.1.2.Effet de la porosité sur la résistance pénétrométrique.....	137
11.1.3.Effet combiné de l'humidité et la porosité sur la résistance pénétrométrique .....	138
11.2.Analyse de l'effet des techniques culturales sur les paramètres liés au sol.....	139
11.2.1.La corrélation entre Rp (TC) et Rp (SD) .....	139
11.2.2.La corrélation entre H (TC) et H (SD).....	139
11.2.3.La corrélation entre P (TC) et P (SD).....	140
11.3.Analyse de l'interaction entre la partie souterraine, la partie aérienne et le rendement. ....	141
11.3.1.Effet de la densité racinaire sur le nombre de plants/m <sup>2</sup> .....	141
11.3.2.Effet de la densité racinaire sur la hauteur des tiges du sorgho.....	142
11.3.3.Effet de la densité racinaire sur le diamètre des tiges du sorgho.....	143
11.3.4.Effet de la densité racinaire sur le nombre d'épis/m <sup>2</sup> du blé dur.....	143
11.3.5.Effet de la densité racinaire sur le poids de mille grains du blé dur.....	144
11.3.6.Effet de la densité racinaire sur la hauteur de la partie aérienne du bersim.....	144
11.3.7.Effet de nombre de plants/m <sup>2</sup> sur le rendement .....	145
11.3.8.Effet de nombre d'épis/m <sup>2</sup> sur le rendement du blé .....	147
11.3.9.Effet de nombre de grains/épi sur le rendement du blé.....	147
11.3.10.Effet de poids de mille grains sur le rendement du blé .....	148
11.3.11.Effet de la densité racinaire sur le rendement .....	148
11.3.12.Effet combiné de la partie souterraine, la partie aérienne sur le rendement .....	149
11.4.Analyse de l'effet des techniques culturales sur les paramètres liés à la culture.....	152
11.4.1.La corrélation entre Nbr plants/m <sup>2</sup> (TC) et Nbr plants/m <sup>2</sup> (SD).....	152
11.4.2.La corrélation entre H tiges (TC) et H tiges (SD) du sorgho .....	153
11.4.3.La corrélation entre D tige (TC) et D tige (SD) du sorgho .....	153
11.4.4.La corrélation entre H p.a (TC) et H p.a (SD) du bersim.....	154
11.4.5.La corrélation entre Nbr épis/m <sup>2</sup> (TC) et Nbr épis/m <sup>2</sup> (SD) du blé .....	155
11.4.6.La corrélation entre Nbr grains/épi (TC) et Nbr grains/épi (SD) du blé.....	155
11.4.7.La corrélation entre PMG (TC) et PMG (SD) du blé.....	156
11.4.8.La corrélation entre Dr (TC) et Dr (SD) .....	157
11.4.9.La corrélation entre RDT (TC) et RDT (SD).....	158
11.5.Analyse de l'interaction entre les propriétés du sol, la densité racinaire et le rendement. ....	159
11.5.1.Effet combiné de la résistance pénétrométrique, l'humidité et la porosité sur la densité racinaire.....	159
11.5.2.Effet combiné de l'humidité, la porosité et la résistance pénétrométrique sur le rendement..	162
11.6.Analyse de l'effet combiné de tous les paramètres sur le rendement.....	164
Conclusion.....	168

## **Chapitre 12 : Modélisation du rendement des cultures.**

Introduction.....	170
-------------------	-----

12.1.Modélisation du rendement des cultures .....	170
12.1.1.Caractéristique des modèles .....	171
12.1.2.Nombre de p termes (théorème de Buckingham) .....	171
12.1.3.Vérification du modèle .....	172
12.1.4.Correction des modèles .....	174
Conclusion.....	179
Conclusion générale.....	180
Références bibliographiques.....	185
Annexes	
Résumé	

*Introduction*  
*Générale*

## Introduction générale

Les bouleversements climatiques constatés au siècle dernier se confirment amplement en ce début du 21<sup>ème</sup> siècle, avec les mêmes répercussions sur les productions agricoles et sur les équilibres de leurs marchés. La croissance continue de la population mondiale, qui dépasse désormais les 7 milliards d'individus, conjuguée à la mutation rapide des modes de consommation et des besoins des pays émergents, engendrent une hausse considérable de la consommation de viandes, de céréales et de produits laitiers. Ce qui a induit une crise majeure de l'offre, aggravée encore par le développement des biocarburants.

Selon le Centre national de l'information et des statistiques des Douanes, la facture d'importation algérienne des céréales, semoule et farine a atteint les 253,13 millions de dollars en janvier 2018 contre 240,61 millions de dollars durant la même période de 2017, soit une hausse de 5,2%. Même tendance pour le lait et produits laitiers qui ont été importés pour 153,63 millions de dollars en janvier 2018 contre 145,23 millions de dollars en janvier 2017 (+5,8%). Ainsi, les viandes ont été importées pour un montant de 6,7 millions de dollars. (CNIS, 2018).

Donc, l'insuffisance de la production agricole algérienne, couplée à une demande massive et croissante de produits agroalimentaires, fait de l'Algérie un pays structurellement importateur (75% de ses besoins assurés par les importations). (CNIS, 2018).

Cependant d'après les statistiques, les rendements sont faibles à cause de plusieurs facteurs d'ordre climatiques, génétiques, techniques et biologiques. Parmi tous ces facteurs hormis les facteurs climatiques, l'homme peut intervenir pour améliorer la production de cultures cultivées.

Selon **Amara et al., 2014**, la céréaliculture algérienne enregistre ces baisses de rendement à cause d'une maîtrise insuffisante de l'un des principaux facteurs de production à savoir la mécanisation des différentes étapes de l'itinéraire technique. Selon les mêmes auteurs, bien que considérée comme relativement développée, la mécanisation de la céréaliculture algérienne ne répond que partiellement aux conditions édaphiques et climatiques.

La mécanisation représente un moyen primordial dans le développement et l'amélioration des productions végétales et animales. Pour cela la mécanisation des techniques de travail du sol à travers les siècles a beaucoup apporté à l'agriculture tant sur le plan qualité de travail du sol que sur le niveau des rendements.

La pratique du labour profond est la technique de travail du sol la plus répandue en Algérie et dans le monde. Cette pratique a permis, dès l'introduction de la charrue à soc et du tracteur, d'augmenter les rendements, grâce à son action sur le développement des adventices, car elle assure un bon enfouissement des résidus de récoltes, elle met à la disposition de la culture une couche arable plus conséquente, elle assure également une rapide minéralisation de la matière organique et permet une bonne infiltration de l'eau du sol.

Ces dernières décennies, avec le progrès des techniques agricoles, on assiste à une évolution des méthodes du travail du sol qui vise à supprimer entièrement le labour ou à diminuer son intensité, c'est les techniques dites simplifiées sans labour jusqu'au semis direct.

D'après (**Attah. Boame, 2005**) Comparativement aux autres pratiques de travail du sol, le semis direct procure plusieurs avantages économiques, environnementaux et agronomiques. Il permet de protéger les sols, augmenter le taux de matière organique et de freiner le ruissellement (tout en accroissant l'infiltration d'eau). Les matières organiques des résidus aident à retenir l'humidité, à réduire l'évaporation et à prévenir l'assèchement du sol. Là où l'humidité constitue un facteur restrictif, le semis direct permet aussi de limiter la déshumidification et améliore donc la production. Plus on travaille le sol, plus on perd de matières organiques. Celles-ci jouent un grand rôle dans l'activité biologique bienfaisante comme celle des bactéries, des champignons et des vers qui interviennent dans le cycle nutritif et accélèrent la décomposition des pesticides. Les matières organiques du sol jouent aussi un rôle dans les changements climatiques, puisqu'elles emmagasinent le carbone.

Selon **Belaid, 2014**, Le Semis direct est avant tout un Système d'exploitation qui repose sur la rotation des cultures en produisant le maximum de biomasse (Feuilles et racines) dont le seul but est d'aider au bon fonctionnement du sol de par une vie microbienne plus active. L'Alternance graminées, légumineuses, oléagineux et cultures fourragères limite la propagation des champignons et des semences de mauvaises herbes mal contrôlées dans la culture précédente restée sur le sol. Selon le même auteur, face à l'envolée des cours des engrais azotés, les légumineuses permettent de réduire les charges des cultures suivantes par les reliquats azotés. Les exploitations qui ont un élevage ovin et/ou bovin peuvent plus facilement valoriser le sorgho et la gamme de légumineuses avec des plantes comme le sulla, le bersim, la luzerne, etc...

L'introduction des techniques culturales simplifiées en Algérie reste timide, elle est à son stade expérimentale, on enregistre actuellement une introduction du système semis direct dans les régions de Sétif, Oum El Bouaghi, Guelma ou Annaba, se sont déjà convertis à cette nouvelle pratique. On compte déjà une vingtaine de semoirs de semis direct sur le terrain, près de 7000 hectares sont concernés.

Actuellement, la plus grande part des travaux réalisés déjà en Algérie dans ce contexte concerne les aspects phyto-techniques (rendements, contrôle des résidus et contrôle des mauvaises herbes). Mais, très peu se sont intéressées à l'impact qu'auront ces techniques sur les propriétés physico-mécaniques du sol et les conséquences sur le développement racinaire ainsi que sur le rendement.

Les racines jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement et donc dans la production des plantes. C'est grâce à elles que se fait l'approvisionnement en eau et en éléments minéraux de celle-ci. Mais il existe aussi d'autres fonctions: ancrage sur le substrat, réserves en assimilats, métabolisme. Les racines contribuent en particulier aux équilibres hormonaux qui contrôlent la croissance et le fonctionnement de la plante. Elles constituent également une source de matière organique pour le sol; c'est même parfois la seule restitution régulière dans beaucoup de systèmes de culture en zone tropicale. Il est donc important pour la production de la culture, mais aussi pour le maintien de la fertilité du sol, d'avoir un système racinaire bien développé, notamment en profondeur. (**BOUKERKER, 2016**)

Les façons culturales ont une influence profonde et certaine sur la forme et le développement des racines ; car elles touchent de nombreux aspects de l'environnement racinaire, à savoir : l'humidité et la température du sol, l'espace entre les pores, la concentration en oxygène, la répartition des matières organiques, la mobilisation des substances nutritives et la configuration physique des sols en surface. (**Amara et al., 2014**)

Un des rôles essentiels 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. Le bon développement racinaire des cultures est le garant non seulement de leur productivité mais surtout de leur tolérance aux aléas climatiques. (Maertens et Al, In Chopart, 2001).

Donc, les choix en matière de travail du sol, au niveau de l'exploitation, doivent entre autre, tenir compte de l'effet qu'aura ou non le travail sur les racines, grâce auxquelles se fera l'alimentation en eau et en éléments minéraux durant tout le cycle de développement de la plante.

Et c'est dans ce contexte que nous avons voulu apporter notre contribution à savoir l'analyse du comportement du sol sous l'action de deux techniques culturales (travail conventionnel et semis direct) pour la mise en place de cultures (deux cultures fourragères, le sorgho et le bersim et une céréale blé dur), et conséquences sur le développement racinaire, et le rendement final de cultures.

La problématique de cette recherche se définit comme suit:

***Quelle est l'impact du travail du sol conventionnel et semis direct sur la conservation de l'eau, la porosité, et la résistance pénétrométrique du sol, le développement racinaire et le rendement final de cultures ?***

Ce travail est une contribution afin de faire ressortir les effets du travail du sol et du semis direct sur les propriétés physico-mécanique du sol, et sur le développement racinaire. Et d'établir un modèle mathématique qui permet de quantifier le rendement des cultures en relation avec les caractéristiques physiques et mécanique du sol à savoirs : l'humidité, la porosité du sol et la résistance pénétrométrique d'une part, et les facteurs liés à chaque culture d'autre part.

Du fait que le rendement de cultures dépend aussi en grande partie de la dose de semis nous nous proposons d'utiliser différentes doses de semis pour essayer de mettre en évidence la relation entre les états structuraux et le développement racinaire et de rendements qui en découlent.

Le choix des cultures rentrent dans le programme de recherche de l'Institut Technique Des Grandes Cultures (ITGC). Ce programme porte sur la problématique de l'introduction des techniques culturales simplifiées en Algérie et la résorption de la jachère par l'introduction des fourragères dans les systèmes de rotation.

L'objectif de cette recherche sera donc d'établir un modèle mathématique qui permet de quantifier le rendement des cultures en connaissant les valeurs de différents paramètres liés au sol (Humidité du sol ; porosité du sol et résistance pénétrométrique du sol) et les facteurs liés à chaque culture (Hauteur de la partie aérienne ; densité racinaires ; poids de mille grains ; nombre de grains/m<sup>2</sup>), ainsi que la dose de semis. Et cela pour chacune des techniques de mise en place des grandes cultures, à savoir la technique conventionnelle et le semis direct. Les modèles mathématiques seront présentées sous la forme :

$$\mathbf{RDT}_{(TC, SD)} = \mathbf{f}(\mathbf{H}; \mathbf{P}; \mathbf{R}_p; \mathbf{D}_s; \mathbf{D}_r; \mathbf{PMG}; \mathbf{G}_r; \mathbf{H}_t)$$

*Synthèse  
bibliographique*

*Chapitre 1*  
*La céréaliculture*  
*en Algérie et dans le monde*

## Chapitre 1 : La céréaliculture en Algérie et dans le monde

### Introduction

La céréaliculture est une culture très importante dans la structure de la production agricole mondiale. Les céréales constituent de loin la ressource alimentaire la plus importante au monde à la fois pour la consommation humaine et pour l'alimentation du bétail. Les secteurs des céréales sont d'une importance cruciale pour les disponibilités alimentaires mondiales.

Depuis les années quatre-vingt-dix la céréaliculture est passé par des améliorations sensibles soit du côté administratif que du côté technique.

Les statistiques de la FAO montrent que les pays de l'Afrique du nord dont l'Algérie et l'Égypte sont les plus grands importateurs du blé. Elles prédisent que la demande céréalière pour ces pays arrivera aux environs de 51, 4 millions de tonnes toutes céréales confondues vers l'horizon 2050.

### 1.1.Problématique de la céréaliculture en Algérie

Les grandes cultures sont essentiellement conduites sous régime pluvial, notamment les céréales qui occupent principalement la zone semi-aride, avec des emblavures annuelles comprises entre 2 900 000 et 3 500 000 hectares (**Feliachi, 2000**). Cependant, seulement un tiers de ces emblavures se situent dans l'étage bioclimatique recevant une pluviométrie moyenne supérieure à 450 mm/an. En fait, le climat de l'Algérie se caractérise par l'insuffisance des précipitations et leur irrégularité dans l'espace et dans le temps et aussi par des pluies torrentielles ou des averses de forte intensité ( $I > 100$  mm/h) qui sont très fréquentes en automne au moment où la couverture végétale est faible (**Zaghouane et al, 2006**).

Ainsi, la partie nord de l'Algérie est exposée au grave phénomène de perte de terre avec une érosion spécifique annuelle moyenne variant entre 2000 tonnes/km<sup>2</sup> et 4000 tonnes/km (**Demmak, 1982**). Ce phénomène d'érosion hydrique en réduisant la surface agricole utile et en alluvionnant les oueds et les retenues, cause de graves problèmes sociaux et pousse les populations à l'exode rural.

A ces contraintes climatiques et sociales, s'ajoute une mauvaise pratique de l'agriculture dont la fertilité des sols est affectée par le travail intensif des sols, le faible retour organique et la faible activité biologique, aggravant ainsi la dégradation et l'érosion des sols. Bien plus, les systèmes de production existants dans ces régions sensibles, sont handicapés par une monoculture de céréale, associée à l'élevage ovin.

En effet, le travail conventionnel du sol adopté et réalisé en plusieurs passages à une faible profondeur, conduit à la compaction des sols. Le travail excessif des outils accentue le déplacement de la terre en bas des pentes. Ces aspects morphologiques induisent : une dégradation fonctionnelle des sols, une réduction de l'infiltration et un accroissement du ruissellement. Ces phénomènes sont accentués par la pratique de la jachère intégrale et la pratique systématique du labour profond suivi d'une multitude de façons superficielles nécessaires

à l'affinement du lit de semis, qui augmentent les risques d'érosions hydrique et éolienne dans des milieux déjà fragilisés.

Les techniques culturales simplifiées et le semis direct sous couvert végétal apparaissent comme des alternatives à même de corriger l'impact négatif des systèmes de production adoptés par les agriculteurs. Elles arrivent à mieux contrôler l'érosion, stocker la matière organique, améliorer l'efficacité hydrique et restructurer le sol sous l'effet d'une meilleure activité biologique (Mrabet et al., 2000 ; Kribaa et al., 2001). Ces techniques méritent donc d'être mieux étudiées avant de se prononcer sur leur adoption par la profession. En effet, ces nouvelles techniques, dites simplifiées, sont utilisées pour préserver le potentiel biologique et physicochimique des sols et les protéger des risques de l'érosion tout en limitant les frais de mécanisation. Le système du semis direct se voit comme premier pilier pour restaurer la fertilité des sols (Zaghouane et al., 2006).

## 1.2. Principales zones céréalières en Algérie

La céréaliculture est pratiquée sur une vaste aire géographique, au relief relativement accidenté. Cette superficie est constituée de plaines, de plateaux et de chaînes de montagnes au climat très variable qui va du subhumide à l'aride supérieur, avec une présente plus importante dans la frange pluviométrique des 300-400 mm (Feliachi, 2000; Cadi, 2005). Les conditions pédoclimatiques démarquent quatre zones distinctes.

**Une zone potentielle**, située essentiellement dans les plaines littorales et sub-littorales et le nord des hauts plateaux. Le cumul des précipitations reçu est compris entre 450 et 800 mm. La céréaliculture est pratiquée de manière intensive. La superficie occupée par la céréale varie de 1 à 1.2 millions d'hectares (Cadi et al., 2000).

**Une zone intermédiaire**, localisée principalement au sud des hauts plateaux, la pluviométrie est inférieure à 400 mm, constituant la zone agropastorale où se pratique une céréaliculture de subsistance avec des rendements très bas. La superficie de cette zone est estimée à 1.8 millions d'hectares.

**Une zone steppique**, où la céréaliculture est pratiquée de manière irrégulière sur 0.3 à 0.8 millions d'hectares, selon les années. C'est une zone à hiver froid, les précipitations enregistrées sont faibles, présentant une grande variabilité interannuelle, de 200 à 300 mm. C'est une zone peu productive, axée essentiellement sur la production de l'orge.

**La zone sud**, où se pratique une céréaliculture sous irrigation.

## 1.3. Les contraintes environnementales de production de Blé en Algérie

### 1.3.1. Contraintes climatiques

Le climat est un ensemble fluctuant d'éléments physiques, chimiques et biologiques caractérisant principalement l'atmosphère d'un lieu et dont l'action complexe influence l'existence des êtres qui sont soumis.

Selon Eliard, (1979), les différents éléments du climat tels que les précipitations, l'évaporation, les températures, la lumière et le vent, agissent simultanément sur le sol et sur les végétaux. Les aléas climatiques peuvent avoir sur l'agriculture un impact négatif qui se traduit par une perte d'une partie ou de la totalité de la production de l'année ; un impact positif reflètera par contre une année particulièrement favorable. Ces effets globaux résultent à l'incidence des éléments du climat à chaque étape de l'élaboration de la production.

### 1.3.1.1.Précipitations

Une réduction de la quantité d'eau disponible dans le sol influence les processus physiologiques qui contrôlent la croissance et le développement de la plante. Ces derniers se répercutent souvent sur les composantes du rendement.

Le régime pluviométrique est la contrainte essentielle de la céréaliculture cultivée en pluviale et en extensif, sans recours à l'irrigation surtout au niveau des étages climatiques arides et semi-arides. Dans ces zones, les céréales sont soumises, durant leur développement, à des situations de mauvaises alimentations hydriques qui peuvent intervenir à tout moment de leur cycle. La mauvaise répartition et la distribution irrégulière des précipitations dans le temps et dans l'espace imposent des déficits hydriques saisonniers qui sont à l'origine des faibles rendements. En effet, la céréaliculture algérienne est sujette à la variabilité du climat (**Feliachi et al. 2001**).

En Algérie, la variabilité des précipitations explique 75 % de la variation du rendement de blé. La plupart des études réalisées, dans différentes régions du globe, montre que la limite inférieure de production en grains se situe à un niveau de consommation en eau compris entre 200 et 210 mm et par conséquent en deçà de cette limite, le blé ne peut produire de grains (**Adda, 1996**). Aussi selon le même auteur, l'effet d'un déficit hydrique est variable selon son intensité, sa durée et le stade de développement durant lequel il intervient. L'impact sur le rendement est fonction de la composante affectée et de la possibilité de compensation ultérieure par d'autres composantes).

Le manque d'eau au cours de la montaison réduit le nombre d'épis/m<sup>2</sup> et le nombre de grains/épi et affecte ainsi d'une manière importante le poids de mille grains (PMG) (**Feliachi et al. 2001**).

Pour lutter contre le manque d'eau dans les régions arides et semi-arides, le choix du système de travail du sol est préférable afin de favoriser la conservation des eaux et de retenir dans le sol le maximum d'humidité pour la culture. Ainsi, **Adda (1996)**, pense qu'il est opportun d'adopter des systèmes qui facilitent l'infiltration des eaux de pluie, retiennent la neige et ralentissent l'évaporation. Il est possible d'accroître la capacité d'infiltration en réduisant le ruissellement, en maintenant la couche superficielle du sol dans un état favorable à l'infiltration rapide et en retournant ou en brisant les couches du profil qui font obstacle à la pénétration de l'eau, d'où l'importance des techniques de préparation du sol.

Dans les zones sujettes à des déficits hydriques variables et souvent intenses, où l'eau devient le principal facteur limitant de la production des céréales, la technique du "dry-farming" propose de faire une production de blé avec les pluies de deux années ou plus (**Bernard, 1911**) ; La pluie infiltrée, lors de l'année de la jachère durant laquelle le sol n'est pas cultivé mais travaillé, est maintenue dans le profil par un Mueh de terre qui l'empêche l'eau de s'évaporer.

### 1.3.1.2.Températures

A propos de la température, (**Oudina , 1986**) a cité deux autres phénomènes climatiques qui sont à craindre dans les zones céréalières. Il s'agit des gelées tardives, et des siroccos précoces pour l'ensemble des zones

céréalières. Les températures varient considérablement autour du bassin méditerranéen en fonction de l'altitude, de l'éloignement de la mer (**Belaid, 1986**). Elles affectent directement la plante par leurs valeurs extrêmes, gelées ou coup de chaleur.

Les températures élevées provoquent une transpiration exagérée de la plante et par conséquent, une déshydratation rapide des cellules. Il risque d'y avoir flétrissement de la plante surtout si le sol est sec.

D'après **Eliard, (1979)**, les risques d'échaudage se manifestent à une température qui dépasse 30°C chez le blé au stade laiteux pâteux, pendant deux jours consécutifs sur un sol sec. Une température élevée durant la montaison limite aussi, le nombre de talles épi, tout en augmentant la quantité totale de matière sèche formée (**Soltner, 1990**). Les basses températures entraînent la mort de certains organes. Le gel entraîne la formation de cristaux de glace entre les cellules qui se déshydratent progressivement. Leur eau de constitution se déplace vers les espaces intercellulaires et une déshydratation trop poussée entraîne la mort des cellules.

En Algérie les gelées tardives touchent les céréales vers la fin du mois d'Avril et le début du mois de Mai, au stade floraison et provoquent l'avortement et/ou la coulure (**Mekhlouf, et al.2006**), Les façons culturales permettent parfois de modifier la température du sol et d'avancer la date du semis, donc allonger la période de végétation.

### 1.3.1.3. Vents

Le vent est un élément important du climat. Il est comme le degré hygrométrique, un agent d'évaporation. En particulier, il risque d'augmenter les dégâts causés par l'échaudage (**Eliard, 1979**). Les siroccos précoces touchent les céréales en fin de cycle, période de remplissage du grain, et provoquent l'échaudage. Un coup de chaleur durant cette période (3CEC + vent sec) dessèche la plante ; le risque de l'échaudage devient plus grave si le coup de chaleur survient tôt que s'il survient tardivement. Ces deux accidents donnent un poids de mille grains faible à nul et par conséquent, agissent directement sur le rendement des céréales (**Oudina, 1986**).

Selon **Eliard (1979)**, les vents à forte vitesse peuvent également favoriser la verse des céréales ou l'égrenage sur pied des variétés sensibles. La vitesse et parfois la direction du vent ont un effet prépondérant sur le choix des façons culturales qui conviennent le mieux à une zone climatique donnée, en raison surtout des possibilités de défense qu'elles offrent contre l'érosion éolienne.

### 1.3.2. Contraintes techniques

Les contraintes au bon développement d'une culture et plus particulièrement les céréales et les fourrages, sont nombreuses, ainsi l'adoption d'un itinéraire technique adéquat permet l'obtention d'un rendement appréciable (**Rachedi ;2003**). Une mauvaise application des techniques culturales, un semis en dehors des délais techniques requis et l'absence d'une bonne lutte contre les mauvaises herbes provoquent une profonde dégradation du milieu correspondant à un appauvrissement excessif des sols et une baisse continue des revenus agricoles (**Kelkouli,2008**). Les sols céréaliers sont pauvres, 60 % des superficies situées sur des terres peu productives (**MADR, 2007**). Les efforts d'intensification deviennent très difficiles à cause des nombreux morcellements des

terres.

Quoi que les engrais soient produits localement, leur utilisation reste inférieure aux normes d'intensification et varie selon les régions, les cultures et la taille de l'exploitation. Sachant qu'une fertilisation raisonnée permettrait non seulement une amélioration de la production, mais également une résistance à la sécheresse (**MADR, 2007**).

Sur les hautes plaines orientales la céréaliculture est pratiquée, en pluviale, dans un système biennal jachère– céréale. L'adoption de la jachère cible, entre autres, l'emmagasinement de plus d'eau dans le profil, dans l'espoir d'en faire bénéficier la céréale qui suit. Cette pratique, bien raisonnée, améliore la fertilité azotée du sol, l'eau stockée à plus de 60 cm de profondeur, facilite le semis de la céréale et maîtrise la flore adventice (**Oird, 1977**). Ceci résulte, souvent, en une augmentation du rendement grain qui ne dépasse guère les 15%, en comparaison avec la pratique de la jachère enherbée ou de la céréale continue (**Oird, 1977 ; Austin, 1998**).

Ces résultats remettent en question les avantages qu'on peut tirer de la jachère, dans les régions arides et semi- arides, notamment en matière de stockage de l'eau. En effet, il est peu économique de laisser des parcelles sans cultures ; d'autant plus que ces parcelles restent en l'état (en jachère) durant plus de 16 mois. Le labour précoce sur jachère, s'il contrôle efficacement la flore adventice, se montre le plus souvent moins efficace en termes de stockage de l'eau. De plus, il augmente la sensibilité du sol à l'érosion, notamment sur les parcelles en pente et sur les sols limoneux du sud (**Bouguendouz et al., 2011**).

En dehors de la jachère nue, deux autres variantes existent, la jachère pâturée et la jachère fauchée (**Abbas et Abdelguerfi, 2005**). Les parcelles en jachère à pâturer sont laissées en l'état pour produire de l'herbe et servent comme pâturages aux ovins. Le travail du sol intervient, dans ce cas, tardivement lorsque le cycle de la végétation en place tire vers sa fin ou lorsque les premières parcelles d'orge sont moissonnées. Ce labour tardif produit de grosses mottes qui durcissent au cours de l'été, rendant l'affinement du lit de semis plus difficile et expose les premiers cm de la surface du sol à une forte évaporation (**Oird, 1977**).

L'intérêt de la jachère de longue durée, comme moyen pour augmenter l'eau stockée dans le sol pour la céréale qui suit, ne se vérifie pas dans la plupart des situations, et de ce fait cette pratique est remise en cause (**Lopez et Arrue, 2005 ; Chenaffi et al., 2011**). Cependant l'intérêt de la jachère nue reste indéniable en ce qui concerne la maîtrise de la flore adventice, lorsque le labour profond est réalisé tôt. Ce labour apparaît comme une importante source de nuisances, dont entre autres l'érosion et la réduction de la fertilité du sol (**Kassam et al., 2012**).

#### 1.4. Place et importance de blé dur dans l'agriculture mondiale et algérienne

Quoique le blé tendre (*Triticumaestivum* L.), le maïs (*Zeamays* L.) et le riz (*Oryzasativa* L.) soient les céréales les plus produites à travers le monde, il n'en demeure pas moins que le blé dur (*Triticumdurum* Desf.) occupe une place importante dans certaines régions du monde, notamment les zones semi-arides dont le climat est de type méditerranéen (**Pena et Pfeiffer, 2005**).

Selon **Hammadache. (2013)**, la production mondiale moyenne des blés (dur et tendre) pour la période 2004-2010 est d'environ 640 millions de tonnes soit 30% de la production céréalière totale (blé, riz, orge, avoine, seigle, maïs, sorgho).

La culture du blé dur est concentrée au Moyen-Orient, en Afrique du Nord, en Russie, aux Dakotas, au Canada, l'Inde et l'Europe méditerranéenne. Avec une production de 9.00 millions de tonnes par an, moyenne de la période 2006-2010, l'Union européenne est le plus grand producteur de blé dur. Le Canada arrive au deuxième rang avec 4.8 millions de tonnes par an, suivi de la Turquie et des États Unis, avec 1.99 et 2.67 millions de tonnes métriques respectivement. Ces quatre pays fournissent à eux seuls les deux tiers de la production mondiale (**Ice, 2011**).

En Algérie, la céréaliculture constitue la principale activité, notamment dans les zones arides et semi-arides. Les terres annuellement emblavées représentent 3,6 millions d'hectares. Le blé dur est une ancienne culture dont l'origine remonte à la venue des arabes (**Ducellier, 1930**). La superficie occupée par le blé dur est, en moyenne, de 1,3 millions d'hectares, durant la période 2000-2012 (**MADR, 2013**). L'importance des superficies occupées par cette espèce, comparativement à la superficie occupée par l'orge, est influencée par le prix à la production garanti par l'état.

Selon **Hakimi (1993)**, l'orge et le blé dur assuraient le gros des besoins alimentaires des habitants et de leur cheptel, au cours de la période coloniale et bien avant cette dernière. Depuis l'indépendance, une forte demande alimentaire se faisait sentir sur le blé dur et le blé tendre, alors que l'orge prenait une destination fourragère.

D'après **Hervieu et al., (2006)**, l'Algérie se classe au premier rang mondial pour la consommation de blé avec une moyenne dépassant largement les 200kg/ha/an, comparativement à l'Égypte dont la moyenne est de 131kg/ha/an et à la France dont la moyenne est de 98kg/ha/an.

La croissance démographique, le changement de modèle de consommation et le soutien des prix des produits de base, font que le volume de céréales consommées est en constante augmentation. Ainsi au cours de l'année 2011, les importations, à partir de l'union européenne, sont passées de 3,98 à 5,5 millions de tonnes pour le blé tendre et de 1,24 à 1,85 millions de tonnes pour le blé dur, selon la **FAO (2011)** ces volumes sont les plus élevés de puis l'indépendance. La production du blé dur, comme celle du blé tendre, est très fluctuante. Pour la période 2000-2012, la production de blé dur avarié de 9 à 23 millions de quintaux (**MADR, 2013**).

Cette production est loin de couvrir la demande qui est de plus en plus importante, suite au faible nombre de produits de substitution et au soutien des prix des céréales (**Badrani, 2004**). Les rendements de la céréaliculture algérienne sont très bas, comparativement à la moyenne mondiale qui est de  $29 \text{ qha}^{-1}$ , et celles des pays voisins qui est de  $25 \text{ qha}^{-1}$  (**FAO stat, 2010**). Le rendement du blé dur a varié de 11 à  $17 \text{ q ha}^{-1}$ , au cours de la période 2000- 2012 (**MADR, 2013**). La faiblesse de la production, dont les causes sont multiples, associée à une forte demande alimentaire, justifie le fait que le pays se présente comme un gros importateur potentiel.

## Conclusion

La filière blé est une filière stratégique pour l'Algérie, elle est considérée comme le fer de lance pour l'industrie agro-alimentaire mais elle reste toujours sous la proposition de reconstitution pour les raisons suivantes :

- ✓ La production, reste insuffisante pour satisfaire la demande nationale ;
- ✓ La consommation de blé par la population ne cesse d'augmenter ;
- ✓ La place qu'occupent les importations dans l'approvisionnement du marché de blé, est importantes voire nécessaire.
- ✓ la non-maîtrise des itinéraires techniques de production

D'après les études des auteurs présentées, on a pu conclure que le développement d'une culture dépend de plusieurs facteurs climat, sol, caractéristiques de la culture et de moyens de production et plus particulièrement la préparation du sol pour la mise en place d'une céréale ou d'une culture en générale, joue un rôle fondamental pour la réussite de la culture.

Dans l'itinéraire technique de la mise en place des cultures, le travail du sol est souvent la première opération à réaliser. De sa réussite, dépend celle du rendement de la culture à mettre en place. En effet une bonne préparation du sol offrira à la plante un milieu adéquat à son développement.

L'introduction des nouvelles techniques culturales, de mise en place des cultures ne doit pas se limiter uniquement aux grandes cultures mais doit prendre en considération d'autres cultures plus intéressantes à savoir les cultures fourragères et plus particulièrement le sorgho et le bersim qui entrants en rotation avec le blé. Et c'est dans ce contexte que nous allons essayer d'expliquer dans le prochain chapitre l'importance des cultures fourragères en Algérie et les travaux relatifs à l'effet de techniques culturales sur la croissance et le développement de fourrages.

## *Chapitre 2*

# *Les cultures fourragères en Algérie*

## Chapitre 2 : Les cultures fourragères en Algérie

### Introduction

L'insuffisance de la production fourragère et pastorale constitue un obstacle au développement de l'élevage bovin et ovin en Algérie, ce qui a conduit à des insuffisances en protéines et ce devant une croissance démographique importante (**1,9 % en 2013, Anonyme : Banque Mondiale 2013**). Cet état de fait a poussé le pays à importer des quantités de protéines sous forme de viandes, lait et autres produits pour subvenir aux besoins de la population. Cette déficience en ressources fourragères ne peut s'expliquer que par :

- Une négligence et une marginalisation de la production fourragère au profit de la céréaliculture.
- La culture d'une gamme d'espèces fourragères réduites.
- Le non maîtrise de l'un des principaux facteurs de production à savoir la mécanisation des différentes étapes de l'itinéraire technique.

L'essentiel de l'alimentation du cheptel ovin, bovin, caprin et camelin est assuré par des milieux naturels (steppe, parcours, maquis,...) et des milieux plus artificialisés (prairies, jachères,...) notamment en hiver et au printemps, ce qui engendre en général la dégradation de ces milieux par le phénomène de surpâturage et par conséquent une érosion importante.

La production fourragère en Algérie est très limitée et les ressources pastorales restent aléatoires et s'amenuisent d'année en année ; les conséquences se manifestent à travers les faibles productions animales et en particulier la production laitière (**Abdelguerfi et al., 2008**).

Les possibilités de développement des cultures fourragères et d'amélioration des productions pastorales sont énormes mais restent tributaires de certains éléments déterminants comme la production des semences, le changement des mentalités vis à vis des productions fourragères et pastorales et en particulier l'utilisation et le choix des itinéraires techniques.

### 2.1. Système de culture en Algérie

L'agronomie actuellement est une discipline qui a évolué pour répondre à des besoins spécifiques qui correspondent à des enjeux économiques et environnementaux. La pratique de l'agriculture suppose la transformation du milieu naturel en milieu cultural. Les productions agricoles reposent sur des systèmes de culture qui intègrent les successions de culture et les itinéraires techniques appliqués aux cultures sur la parcelle agricole. Le concept de système de culture est né avec l'agronomie, ce dernier qu'on le définit comme suit :

Le système de culture est « un sous –ensemble du système de production défini, pour une surface de terrain traitée de manière homogène, par les cultures avec leur ordre de succession et les itinéraires techniques » (**Gras R., 1990 in Jouve, 2006**).

Les systèmes de culture se répartissent, selon leur adaptation en différents zones :

- La zone pluvieuse du nord reste le pourvoyeur de produits agricoles diversifiés: céréales, légumes et fruits ainsi que ceux de l'élevage (fourrage) en semi-intensif (surtout pour la production de lait et de viande).

- La zone intermédiaire sert de parc à ovins de par ses espaces étendus de parcours (steppe et pâturages extensifs).

- Le troisième ensemble écologique improductif représente le désert saharien où les seules activités agricoles reposent sur l'agriculture oasienne et l'exploitation du palmier dattier. Actuellement il y a un projet sur les cultures fourragères au niveau de ces zones car les ressources en eau sont relativement importantes.

Alors que pour le système de production, il s'agit d'un ensemble structuré de moyens de production (force de travail, terre, équipement...) combinés entre eux pour assurer une production végétale et /ou animale en vue de satisfaire les objectifs d'un agriculteur. Les éléments qui constituent ce système sont : le paysan et sa famille, les moyens de production, les techniques employées et les productions elles-mêmes (leur nature et leur niveau) (Daane, et al., 1989 in Fanou, 2008).

### 2.1.1. Caractéristiques des systèmes de production en Algérie

Le secteur de l'agriculture se caractérise par des systèmes de production aléatoires qui ont induit une utilisation mal raisonnée de ressources naturelles existantes.

Il existe une mosaïque de systèmes de production mixtes largement dominés par le système céréalier. Sur la base d'une sole annuelle de 6.200.000 ha gravitant autour de la céréaliculture, l'importance des différents types de systèmes de production, se présente dans le tableau suivant :

**Tableau 1** : Classement des systèmes de cultures (FAO, 2010)

Système de production	Taux d'occupation %	Superficie équivalente (ha)
JN ↔ C	52	3.000.000
JW ↔ C	30	1.900.000
C ↔ C/F	13	900.000
LS ↔ C	4	300.000
PS ↔ C	1	100.000

JN : jachère nue ; JW : jachère travaillée ; C : céréales ; LS : légumes secs, PS : plantes sarclées ; F : fourrage.

- Le système de culture céréale/fourrage se classe en troisième position après JN/C et JW/C.
- La proportion des légumes secs représente environ 50% de l'assolement système de production LS/C.
- Les plantes sarclées représentent 50% de l'assolement système de production PS/C.

Nous constatons que le système Céréales/Fourrage est donc important en Algérie du point de vue exploitation des surfaces agricoles.

### 2.2. Principales zones de production des fourrages en Algérie

Selon Hamadache, 2016, les zones de production des fourrages (surtout cultivés) correspondent souvent aux zones traditionnelles de l'élevage (bovin, ovin et caprin) en Algérie.

Ainsi pour les fourrages dits naturels (jachère fauchée et prairies), les zones traditionnelles de production sont les suivantes : la Kabylie (Béjaïa, Tizi Ouzou, Jijel), les Aurès (Batna et Oum El-Bouaghi), le nord-est des Hauts-Plateaux sétifiens (Mila) et l'extrême nord-est (Souk Ahras).

Ces régions se caractérisent sur le plan socio-économique par:

- La dominance de la propriété privée (Melk) ;
- La dominance de l'élevage familial extensif (bovin, race locale, et caprin).

Sur le plan physique, ces régions se caractérisent par une forte pluviosité hivernale et une topographie assez accidentée (sols en pente).

Pour les fourrages artificiels ou cultivés (vesce x avoines, avoine, orge en vert), les principales zones productrices sont les suivantes : la vallée du Chleff (Aïn Defla et Chleff), les périmètres de Béni Slimane et des Aribis (Bouira et Médéa) et le sud des Hauts-Plateaux de l'Est (M'sila et Khenchela pour l'orge en vert surtout.)

Pour les fourrages irrigués (luzerne, sorgho, bersim), les principales zones de production sont les wilayas du Sud : Ouargla, Ghardaïa.

### 2.3. Principales contraintes à la production des fourrages en Algérie

On peut les résumer, pour les fourrages Cultivées surtout, comme suit :

- ✓ Des contraintes liées aux divers stress abiotiques : froid hivernal, sécheresse printanière et estivale ;
- ✓ Des contraintes liées aux stress biotiques : ravageurs, maladies fongiques ;
- ✓ Des contraintes agronomiques: mauvaises conditions d'installation, absence de fertilisation minérale et manque de machines pour la préparation du sol et pour la récolte ;
- ✓ Des contraintes liées aux politiques agricoles la faible disponibilité et les prix élevés des semences fourragères, prix des viandes rouges, absence de programme de recherche à long terme sur les fourrages, absence d'actions de vulgarisation des nouvelles techniques de production...
- ✓ La politique de subvention des concentrés. (**Hamadache, 2016**)

### 2.4. Les ressources fourragères

L'essentiel de l'alimentation du cheptel est assuré par les milieux naturels (steppe, parcours, maquis) et artificiels (jachères, prairies) notamment en hiver et au printemps. Les ressources fourragères en Algérie se composent essentiellement des chaumes des céréales, de la végétation de jachères pâturées, des parcours steppiques, forêts, maquis et d'un peu de fourrages cultivés qui sont répertoriés dans le Tableau 6 (**Hamadache , 2001**). En Algérie, les fourrages cultivés contribuent faiblement à l'alimentation des herbivores comparés aux plantes fourragères spontanées (**Bencherchali et Houmani, 2010**). Les cultures fourragères occupent annuellement 523 000 hectares soit un peu plus de 6,1 % de la surface agricole utile.

La culture des fourrages est donc peu pratiquée en raison d'une faible superficie agricole utile (8,5 millions d'hectares) mais aussi en raison d'une insuffisante quantité d'eau allouée à l'agriculture. Les plantes fourragères spontanées sont constituent, en compagnie des pailles de céréales, l'essentiel de l'alimentation des herbivores, en particulier des petits ruminants (**Houmani et al, 2004**).

**Tableau 2** : Les ressources fourragères en Algérie ((Kali *et al.*, 2011).

Ressources fourragères	Superficie (hectares)	Productivité moyenne UF/ ha	observations
Parcours steppiques	15 à 20 millions	100	Plus ou moins dégradés
Les forêts	Plus de 3millions	150	-
Chaumes de céréales	Plus de 3millions	300	Nécessité d'améliorer la qualité des chaumes
Végétation de jachères pâturées	Moins de 2 millions	250	Nécessité d'orienter la végétation
Fourrages cultivés	Moins de 500 millions	1000 à 1200	Orge, avoine, luzerne, trèfle, vesce avoine et sorgho
Les prairies permanentes	Moins de 300 millions	-	Nécessité d'une prise en charge

(Ha : hectare, UF : unité fourragère)

Ces données témoignent, encore une fois, du caractère extensif de la production fourragère en Algérie (Abdelaziz, 2009 in Adem et Ferrah, 2002). Une analyse de la balance fourragère pour l'année 2001 a permis de mettre en exergue la persistance d'un déficit fourrager estimé à 22%. Mais cette moyenne recèle des disparités régionales importantes. En effet, l'analyse selon les diverses zones agro écologiques montre que les déficits sont beaucoup plus prononcés dans les zones littorales, steppiques et sahariennes pour des taux respectifs de 58 %, 32 % et 29 % (Kali *et al.*, 2011). Ce déficit fourrager a des répercussions négatives sur la productivité des animaux et se traduit par un recours massif aux importations de produits animaux à l'instar des produits laitiers et carnés (Abdelaziz, 2009 in Adem et Ferrah, 2002). Toutefois les systèmes d'élevage sont mixtes et la part de la production annuelle de chaque type de produit (lait, viande) dépend de la pluviométrie, qui conditionne les disponibilités fourragères, mais aussi de l'utilisation et le choix des itinéraires techniques.

Notre étude porte sur deux cultures fourragères : le sorgho fourrager et le bersim, le choix de ces derniers se justifie par les multiples avantages qu'elles présentent (ses qualités d'adaptation facile aux conditions climatiques de l'Algérie et ses exigences en matière de qualité de lit de semence).

## 2.5.Généralités sur les cultures étudiées

### 2.5.1. Sorgho Fourrager

#### 2.5.1.1. Place du sorgho dans l'agriculture mondiale et algérienne

Avec une surface cultivée de 40, 5 millions d'hectares, le sorgho commun, arrive au 5<sup>e</sup> rang des grandes cultures dans le monde (FAO STAT, 2012). Les principales zones de culture du sorgho se situent dans les régions chaudes, comme l'Inde, l'Afrique, l'Amérique du nord et du sud. Mais en Europe aussi, le sorgho est cultivé avec succès : la France est le plus important producteur de sorgho en termes de surfaces, suivie de l'Italie, l'Espagne et quelques pays du Sud-Est de l'Europe qui en comptent plusieurs milliers d'hectares. Contrairement

aux variétés locales cultivées dans de nombreux pays d'Afrique et d'Asie, qui ont tendance à avoir des rendements plutôt faibles, et dont les récoltes sont utilisées essentiellement pour l'alimentation humaine (**Smith et Frederiksen 2000 ; Zeller 2000**). Les variétés cultivées dans les pays industrialisés sont des variétés hybrides à haut rendement, utilisées surtout dans la production animale.

La très grande majorité des surfaces semées en sorgho se trouvent en Afrique et en Asie (Inde notamment). Les pays occidentaux produisent environ 40% de la récolte mondiale, pour l'alimentation animale, sur 10% seulement de la surface totale.

En Algérie, la production du sorgho fourragère se localise, ces dernières années, au niveau des wilayas suivantes, selon l'ordre d'importance des superficies : Batna, Tizi Ouzou, Khenchela, M'sila, Adrar, Ghardaïa et Bordj Bou-Arréridj. Elles correspondent, grosso modo, aux zones d'élevage bovin (races améliorée et/ou locale). La superficie moyenne occupée par le sorgho à l'échelle nationale en 2012 a été de 7000 ha dont le tiers se trouve à Batna (**Hamadache, 2016**).

Les importateurs de semences ont évalué l'engouement exprimé par les éleveurs pour ces nouvelles variétés céréalières à travers l'écoulement de toutes les quantités de semences importées en 2014 et dont les rendements obtenus atteignent jusqu'à 100 tonnes par hectare. Ces nouvelles variétés de sorgho ont couvert une superficie de 10.000 ha en 2014, qui devrait tripler pour passer à 30.000 ha en 2015.

### **2.5.1.2. Utilisation et intérêt de la culture**

Le sorgho fait partie du groupe des plantes les plus anciennement cultivées dans le monde.

Dans les régions tropicales, la plante est essentiellement cultivée pour son grain destiné d'abord à l'alimentation humaine. Le grain peut être consommé entier ou décortiqué pour faire des bouillies, du couscous, des galettes, etc. Sa fermentation donne des boissons alcoolisées: bière traditionnelle en Afrique ou vin de sorgho en Chine. La paille de sorgho sert à l'alimentation des animaux, comme combustible ou matériau de construction.

En zone tempérée, le sorgho est principalement cultivé pour l'alimentation du bétail (bovin, ovin et caprin) en vert ou ensilé au stade pâteux (plante entière hachée puis fermentée) (**CMA/AOC, 2005**)

En Algérie, dans les oasis de la région d'Adrar, surtout dans le passé, le grain du sorgho concassé et mélangé avec celui du blé ou du maïs, était utilisé pour préparer certains plats culinaires. Dans cette région, le sorgho est utilisé aussi comme fourrage (feuilles et tiges), après la récolte du grain et fait partie donc de la ration alimentaire destinée au cheptel oasien.

En médecine traditionnelle africaine, le sorgho possède différentes applications : des extraits de graines se boivent pour traiter l'hépatite et des décoctions de brindilles se prennent avec du citron contre la jaunisse. Feuilles et panicules entrent dans la composition de préparations végétales prises en décoctions contre l'anémie. Mais on l'utilise aussi pour d'autres indications thérapeutiques comme la décalcification osseuse, le diabète, les calculs biliaires, les ulcères gastriques et duodénaux, la dyspepsie, la colite (**M. Brink et Belay, 2006**)

Sur le plan cultural, les sorghos sont particulièrement intéressants du fait de leur:

- résistance à la chaleur et à une sécheresse relative;
- bonne productivité;

- aptitude à repousser après la coupe, ce qui permet de les exploiter plusieurs fois au cours de l'été et les rend ainsi particulièrement précieux pour les éleveurs qui font du pâturage ou de l'affouragement en vert;
- valeur alimentaire très satisfaisante lorsque l'on emploie des techniques culturales appropriées (notamment fumure et rythme d'exploitation) (**Brink et Belay, 2006**).

Selon **Hamadache, 2016**, le sorgho est une plante, une fois semée dense, qui possède un fort pouvoir couvrant et fait donc de l'ombre aux adventices et les étouffe. L'un des produits excrétés par les racines du sorgho est le Sorgoleone, qui inhibe la croissance de nombreuses adventices tout comme un herbicide de pré-semis. Une étude faite en Californie, USA, a montré que des adventices sont supprimés pour une longue période si les résidus de récolte du sorgho sont laissés à la surface du sol au lieu de les enfouir. Le sorgho est connu aussi comme un inhibiteur de certaines espèces de nématodes nuisibles aux cultures.

- Enfin, l'introduction du sorgho dans les rotations permet l'interrompre le cycle de reproduction de nombreux pathogènes. En effet, lors de la dégradation des débris du sorgho, certaines molécules ayant des propriétés fongicides, comme l'acide cyanhydrique, sont libérées dans le sol et peuvent modifier les structures des populations microbiennes. (**Hamadache, 2016**).

### 2.5.1.3. Mode d'exploitation du sorgho fourrager

Le sorgho est une plante de chaleur, qui s'adapte bien au sec grâce à son système racinaire puissant. Il permet de fournir rapidement un fourrage abondant (7 à 10 T MS / ha) et appètent tant pour les vaches que pour les brebis, à utiliser en affouragement en vert ou en pâture, ou en ensilage.

L'exploitation en vert peut atteindre 3 à 4 coupes pour les sorghos fourragers et 4 à 6 coupes pour le sudan-grass. Dans le cas du pâturage, l'exploitation devra être faite au delà de 60 voire même 80 cm pour éviter une intoxication à l'acide cyanhydrique. L'utilisation de variétés à faible pouvoir cyanogène est recommandée. Concernant le foin, la coupe doit se faire entre l'épiaison et le début de la floraison. Le fanage diminue le risque d'intoxication à l'acide cyanhydrique.

Les Sudan Grass sont à préférer aux variétés hybrides pour la pâture ; de rendement moins élevé, ils sont aussi plus précoces et moins riches en acide cyanhydrique que les hybrides, ce qui autorise une pâture dès 40 cm de hauteur, avec des cycles de repousse plus courts (**Mareaux, 2010**).

### 2.5.1.4. Le sorgho dans la rotation

Le sorgho est une culture de printemps et d'été. Il faut tenir compte des herbicides du sol appliqué sur le précédent cultural avant de mettre en place le sorgho. Ce dernier épuise le sol en NPK et en eau. La rotation blé/sorgho/jachère est largement pratiquée aux USA. En Algérie, les rotations possibles sont les suivantes :

- Bersim/sorgho/blé tendre ou orge (zone à pluviométrie >600 mm) ;
- Tomate industrielle/sorgho/blé tendre ou orge . (**Hamadache, 2016**).

### 2.5.2. Bersim ou trèfle d'Alexandrie

Le trèfle d'Alexandrie (*Trifolium alexandrinum* L.), appelé communément bersim, est une légumineuse fourragère annuelle à pousse hivernale et printanière, à fécondation croisé. Il appartient au groupe des plantes cultivées dans l'assolement

### 2.5.2.1. Utilisation et intérêt de la culture

Le bersim est une plante érigée, plutôt velue, annuelle avec un système racinaire profond, elle est trifoliée, avec des folioles allongées. En région méditerranéenne, pour l'alimentation du cheptel, c'est un fourrage très important en saison froide.

C'est une culture ancienne en Egypte, une culture importante d'hiver, et de là le bersim fut introduit au Sind (Pakistan) au début du vingtième siècle, où il s'est bien adapté aux conditions et aux systèmes agricoles des périmètres irrigués du sous-continent et s'est propagé à travers le nord de l'Inde (**Roberts et Singh, 1951**).

L'alimentation de base du bétail est constituée le plus souvent de foin de vesce-avoine de mauvaise qualité, insuffisamment complétement par des concentrés (**Abdelguerfi et Laouar, 2002**). Le bersim a donc une vocation en tant que culture fourragère principale pour apporter un complément protéique en vert, aussi longtemps que possible en hiver et au printemps. N'étant pas conservé mais utilisé en vert au fur et à mesure de sa production, la durée de la période de production et la régularité quantitative et qualitative sont des caractères essentiels, aussi importants que la production totale durant la campagne agricole. (**Merabet et al., 2005**).

Le bersim revêt un intérêt certain auprès des éleveurs laitiers en Algérie. Ce fourrage vert très digestible et riche en matières azotées favorise la production laitière.

De point de vue économique, le bersim est un moyen efficace de lutte non chimique contre les adventices. C'est une source gratuite d'azote.

Sur le plant nutritif, le bersim produit d'importantes quantités de fourrage durant les périodes hivernales et printanières et présentes vis-à-vis de la luzerne une complémentarité très importante. La luzerne fournie du fourrage de mai à octobre et le bersim prend le relai après une période de soudure plus ou moins brève.

D'après **Villax, 1963**, le bersim peut provoquer à long terme une amélioration de la structure physique du sol en formant dans le sens vertical des petits canaux qui se conservent après l'humification des racines, et donc améliore la circulation de l'eau et des matières nutritives dans le sol.

De plus, les légumineuses fixent dans le sol l'azote de l'air (elles sont les seules plantes à pouvoir accomplir ce petit exploit) : elles agissent comme un engrais azoté, qu'il soit d'origine minérale ou organique. Semer du trèfle, du lupin ou du mélilot remplace ainsi l'apport d'engrais et nourrit durablement les cultures gourmandes en azote : à ce titre, les fabacées sont des engrais verts (**Anonyme 2015**)

D'après des recherches réalisées par l'institut technique des grandes cultures en 1989 à Oued-Smar. Ils ont trouvés que le taux de mauvaises herbes passe de 42% de matière sèche total (bersim+mauvaises herbes) à la première coupe effectuée au mois de février, à 3% à la troisième coupe effectuée au mois d'avril.

Le respect de la rotation culturale (blé/bersim), accompagné d'un meilleur contrôle chimique des adventices a défavorisé l'accroissement de l'infestation en mauvaises herbes (**Abdellaoui et al., 2011**).

### 2.5.2.2. Caractéristiques générales des trèfles d'Alexandrie

Le trèfle d'Alexandrie (*Trifolium alexandrinum* L.) est une légumineuse imposante à port dressé, dont la hauteur peut atteindre un mètre. Sa croissance est similaire à celle de la luzerne. Les fleurs sont de couleur jaune-

blanc et disposées à la tête des tiges. Il possède un système racinaire pivotant très puissant, d'une profondeur variant entre 40 à 80 cm, avec de fortes ramifications lui permettant de résister à la sécheresse. Le trèfle d'Alexandrie est une plante des climats doux, La durée de développement du semis jusqu'à la première coupe est de 60 à 70 jours. ( **Frick,2013**)

Les plantes ont une particularité caractérisée par la présence au niveau des racines de nodosités (petits renflements) qui abritent des bactéries du genre *Rhizobium*. Ces bactéries vivent en symbiose avec la plante : la légumineuse fournit du carbone aux bactéries, qui en retour mettent de l'azote à disposition de la plante. Cet azote utilisable par les racines, sous la forme d'ion ammonium  $NH_4^+$ , est synthétisé par les bactéries à partir de l'azote atmosphérique  $N_2$ . Selon **Hamadache (2003)**, le bersim en tant que plante légumineuse peut enrichir le sol en matière organique et entretenir la fertilité du sol par la fixation d'azote.

### 2.5.2.3. Mode d'exploitation du bersim

D'après **Hamadache (2016)**, le bersim est un fourrage à production hivernale et printanière. Il est surtout exploité en vert pour l'alimentation des vaches laitières. C'est l'espèce du genre *Trifolium* (trèfles) qui produit plus de matière sèche en hiver. Le bersim est à exploiter dès que la hauteur moyenne de la végétation soit entre 40 et 60 cm et que les bourgeons de la base aient une hauteur de 4-6 cm, soit à peu près 5 à 7 semaines après la levée de la culture en fonction de la température et de l'humidité du sol.

### 2.5.2.4. Le bersim dans la rotation avec les céréales

Pour mettre en évidence l'importance de la culture de bersim en relation avec les céréales (cas de blé), une étude était réalisée en Egypte, qui consiste à comparer le rendement de blé pour quatre saisons successives de 1991-92 à 1994-95 et de comparer la présence des pâturages sauvages dans le sol, les résultats sont montrés dans le tableau suivant :

**Tableau 3 :** Incidence des pâturages sauvages dans la rotation bersim-blé.

Séquence des cultures				Folle avoine plt/m <sup>2</sup>	La production de blé kg/ha
91/92	92/93	93/94	94/95		
Blé	Blé	Blé	Blé	227	309.52
Bersim	Bersim	Bersim	Blé	14.1	4523.80
Bersim	Blé	Bersim	Blé	33.2	3890.47
féverole	Bersim	Blé	Blé	129.5	1178.57

**Source :** EL-Nahrawy et *al.*, 2014

L'étude a montré que la relation avec le bersim à diminuer plus de 16 fois le taux des pâturages sauvages par m<sup>2</sup> et augmenter plus de 12 fois le rendement de blé.

On peut dire que le rôle de bersim dans la rotation avec les céréales est à la fois d'améliorer la structure du sol avec l'enrichissement en azote et nettoyage de sol.

## Conclusion

En conclusion à ce chapitre, nous constatons que :

-Les Sorghos sont parmi les espèces fourragères sur lesquelles on peut fonder beaucoup d'espoirs. Leurs qualités principales peuvent être résumées de la manière suivante:

-Ce sont des plantes qui, en peu de temps d'occupation du sol, fournissent, même avec un approvisionnement en eau minime, en saison estivale ; donc pendant la période de pénurie des prairies ; une masse fourragère très importante, susceptible d'être utilisée, soit en vert immédiatement sur le pré ou à l'auge, soit mise en réserve et consommée sous forme d'ensilage.

-Le bersim en étant une légumineuse fourragère présente plusieurs avantages dont les plus importants sont : est un couvert des besoins d'animaux grâce à sa richesse en matière azotée et sa valeur énergétique qui favorise la production laitière - **la fixation d'azote atmosphérique par les nodosités qui joue un rôle majeur dans la rotation avec les céréales.**

-Il est important de mentionner que les ressources fourragères ont été négligées pour diverses raisons; qui tiennent essentiellement au manque d'informations relatives aux possibilités fourragères de ces espèces, aux techniques culturales, aux exigences agronomiques ainsi qu'au mode de consommation du fourrage. Par ailleurs, aussi à cause de la pénurie des semences.

D'autre part, les cultures fourragères sont des cultures qui peuvent être menées en semis direct comme en travail conventionnel, et c'est dans ce contexte que nous allons essayer d'expliquer dans le prochain chapitre le rôle et l'importance de ces techniques culturales du point de vue pédologique, économique, environnementale ainsi que sur le rendement des cultures.

## *Chapitre 3*

# *Les techniques culturales et leurs effets sur l'état du sol*

## Chapitre 3 : Les techniques culturales et leurs effets sur l'état du sol

### Introduction

Le travail du sol est une pratique ancestrale, dont un des buts premiers est de créer un environnement favorable à la germination des graines et au développement des racines.

Les résultats de nombreuses recherches sous différentes zones climatiques dans le monde ont révélé des problèmes communs aux sols labourés : tassement, baisse des teneurs en matières organiques des sols, érosion, limitation de la circulation de l'eau (Lal et al,2007).

On assiste donc depuis quelques décennies, à travers le monde entier, à une transition graduelle qui s'effectue entre le labour conventionnel ( labour avec charrue a versoir, retournement de la couche arable sur 20-30 cm de profondeur) et des formes variées de préparation sans retournement des couches de sol, allant jusqu'au semis direct(travail uniquement sur la ligne de semis). Ces techniques ont été regroupées sous le terme de travail du sol de conservation, ou agriculture de conservation, lorsqu'elles laissent plus de 30% des résidus de la culture précédente en surface (koller, 2003).

Dans ce chapitre, on va décrire la classification des itinéraires techniques de la mise en place des cultures, et le problème de l'introduction de semis direct en Algérie, tout en citant les effets des techniques culturales sur l'état structural du sol, ainsi que sur l'environnement.

### 3.1. Les itinéraires techniques de la mise en place d'une culture

#### 3.1.1. La notion d'itinéraire technique

Un itinéraire technique est la combinaison logique et ordonnée des techniques mises en œuvre sur une parcelle agricole en vue d'en obtenir une production (Sebillotte 1974) en considérant l'existence d'interactions fortes entre les techniques (choix des espèces, variétés, dates de semis, densité de semis, fertilisation, protection phytosanitaire, etc.). Par conséquent l'itinéraire technique constitue un ensemble cohérent où le choix d'une technique ne peut être raisonné indépendamment de celui de l'ensemble des autres techniques. (Bedoussac ,2009)

Par ailleurs, la notion d'itinéraire technique doit être vu comme un objet dynamique dont l'évaluation et la conception (d'un ensemble cohérent de pratiques agricoles) ne peuvent se faire qu'en référence à un objectif de production qui peut renvoyer à des considérations aussi bien économiques, environnementales, d'organisation du travail que de qualité des produits.

#### 3.1.2. Le choix des itinéraires de la mise en place de la culture :

La préparation du sol d'une parcelle consiste à réaliser une ou plusieurs opérations culturales choisies dans un ensemble de techniques classées, par ordre de profondeur décroissant, en trois catégories : sous-solage, travail profond et travail superficiel. Ces opérations ne sont toutefois pas toutes indispensables. Ainsi par exemple, le

sous-solage n'est pas pratiqué tous les ans, le labour est dans certains cas éliminé temporairement ou définitivement (Techniques culturales simplifiées (TCS) ou techniques sans labour - TSL) et l'on peut, à l'extrême, implanter une culture sans aucune préparation du sol (semis direct). (**Barthélémy et al., 1987**)

A cet effet, Les décisions quant à l'opportunité de telle ou telle opération, le choix des dates d'intervention ou des outils à utiliser, dépendent d'une série de facteurs dont les principaux sont :

- la nature et l'état physique du sol à préparer (texture, humidité, perméabilité, degré de tassement),
- la nature et à la quantité de matières à enfouir (amendements, engrais, résidus de la culture précédente, adventices, les risques associés au climat à venir (risque de sécheresse, de pluie battante, probabilité de gel.),
- les exigences propres de la culture à implanter (taille de la semence, sensibilité des racines à la structure du sol),
- les risques phytosanitaires liés à la présence de résidus rémanents ou d'agents pathogènes liés au sol ou aux résidus de la culture précédente.

Selon **Amara (2007)**, le choix de l'outil à utiliser doit se faire de façon raisonnée. Ce choix est généralement dicté par plusieurs critères, dont les principaux sont énumérés ci-dessous :

- Les exigences de la culture à mettre en place.
- Le moment d'intervention qui est lui-même conditionné par le climat.
- Les conditions d'intervention liées à l'état du sol et à celui des moyens à utiliser

Outre cela, il serait également nécessaire, de prendre en considération, le coté environnemental en essayant de respecter et en préservant les ressources naturelles, notamment les nappes d'eau, ainsi que les besoins en énergie pour la réalisation des opérations de préparation du sol.

Donc pour la préparation du sol en vue de mettre en place une culture, plusieurs techniques sont donc possibles. Le choix d'une technique est en fonction du profil cultural recherché.

### **3.1.3. Classification des itinéraires techniques**

#### **3.1.3.1. Classification des itinéraires techniques en relation avec la profondeur de travail du sol.**

Si nous excluons le sous solage, qui est une opération qui se réalise en générale et en moyenne tous les quatre ans, pour régénérer la structure du sol, les techniques de préparation du sol sont classées en fonction de la profondeur de travail du sol.

##### **3.1.3.1.1. Labour**

Les itinéraires avec labour englobent l'ensemble des itinéraires techniques dont le travail du sol profond comporte un mélange et un retournement des horizons à l'aide de la charrue à versoirs.

Les itinéraires techniques de travail du sol avec labour sont motivés par les effets du retournement du sol sur l'enfouissement des résidus de culture, le contrôle des ravageurs, des pathogènes et des adventices, et sur l'ameublissement du sol. (**Bellemou, 2012**)

Citons par exemple un itinéraire de travail du sol incluant le labour, avant le semis d'un sorgho d'été :

- moisson de la culture précédente
- labour (25 cm en moyenne) avec une charrue à versoir
- reprise du labour (cultivateur à dents ou cover-crop)
- préparation du lit de semence avec une herse rotative
- Opération de semis avec un semoir

### **3.1.3.1.2. Travail profond sans retournement**

Ces itinéraires résident dans l'utilisation de différents matériels à dents à une profondeur allant de 15 à 30 cm. En fonction de l'outil utilisé, le mélange des couches du sol sera plus ou moins intense.

Les outils à dents restructurent le sol en le fissurant sans perturber la disposition des couches de sol, il s'agit beaucoup plus d'un foisonnement, c'est-à-dire une augmentation du volume du sol, ce qui permet une infiltration des eaux de pluie et une aération. Le volume de sol travaillé peut être plus important que pour le labour, comme c'est le cas des travaux profonds avec chisel (**Debeake et Orlando, 1994**).

De nos jours, la pratique la plus courante en Algérie est l'utilisation d'un chisel pour réaliser un travail profond sans retournement. Ce travail est complété par un travail superficiel pour la création d'un lit de semences. C'est un itinéraire facile à expérimenter après sorgho fourrage pour l'implantation d'une céréale par exemple.

### **3.1.3.1.3. Travail minimum.**

Le travail minimum ou superficiel du sol correspond à un travail compris entre 5 et 15 cm. Il inclut un mélange des résidus de culture dans le volume travaillé, mais sans retournement. Ces itinéraires visent les fonctions de déchaumage, de faux semis et surtout de préparation du lit de semence. (**Olivier, 2014**)

### **3.1.3.1.4. Semis direct**

Le semis direct est un système de culture dans lequel les semences sont déposées directement dans le sol non travaillé et recouvert de végétaux ou de résidus végétaux. Seule une fente est pratiquée par des socs spéciaux (à disque, à dent ou à disque à lames latérales), le temps d'y déposer la graine. Des engrais peuvent être placés dans le sol en même temps. Avec le semis direct, au maximum 50% de la surface du sol sont remués (**Chervet et al., 2007**)

## **3.1.3.2. Classification des itinéraires par leurs objectifs**

### **3.1.3.2.1. Les systèmes conventionnels (labours)**

Le système conventionnel est caractérisé par un labour entre deux cultures, cette première étape de préparation du sol est caractérisée par un retournement de la bande de terre ; elle est suivie par les pseudo-labours et les travaux dits superficiels créant un lit de semences prêt à recevoir la graine.

En général, le nombre d'opérations de travail du sol doit être ramené à un minimum afin d'économiser de l'énergie et du temps et pour empêcher une détérioration structurale du sol. Le calendrier cultural des opérations est capital pour profiter au mieux des conditions de consistance optimale du sol et de sa maniabilité.

Si des tracteurs sont disponibles, les opérations de labour primaire peuvent être effectuées dans des conditions de sol sec, bien qu'un labour secondaire intensif soit nécessaire. Un labour profond en sol dur et sec consomme énormément d'énergie mais augmente apparemment les rendements culturaux dans les régions sèches (Arnon, 1972).

Les risques de détérioration de la structure du sol augmentent considérablement si on utilise des équipements peu adaptés pour le labour secondaire de sols labourés profondément, comme des herse traînées légères ou les rotoculteurs entraînés par la prise de force. En dehors des besoins énergétiques élevés, les risques d'érosion et de ruissellement augmentent parce que dans cette situation, la surface du sol est nue et ne sera pas protégée longtemps contre les aléas climatiques (FAO, 1997). **Certaines précautions sont donc à prendre en considération lors des labours ; comme par exemple labourer selon les courbes de niveau en pentes ou bien limiter l'émiettement par un choix approprié des surfaces actives des pièces travaillantes. Les outils à disque dans ces cas sont à éviter.**

### 3.1.3.2.2. Technique culturale simplifiée, Travail simplifié, Technique sans labour

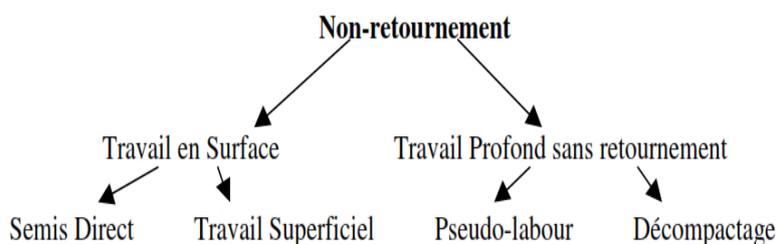
C'est travailler le sol sans retournement (sans labour) sur tout ou sur une partie des parcelles de l'exploitation, avec pour objectif à priori l'abandon définitif de la charrue.

Le non-labour n'est pas une technique occasionnelle sur la parcelle mais est pratiquée de façon continue dans le temps sur toutes les cultures de la rotation (Pajonk, 2012)

Ces techniques favorisent la biodiversité et rendent le sol moins sensible aux autres processus de dégradation.

En évitant la perte de structure causée par le labour et en permettant aux résidus de culture d'être présents dans les premiers centimètres du sol, un habitat favorable aux organismes vivants est créé ce qui améliorerait l'ensemble des propriétés du sol. En effet, l'augmentation de matière organique dans les premiers centimètres du sol constitue une réserve de nutriments indispensables qui permet le développement et l'activité des êtres vivants. Ainsi, l'ensemble de la chaîne alimentaire pourra bénéficier de l'arrêt du retournement du sol.

Ces techniques sont diverses mais peuvent toutefois être classées en 4 groupes comme suit :



**Semis direct** : Maintien d'un travail mécanique seulement sur la ligne de semis.

**Travail superficiel** : Maintien d'un travail mécanique en dessous de la zone de semis sur une profondeur limitée selon les conditions du milieu (entre 5 et 10cm).

**Pseudo-labour** : Le sol est travaillé au plus sur les 20 premiers cm, c'est à dire sur les horizons superficiels, sur l'ensemble de la surface.

**Décompactage** : Fissuration du sol sans mélange des couches.

### 3.1.3.2.3. Agriculture de Conservation

Le terme « Agriculture de Conservation » (des sols) est le terme employé internationalement. Sa définition a été retenue lors du "First World Congress on Conservation Agriculture : "a worldwide challenge" qui se déroulait à Madrid du 1-5 octobre 2001. Cette définition est la suivante :

- Absence de retournement profond du sol et implantation des cultures en semis direct
- Maintien d'un couvert végétal permanent (mort ou vivant)
- Adoption judicieuse de cultures dans une rotation suffisamment longue (rotation adaptée).

En d'autre terme, l'agriculture de conservation a pour objectif de conserver, d'améliorer et de mieux utiliser les ressources naturelles liées à la gestion des sols, de l'eau et de l'activité biologique (**Derpsch, 2001**). L'agriculture de conservation n'est pas un but en elle-même mais plutôt un concept : la gestion de la fertilité des sols est l'objectif final (**ECAF/FAO, 2001**).

## 3.2.Problématique de l'introduction du semis direct en Algérie

Le zéro-labour est une technique qui nécessite des ajustements au niveau des pratiques agricoles. Il requiert dans la plupart des cas, l'acquisition de nouveaux équipements et/ou l'achat plus important d'intrants comme les herbicides (**Mrabet, 2001**).

La question du matériel, et notamment du semoir, est donc centrale. Il s'agit d'abord de pouvoir convaincre les agriculteurs de la faisabilité du semis direct, et ensuite qu'ils puissent le tester chez eux sur de petites surfaces avant de convertir progressivement toutes leurs parcelles.

De ce fait les semoirs de semis direct disponibles en Algérie sont quasiment tous importés par des firmes étrangères ou leurs représentants locaux. Ayant été conçus dans d'autres contextes agro-climatiques et socio-économiques, ces semoirs présentent globalement deux particularités pour le paysan maghrébin : les modèles les plus diffusés sont des outils complexes et lourds prévus pour travailler de grandes surfaces; de ce fait ils nécessitent une puissance de traction importante, et leur prix d'achat est très élevé.

Hormis leur coût, le problème de ces semoirs est leur spécificité à un type de graine. C'est ainsi que les agriculteurs algériens auront besoin normalement de deux semoirs pour la rotation maïs-blé.

En semis direct, la suppression du travail du sol nécessite une utilisation renforcée des herbicides, donc un coût plus élevé, et surtout, une bonne connaissance des produits et de leur utilisation. Cette maîtrise de la lutte

chimique n'est pas acquise par tous les agriculteurs, et les parcelles en semis direct peuvent être fréquemment envahies par les adventices (**Mrabet, 2001d**).

Quelque soit le type de produit à pulvériser, c'est le matériel disponible qui, avec un réglage précis, détermine la qualité de la pulvérisation (stade, dose, régularité), et donc son efficacité technico- économique.

Or, sauf dans les grandes exploitations bien équipées, les appareils de pulvérisation sont rares et mal maîtrisés (dosages, buses, réglages, stades de traitement...). De ce fait, soit on fait l'impasse du traitement, et l'effet peut être catastrophique en semis direct, soit le matériel est emprunté ou loué, souvent dans de mauvaises conditions d'utilisation. En cas d'échec vis à vis des adventices, le producteur risque et doit souvent retravailler, c'est-à-dire labourer le sol l'année suivante. (**Vadon et al., 2006**)

Un autre problème d'ordre social est posé, il s'agit de l'accès aux connaissances et aux équipements et intrants appropriés par les simples agriculteurs L'utilisation sûre de produits chimiques est critique, surtout pour des petits agriculteurs. Le secteur public et des organisations non gouvernementales ne favorisent pas l'accès à la connaissance par la formation spécifique et pratique des agriculteurs. Des instances techniques de haut niveau sont aussi nécessaires pour soutenir la prolifération et l'extension du semis direct dans le long terme (**Delmadji, 2014**)

L'adoption du semis direct peut aussi être retardée par beaucoup de facteurs sociaux et surtout les droits sur la terre et les pratiques agraires usuels. Les droits d'utilisation de la terre sont des fois peu durables et l'investissement n'est pas encourageant (**Nassif, 2001**). En Algérie, les politiques et stratégies de développement économique sont souvent pro-urbaines qui ne présentent pas d'infrastructures rurales adéquates aux changements technologiques.

En fin, on peut conclure qu'il y a encore beaucoup d'inconnues pour les systèmes sans labour en Algérie, et abandonner le labour n'est pas une mince affaire, car il s'agit d'une pratique paysanne ancestrale à laquelle les agriculteurs sont habitués.

### **3.3. Impact des techniques culturales sur l'état structural du sol et l'environnement**

#### **3.3.1. Effet sur les propriétés physiques du sol**

##### **3.3.1.1. Structure du sol**

La structure du sol est le résultat, à un moment donné, de l'équilibre entre les phénomènes de tassement (par le passage d'engins agricoles, conditions humides d'intervention), de fragmentation (par le climat, la faune et/ou le travail du sol), d'agrégation (par des compactations modérées ou par le climat et/ou la faune) et de déplacement du sol par le travail du sol. Il en résulte que la structure du sol est très variable au sein des couches de sol cultivées non seulement dans le temps (sous l'action des systèmes de cultures, du climat) mais aussi dans l'espace. Le sol présente donc une forte variabilité spatiale des conditions locales de circulation d'eau, d'activité biologique et d'aération (**Vian, 2009**). Cette variabilité doit être maîtrisée par les agriculteurs pour répondre correctement aux exigences de la culture.

Dans les systèmes labourés, 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 (**Oorts, 2006**). La modification de la structure du sol sous l'action mécanique dépend de la texture et de l'état d'humidité du sol au moment de l'intervention. Dans le cas des conditions climatiques favorables pour les travaux du sol, l'influence de l'action des outils aratoires se manifeste par la modification de la structure du sol :

- Modification de la forme et de la taille des éléments terreux ou des mottes
- Modification des éléments structuraux (agrégats de différentes formes : grumeleuses, particulières et prismatiques) ;
- Obtention des mottes de différentes tailles et de terre fine (accroissement de la porosité et de la perméabilité).

Mais dans le cas des conditions climatiques défavorables, l'action des outils aratoires contribue à un gâchage de la structure par :

- Le lissage et le tassement du sol en profondeur ;
- La création de mottes ;
- Les éléments structuraux perdent de leur individualité et se rassemblent entre eux.

Il en résulte que la structure d'un sol labouré est extrêmement hétérogène. Elle est composée de l'assemblage de sol fin, de mottes compactées ou non (décimétriques), de résidus de cultures répartis le long de la bande de labour, de vides et de fissures issus de l'action de retournement, de déplacement et de fragmentation de la charrue sur la couche de sol labourée (**Vian, 2009**).

A l'inverse, la structure d'un sol non travaillé est plus homogène et présente souvent une structure plus massive composée de macro-pores d'origine biologique. Les fissures et les vides sont en général moins importants dans les sols non travaillés ou dans les systèmes de travail du sol réduit du type chisel. Par ailleurs, les résidus de cultures ne sont pas enfouis en profondeur et sont concentrés en surface ou dans les premiers centimètres de sol, améliorant la stabilité structurale du sol (**Vian, 2009**).

### 3.3.1.2. La perméabilité du sol

La conductivité hydraulique du sol ( $K$ ) dépend du volume poral. Plus ce dernier augmente et plus la conductivité hydraulique est susceptible d'augmenter. Elle dépend également de la continuité, donc de la morphologie de l'espace macro-poral. Les résultats sont souvent très variables selon les sites d'études, et les méthodes mises en œuvre (**Bottinelli, 2010**). Comparé à un sol travaillé, la quantité de potassium ( $K$ ) dans un sol en semis direct peut être augmentée, similaire ou diminuée. En fait, cette variabilité s'explique par les différences d'évolution du réseau poral au cours du temps entre un sol labouré et un sol en semis direct.

La continuité verticale des macro-pores développe la capacité d'évacuer l'eau vers les horizons les plus profonds, sous réserve qu'ils ne soient pas saturés en eau.

D'autre part, le non travail du sol favorise l'activité biologique et notamment les populations de vers de terre (**Longueval, 2005**). Des bio-pores peuvent aussi être créés par des racines. La fissuration des sols argileux

favorise par ailleurs la continuité des macro-pores. Cette dernière est à l'origine de flux hydriques préférentiels qui accélèrent l'infiltration de l'eau.

Ces remarques ou constats, peuvent être illustrés par les résultats **d'Anken et al. (2004)** qui ont comparé deux sols travaillés profondément à un semis direct, après infiltration d'eau colorée ; Les sols travaillés ont une couche arable plus colorée que le sol en semis direct, en relation avec la quantité de macro-pores de cet horizon. Dans l'horizon 0-25 cm des sols sous semis direct, ce sont essentiellement les galeries de vers de terre qui sont teintées.

A partir d'observations réalisées sur les fuites de nitrates, formulent l'hypothèse que les flux préférentiels constatés sur sol non travaillé peuvent avoir des conséquences différentes sur les flux de polluants, selon leur localisation dans le profil de sol. Des molécules présentes à la surface du sol seraient plus sensibles à la lixiviation dans ces conditions (perte de nutriments végétaux hydrosolubles du sol, qui sont dissous et entraînés par les eaux d'infiltration). Par contre, des polluants présents dans les agrégats ou dans la microporosité seraient moins sujets aux flux par infiltration en semis direct (**Labreuche, et al., 2007**)

### 3.3.1.3. Masse volumique et porosité du sol

Réduire l'intensité et la profondeur du travail du sol conduit en général à une augmentation de la masse volumique du sol mais pas au-delà de l'ancien fond de labour. L'absence de fragmentation des anciennes couches de sol travaillées entraîne une diminution de leur espace poral. L'augmentation de la masse volumique du sol est toute fois moins importante dans les systèmes de travail du sol réduit que dans les systèmes type semis direct (**Vian, 2009**), voire inférieure sur 0-10 cm. Les socs du chisel, en fragmentant le sol, réduisent la prise en masse du sol sur la profondeur de travail de l'outil et à long terme (> 11 ans), il semblerait que la densité apparente du sol soit identique à celle d'un sol labouré (**D'Haene et al., 2008**).

Par contre, la masse volumique de la couche de solde surface (0-5 cm) est favorisée dans les systèmes de non travail du sol ou de travail du sol réduit par rapport à un labour en raison de la présence d'un mulch en surface. L'effet des différentes techniques de travail du sol sur la structure diffère selon le type de sol. Les sols sensibles aux tassements, comme les sols sableux, se prêtent moins à l'abandon du labour car leur faible activité structurale limite la régénération de la structure du sol par les phénomènes naturels de retrait-gonflement (**Munkholm et al., 2003**).

Le non retournement des couches de sols par la charrue ou les techniques de travail superficiel, surtout les techniques de semis direct, favorisent l'activité fouisseuse de la faune du sol, et la présence de bio-pores contribue donc à diminuer les effets de ces techniques sur la masse volumique du sol sur le long terme (au de là de 10 années d'adoption de ces techniques) (**Huwe, 2003**).

L'augmentation de la masse volumique du sol dans les anciennes couches labourées fait que la porosité totale du sol est globalement réduite dans les systèmes de conservation. La forme, la taille et la continuité de l'espace poral changent également selon le type de travail du sol appliqué. L'effet des techniques de travail du sol sur la micro (<0,2 µm) et la méso-porosité (0,2-30 µm) du sol varie selon le temps d'application et la profondeur de travail de l'outil considéré.

### 3.3.1.4. La conservation de l'eau

De nombreuses études s'accordent à affirmer que le sol non travaillé retient plus d'eau, du fait de la modification de l'espace poral mais aussi du fait de la présence des résidus en surface qui réduisent l'évaporation. D'après **Al-ouda (2010)** la quantité de l'eau dans les premiers 20 cm de profondeur du sol a diminuée significativement d'un type de travail de sol à un autre comme suit : Semis Direct, Technique Culturelle Simplifiée, Technique Conventionnelle.

Dans une culture de blé dur au niveau de l'horizon (0-20cm), **Abdellaoui et al., (2011)** affirment que le semis direct et les travaux simplifiés permettent une meilleure rétention en eau par rapport au labour conventionnel avec la charrue au soc. Dans une étude comparative de la dynamique de l'eau dans les couches du sol entre la technique du Semis Direct et celle de conventionnel effectuée en Tunisie ayant montré que le non labour valorise mieux les apports d'eau en préservant de l'eau présente dans le sol avec un écart de 5% en sa faveur (**Nouiri et al., 2004**). La non manipulation du sol et le maintien d'un couvert végétal aident à prolonger la durée du dessèchement de la surface et gardent le sol plus humide une période du temps plus longue.

### 3.3.2. Effet de la technique culturale sur les propriétés chimiques du sol

Les résidus de culture sont enfouis plus ou moins profondément et régulièrement selon le mode de travail du sol appliqué. Ces modifications changent l'accessibilité et la disponibilité des substrats organiques pour les microorganismes du sol et le turn-over de la matière organique du sol.

#### 3.3.2.1. Teneurs et stocks en Carbone (C) et azote (N) totaux

Les systèmes de travail du sol de conservation laissent plus de 30 % des résidus de cultures en surface ou les concentrent dans les premiers centimètres du sol. Le labour quant à lui enfouit et répartit ces résidus de cultures sur la profondeur de sol labourée. Ce changement dans la répartition des résidus de cultures au sein du profil de sol va avoir des conséquences à plus ou moins long terme sur les teneurs et stocks des matières organiques du sol et des éléments nutritifs (**Vian, 2009**).

Les concentrations en Carbone et en azote organique dans les systèmes de conservation sont en général supérieures dans les 10 premiers centimètres du sol par rapport à un sol labouré et décroissent fortement dans les horizons sous-jacents (**D'Haene et al., 2008**). Par conséquent, les stocks de C et N organiques ( $t\cdot ha^{-1}$ ) dans les systèmes de conservation sont supérieurs en surface par rapport aux systèmes labourés mais peu de différences apparaissent en profondeur.

Les teneurs en carbone (C) organique sont maximales dans les 5 cm supérieurs du sol. Elles diminuent avec la profondeur parce que les résidus végétaux ne sont pas enfouis et se décomposent en surface. Dans le système conventionnel, au contraire, les teneurs en C organique sont homogènes dans les premiers 30 cm et plus abondantes entre 30 et 40 cm que sous semis direct, du fait de l'enfouissement des résidus végétaux au fond du sillon, où ils se décomposent lentement (**Müller et al., 2008**).

Certains auteurs montrent même que malgré une concentration en C et N plus importante en profondeur en labour (15-30 cm), les stocks de C et N sont supérieurs en semis direct du fait de l'augmentation de la densité apparente de cette couche de sol (**Gál et al., 2007**). Cette stratification verticale des stocks de C et N engendrée par les techniques de conservation se fait rapidement après leur adoption et les principaux changements apparaissent au cours des 3 premières années de leur application.

Quand les stocks de C et N organique sont rapportés à l'ensemble de la couche de sol labourée (en général 0-30 cm), certaines études montrent que les techniques de conservation, notamment les techniques de semis direct, ont un potentiel de stockage de la matière organique du sol plus important que les techniques conventionnelles (**Baker et al., 2007**). A l'inverse, d'autres montrent que les techniques de travail du sol n'ont que peu d'effets sur ces stocks (**D'Haene et al., 2008**).

L'augmentation des stocks de C et N n'est également que transitoire car le gain obtenu après quelques années d'adoption des techniques de conservation peut être perdu lorsque le sol est labouré de nouveau (**Conant et al., 2007**). Cette augmentation dépend aussi du type de sol et semble moins importante voire nulle dans les sols sableux.

Par ailleurs, certains auteurs relèvent l'importance de la méthode d'échantillonnage dans l'estimation de ces stocks. En effet, si globalement les techniques de travail du sol de conservation stockent plus de matière organique du sol sur 0-30 cm, il apparaît que le stock de matière organique du sol est supérieur en dessous de 30 cm dans les sols labourés ce qui contribue à surestimer la capacité des techniques de conservation à augmenter le stockage du Carbone dans les sols. Ainsi, **Gál et al. (2007)** indiquent que les stocks de C et N entre 30 et 50 cm de profondeur sont supérieurs de 32 et 23% dans les sols labourés et qu'en considérant la couche 0-50 cm, le gain de stockage supplémentaire du non travail du sol par rapport au labour n'est plus que de 6 et 11 % respectivement pour le Carbone et l'azote.

**Baker et al. (2007)** montrent que cette perte de Carbone en profondeur dans les systèmes de conservation conduit à une perte globale de cet élément d'environ  $0,23 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$  par rapport aux systèmes labourés. Cette baisse des stocks de Carbone en profondeur est liée au système racinaire des cultures qui est plus dense en surface dans les systèmes de conservation mais qui explore une profondeur de sol moins importante que dans les systèmes labourés, d'où une diminution de la rhizo-déposition en profondeur et une baisse des entrées du Carbone.

Le rapport C/N de la matière organique du sol dans les systèmes de conservation est en général supérieur à celui des systèmes labourés en surface là où les résidus de culture s'accumulent, et peu de différences apparaissent en deçà (**Vian, 2009**).

### 3.3.2.2. Azote minérale

L'azote inorganique du sol constitue la fraction disponible pour les cultures. Le sol en contient rarement plus de 10% d'azote inorganique total (**Scheiner, 2005**).

Dans le sol, l'azote minéral se présente généralement sous la forme de nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ), qui est très mobile et qui peuvent facilement être lessivée avec les eaux de percolation, notamment pendant la saison pluviale. Les

travaux sur l'effet des techniques de travail de sol sur les niveaux de l'azote minéral au cours de l'année donnent des résultats parfois divergents. Certains auteurs ont montré que dans la plupart du temps, au cours de cycle cultural, les niveaux d'azote minéral sont semblables dans les sols labourés ou en semis direct, voire quelques fois supérieurs en fin d'hiver dans les sols en semis direct.

La minéralisation de l'azote se déroule d'une manière plus continue et dure plus longtemps en semis direct qu'avec le labour (**Zihlman et al., 2001**). La dynamique de minéralisation des composés organiques modifiée en semis direct et le pic de minéralisation concomitant au travail du sol n'existe plus ; la composition des microorganismes décomposeurs, dominé par les champignons, favorise l'immobilisation de l'azote au détriment de sa minéralisation.

Qu'il s'agisse de sols argileux, de sols sableux ou de sols limoneux, les effets du mode de travail du sol sur la lixiviation du nitrate ne sont pas significativement différents (**Catt et al., 2000, Stoddard et al., 2005**). En revanche, d'autres auteurs, ont observé des concentrations de nitrate dans l'eau drainée significativement plus élevées sous labour que sous semis direct ou pseudo labour mais des pertes d'azote peu différentes (**Little et al., 2005**).

### 3.3.2.3. Phosphore

Les techniques de travail du sol influencent, en premier lieu, le mode de distribution dans le sol du phosphore apporté par l'engrais, les matières organiques exogènes et les résidus des cultures. Quelles que soient les techniques mises en œuvre, elles sont sans effet notable sur les teneurs en phosphore, en général très faibles, des couches de sols situées au dessous de la plus grande profondeur de travail. A ce niveau, en raison de la capacité qu'ont les racines à absorber du phosphore dans la solution du sol jusqu'à des concentrations de quelques mg/l, les teneurs du sol en phosphore demeurent généralement très faibles avec pour corollaire l'existence d'un fort pouvoir fixateur pour cet élément (**Boudiar, 2013**).

Dans l'horizon de surface, les opérations culturales qui réalisent un retournement ou un malaxage du sol tendent à homogénéiser le phosphore dans le volume travaillé. Par contre celles qui n'engendrent pas de mélange des couches travaillées, conduisent à l'instauration d'un gradient de teneurs décroissantes avec la profondeur (**Sharpley, 2003**), très fortement marqué dans le cas du semis direct. La création de ce gradient s'accompagne d'un enrichissement de la couche de surface qui interagit avec l'eau qui ruisselle. Ce phénomène est d'autant plus fort que les apports de phosphore sont abondants.

### 3.3.2.4. Autres éléments minéraux

Le non retournement du sol, en semis direct, conduit à un enrichissement en éléments minéraux des premiers centimètres de sol par rapport à une situation avec labour. D'un autre côté, en semis direct, les quantités d'éléments minéraux peuvent être réduites en profondeur, notamment le phosphore et le potassium. L'émission de protoxyde d'azote est favorisée dans un sol non travaillé. D'autre part, si des études rapportent que le lessivage des nitrates peut être réduit lorsque le sol n'est plus travaillé (**Liu et al., 2006**).

Le type de système racinaire pourrait être donc un bon indicateur pour le choix de la technique de mise en place des cultures ; pour les cultures à racines fasciculées, comme les céréales, le choix se porterait sur le semis direct.

### **3.3.3. Effet des techniques culturales sur les propriétés biologiques**

#### **3.3.3.1. La matière organique du sol**

##### **3.3.3.1.1. Importance de la matière organique du sol**

La matière organique du sol est composée d'éléments organiques (restes de racines, de plantes, excréments, exsudats...), d'organismes vivants (bactéries, champignons, faune du sol...) et d'humus, produit final stable de la décomposition des éléments organiques sous l'action des organismes du sol. Il existe différentes formes de matière organique dans le sol : libre ; particulaire incluse ou non dans les agrégats ; associée aux agrégats. L'essentiel du stock de matières organiques est présent dans la couche arable ou l'équivalent de l'ancienne couche labourée (**Bellemou, 2012**).

L'augmentation de ces teneurs s'accompagne d'une amélioration de la structure, de la facilité de l'infiltration de l'eau, de l'accroissement de la capacité de la rétention en eau, ainsi que du pouvoir de résistance à l'érosion. En outre, avec ses propriétés colloïdales, son caractère de substance fixatrice d'élément et son pouvoir chélation, elle joue un rôle chimique important dans les sols; libération d'élément nutritifs après minéralisation et augmentation de la capacité d'échange cationique. Elle joue aussi un rôle environnemental capital en participant à contrer le phénomène de désertification et en diminuant, lorsque sa teneur augmente dans les sols, le dégagement de gaz carbonique pouvant rejoindre l'atmosphère et accroître les quantités des gaz responsable de l'effet de serre (**FAO, 2008**).

Au niveau agricole sa présence contribue à une bonne nutrition des espèces cultivées, ce qui se traduit par l'augmentation des rendements et l'amélioration de la production.

La matière organique est la source principale d'azote dans le sol. C'est un composant labile nécessitant une source de renouvellement. Toutefois, la perturbation du sol par le labour provoque généralement une diminution du taux de la matière organique, favorise l'érosion éolienne et hydrique et de ce fait provoque un déclin de la productivité de la plante cultivée. Le maintien des résidus de récolte en surface du sol peut contribuer à la synthèse d'une nouvelle matière organique. La MO constitue souvent le ciment organique liant les fines particules entre elles et formant ainsi les agrégats. Elle ralentit la pénétration de l'eau de pluie dans les agrégats et permet l'augmentation du taux des agrégats hydro-stables (**Boudiar, 2013**).

##### **3.3.3.1.2. Influence des pratiques culturales sur la matière organique**

La matière organique du sol est un mélange de divers composés allant des résidus de culture frais à des composés humiques relativement inertes dont le turn-over se mesure en millénaire et sa mesure ne fournit pas toujours une indication précoce d'un changement dans le statut organique du sol.

Les pools labiles (En fertilité des sols, ce terme fait référence aux formes des éléments nutritifs dans la solution et à celles qui sont liées de manière lâche. Ce sont les formes facilement échangeables et disponibles, utilisables par les plantes, d'un élément nutritif dans le sol. L'ensemble des formes labiles d'un élément nutritif dans le sol représente le pool de substances labiles. Plus le pool de substances labiles est grand, plus le sol est fertile. Il est le plus souvent constitué de formes solubles dans l'eau, échangeables ou facilement adsorbées) (**aquaportail, 2015**) de la matière organique du sol (matières organiques particulières, C soluble...) ont quant à eux un turn-over plus rapide et sont plus sensibles que la teneur totale en matière organique du sol aux changements de pratiques culturales ou de conditions environnementales. Ainsi, ces pools peuvent être utilisés comme des indicateurs précoces des modifications de la matière organique du sol totale qui se manifestent à plus long terme.

Les matières organiques particulières représentent un pool transitoire entre les résidus de culture frais et les matières organiques du sol humifiées. Enrichi en C et en nutriments, elles représentent un attribut important de la qualité du sol puisque leur turn-over court en fait une source de C et d'énergie pour les microorganismes du sol hétérotrophes (**Haynes, 2005**).

Le travail du sol en modifiant la répartition et parfois la quantité de résidus de cultures retournés au sol, affecte également la qualité des matières organiques particulières. Ainsi, les systèmes de conservation ont une plus grande part de matière organique particulière que les sols labourés en raison notamment de la protection physique de matière organique du sol qui protège la matière organique du sol de l'activité microbienne dans les systèmes de conservation (**Bouadiar, 2013**).

Les systèmes de travail du sol de conservation laissent plus de 30 % des résidus de cultures en surface ou les concentrent dans les premiers centimètres du sol. Le labour quant à lui enfouit et répartit ces résidus de cultures sur la profondeur de sol labourée. Ce changement dans la répartition des résidus de cultures au sein du profil de sol va avoir des conséquences à plus ou moins long terme sur les teneurs et stocks des matières organiques du sol et des éléments nutritifs (**Ouanzar, 2012**).

**Bessam et Mrabet (2001)** ont trouvé que le taux de matière organique évolue de façon remarquable sous semis direct en fonction du temps, alors que sous travail classique, le sol garde sensiblement les mêmes teneurs. En Tunisie, **Ben Hammouda et al. (2004)** ont également affirmé après une expérimentation de 3 années, que le semis direct améliore le taux de matière organique dans le sol, soit 2,6% contre 2,3% mesuré en mode conventionnel. **Mrabet (2004)**, ajoute que seul le semis direct améliore le niveau de matière organique de la surface du sol, après avoir comparé l'utilisation de différents outils aratoires avec le non labour. **Bourguignon (2004)** révèle que la matière organique augmente de 0.3% la première année à la 3ème année de conduite en semis direct sur un sol argileux en Tunisie. Une augmentation annuelle de 0,1 à 0,3% de matière organique du sol est observée en Amérique du Sud d'après le même auteur.

### 3.3.3.1.3. Faune dans le sol

Le labour affecte négativement les populations de vers qui sont atteintes directement via des dommages mécaniques, une exposition aux prédateurs et un phénomène de dessiccation dû au retournement du sol. Le

labour affecte la densité, la biomasse mais également la composition et la diversité des communautés de lombriciens (**Chan, 2001**). Les vers endogés (vers de terre qui vivent en permanence dans le sol) sont les moins touchés par cette pratique et peuvent même être favorisés par l'enfouissement des matières organiques dans le sol.

Pour la faune dans le sol, le travail du sol superficiel est nettement moins néfaste que le labour car il est moins profond et ne retourne pas le sol, mais il peut tout de même porter préjudice aux populations de vers de terre, notamment à travers la destruction des habitats. Le semis direct, quant à lui, favorise le développement des lombriciens, et en particulier le retour des anéciques. Certains auteurs, ont montré qu'après plus de 5 ans, la biomasse lombricienne était de 180 kg/ha pour le labour, 500 kg/ha pour le travail superficiel et 1500 kg/ ha pour le semis direct. (**Tebrüge et Düring, 1999**)

### 3.3.4. Influence des techniques culturales sur les mauvaises herbes

En Algérie, les mauvaises herbes se sont progressivement multipliées pour couvrir des superficies de plus en plus importantes, surtout en céréaliculture. Les mauvaises herbes les plus couramment recensées sont : le brome, le phalaris, le ray gras, le vulpin et la folle avoine pour les Poacées et la moutarde, la ravenelle, le gaillet et le coquelicot pour les dicotylédones (**Hamadache et al., 2002**).

Le travail conventionnel du sol consiste à désherber mécaniquement, ameublir et à préparer le lit de semence afin d'assurer une densité de peuplement satisfaisante et un bon rendement. Avec le progrès des techniques agricoles, on assiste ces derniers temps, à une évolution des méthodes du travail du sol qui vise à supprimer entièrement le labour ou à en diminuer son intensité. Selon **Cowbrough (2002)**, la simplification du travail du sol ne peut être une solution durable que si le désherbage chimique, avec tous ses risques de pollution du sol et de la nappe phréatique, est mieux maîtrisé.

La flore adventice des cultures est fortement affectée par les systèmes de production agricole. En effet, toute modification des pratiques culturales se répercute sur la structure de cette flore, il a été démontré que le labour favorise les adventices annuelles alors que le semis direct favorise le développement des graminées et des vivaces (**Vulioud et al., 2006**). Ainsi la transition du semis conventionnel au semis direct peut engendrer une inversion de la flore adventices et l'apparition de nouveaux problèmes de désherbage.

Il a été démontré à travers des expérimentations effectuées au niveau de l'ITGC- Oued Smar, que l'infestation par les mauvaises herbes peut diminuer notablement le rendement des blés de 50 à 60% (**Hamadache et Abdellaoui, 2011**). Les résultats du suivi de l'évaluation de l'infestation par les mauvaises herbes sur les trois modes de travail du sol (travail conventionnel, travail minimum et semis direct) sont consignés dans le tableau ci-dessous.

La lutte contre les mauvaises herbes constitue un des avantages du travail du sol conventionnel. Cependant, la première année de la suppression du labour, la culture est sujette à une forte infestation en mauvaises herbes, traduisant ainsi une densité élevée d'adventices recensée sur la parcelle non labourée

**Tableau 4 :** Evolution de l'infestation des mauvaises herbes (plants/m<sup>2</sup>)

	Année 1			Année 3			Année 5		
	Dicot	Mono	Total	Mono	Dicot	Total	Mono	Dicot	Total
SD	979a	5	984a	3	70	73	54.8a	259.4a	314.2a
TC	245b	4	249b	4	59	62	9.3b	38.3b	47.6b
TM	358b	6	264b	3	87	88	13.0b	79.8b	92.8b

Source : Abdellaoui et al, (2011)

Toutefois, le niveau d'infestation en mauvaises herbes a diminué de 68% en 5<sup>ème</sup> année de conduite culturale en semis direct. Le respect de la rotation culturale (blé/bersim), accompagné d'un meilleur contrôle chimique des adventices a défavorisé l'accroissement de l'infestation des mauvaises herbes. La culture de bersim suite à différentes fauches, élimine un grand nombre d'espèces de mauvaises herbes. En conditions de non labour, la rotation culturale et le traitement phytosanitaire sont donc inévitables (Abdellaoui et al, 2011).

Le système non labour ne peut être durable que par la maîtrise de la propagation des mauvaises herbes. Les graines de mauvaises herbes enfouies ne sont pas exposées à la surface comme c'est le cas par les travaux du sol. La banque de graines de mauvaises herbes semble donc diminuer en semis direct, rare sont les apparitions soudaines et tardives des mauvaises herbes car aucun travail du sol ne ramène les graines à la surface (CDSR, 2001).

Rahali et al., (2010) ont étudiés l'influence de l'itinéraire technique sur le stock semencier de mauvaises herbes de la zone semi-aride de Sétif, et ils ont constaté que le stock semencier le plus faible est dans l'horizon 15-30 cm de la parcelle conduite en semis direct avec 2800 grains/m<sup>2</sup> et la densité la plus élevée est de l'ordre de 7900 grains/m<sup>2</sup>, pour le travail conventionnel.

Dans ce même contexte, les mêmes auteurs rapportent que les différents types de travail du sol ont un impact certain sur la distribution verticale des semences de mauvaises herbes dans le profil du sol ; après un labour ils ont observé une localisation préférentielle des semences entre 10 et 20 cm de profondeur. Les différences observées sont en fonction de la profondeur de sol et la taille des semences.

Toujours, selon les mêmes auteurs, dans le cas des techniques simplifiées, la localisation des semences devient de plus en plus superficielle avec le temps, notamment si le désherbage est imparfait ; l'essentiel des semences se trouve entre 0 et 10 cm. Le nombre d'espèces présentes varie selon la technique culturale.

Un contrôle des adventices sévère est néanmoins important au cours des premières années de transition. Au cours de cette période, le taux d'infestation floristique et la levée des graminées annuelles ont tendance à augmenter surtout avec les cultures continues. Pour cela, il faut essayer d'envisager une démarche efficace pour la lutte contre les mauvaises herbes par la prévention, la compétitivité des cultures, la rotation des cultures et un désherbage chimique. Il est conseillé d'appliquer des herbicides résiduels à action foliaire et racinaire qui sont relativement peu coûteux, tels que les herbicides anti-dicotylédones qui permettent un contrôle adéquat des mauvaises herbes. En effet, ces herbicides sont caractérisés par leur rémanence dans le sol et leur large spectre d'action (El-Brahli et Mrabet, 2000).

En semis direct, la suppression du travail du sol nécessite une utilisation renforcée des herbicides, donc un coût plus élevé, et surtout, une bonne connaissance des produits et de leur utilisation. Cette maîtrise de la lutte

chimique n'est pas acquise par tous les agriculteurs, et les parcelles en semis direct peuvent être fréquemment envahies par les adventices (CDSR, 2001).

### 3.3.5. Effet des techniques culturales sur les propriétés mécaniques du sol

Parmi les propriétés mécaniques nous retiendrons la plus importante qui est la résistance mécanique à la pénétration. Cette propriété nous renseigne sur les possibilités de pénétration des racines dans le sol. La résistance à la pénétration, en unités de pression, est le quotient entre la force d'opposition du sol lors de la pénétration, à une certaine profondeur, divisé par la surface de la base du cône employé dans le pénétromètre.

#### 3.3.5.1. Résistance pénétrométrique du sol.

La résistance pénétrométrique du sol, est l'un des indicateurs souvent utilisés pour évaluer rapidement l'ampleur du compactage des sols et la localisation de la zone tassée. Elle est influencée par la texture (structure particulière), la cohésion (les forces de cohésion favorisant la formation d'agrégats) et la densité du sol ainsi que l'humidité. L'étude menée par **Amara et al. (2014)**, concernant l'Effet des techniques culturales sur la résistance pénétrométrique du sol, ont montré que la résistance pénétrométrique augmente de la technique conventionnelle à la technique du semis direct. Elle passe respectivement de la valeur de 13,75 daN / cm<sup>2</sup> pour la technique conventionnelle (TC) à 15,09 daN / cm<sup>2</sup> pour le travail minimum (TM) puis atteint la valeur de 15,84 daN / cm<sup>2</sup> pour le semis direct (SD). La pointe du pénétromètre pénètre plus en profondeur sur la parcelle travaillée avec la méthode conventionnelle (19,4 cm) ensuite sur les parcelles avec travail minimum à 15,05 cm puis ensuite la profondeur atteint 14,02 cm pour le semis direct.

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.

Selon les résultats d'**Adli et Feddal (2008)**, la résistance pénétrométrique du sol diminue fortement après le labour, cependant elle remonte légèrement après le passage du cover-crop et du cultivateur à dent. La résistance pénétrométrique est fortement influencée par la teneur en eau dans le sol, pour cela le choix correct du moment d'intervention avec les pièces travaillantes est important.

#### 3.3.5.2. Effet sur l'environnement

Au niveau mondial, l'impact du travail du sol sur l'environnement est fréquemment mis en avant dans de nombreux pays. En effet, dans des contextes pédoclimatiques très sensibles à l'érosion, le labour ou de nombreux passages d'outils de travail du sol peuvent avoir des impacts négatifs sur la protection des sols et sur l'environnement. Le phénomène du dustbowl (bol de poussière) dû à une pulvérisation excessive du sol, et ses conséquences sociales a par exemple été décrit aux Etats-Unis en 1939 dans l'ouvrage de John Steinbeck « Les raisins de la colère ». Pour y remédier, des systèmes de cultures basés sur une forte réduction des passages d'outils de travail du sol, voire sur du non travail du sol, y ont été développés en partie pour ces raisons. Ces techniques d'implantation très « simplifiées » se sont quasiment généralisées dans certains pays comme le Brésil.

Leur impact sur l'environnement y est fréquemment décrit de manière positive avec comme exemple la protection des sols, la protection des eaux par réduction du ruissellement ou encore la réduction des émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère (**LABREUCHE, et al., 2007**)

### 3.3.5.3. L'érosion et le ruissellement

L'érosion est un phénomène résultant de l'élimination des particules de sol transportées par l'eau qui ruisselle ou le vent, et qui peut être aggravé par les activités humaines. L'érosion physique est influencée par différents facteurs comme la texture du sol, le climat, les successions de culture, les outils utilisés, la saison, la pente et la taille des parcelles.

L'érosion conduit à une diminution de l'épaisseur du sol en place et à une altération de ses fonctions, et à terme à la disparition du sol lui-même. Elle peut également avoir des impacts négatifs en dehors de l'espace agricole ou forestier : inondations, coulées de boues, pollutions.

Selon des estimations d'experts, 26 millions d'hectares dans l'UE sont affectés par l'érosion hydrique et 1 million d'hectares par l'érosion éolienne. Plusieurs études ont montré qu'ils étaient considérables : entre 700 millions et 14 milliards d'euros par an dans l'UE (**Labreuche, et al., 2007**).

Selon les études menées par le groupe 'érosion' sur 22 références françaises et européennes ; les résultats ont montré que les techniques de conservation pouvaient être très efficaces pour réduire l'érosion, avec toutefois une variabilité très importante des résultats. Ainsi, en comparaison avec le labour, l'érosion est réduite dans 83% des cas avec un pseudo-labour, dans 90% des cas pour le travail superficiel et dans 85% des cas pour le semis direct.

L'efficacité des techniques de conservation, en terme de réduction des quantités de terre érodée, est très variable selon les situations mais elle est souvent impressionnante : en semis direct par exemple, on observe dans ces références une réduction de l'érosion d'un facteur supérieur à 5 dans plus de 60% des cas (**Labreuche, et al., 2007**).

L'ensemble des résultats montre que la présence d'un couvert végétal significatif en surface est un facteur majeur de réduction des risques d'érosion. Cette couverture du sol peut être constituée par les résidus de la culture précédente qui ne sont plus enfouis par un labour ou bien par une plante de couverture semée pendant l'interculture. Cette couverture du sol permet une réduction de l'érosion d'un facteur 1 à 10 (**Bundy et al., 2001**). Pour que cette couverture du sol soit efficace, les auteurs considèrent qu'il faut dépasser un taux de couverture seuil de 25 à 40% de la surface du sol.

Lors d'une pluie, l'état du sol peut jouer sur le volume d'eau qui ruisselle, ainsi que sur les voies de circulation de l'eau dans le sol. L'effet du travail du sol est étudié grâce à des dispositifs de mesures du ruissellement (gouttières en bas de pente), Dans un essai en Italie avec une pluviosité moyenne annuelle de 846 mm, plusieurs chercheurs ont observé que la simplification du travail du sol s'est accompagnée d'une réduction du ruissellement de 5% en année sèche, et de 64% en année humide. Ainsi que sur un sol limoneux avec une pente de 9% le ruissellement était deux fois et demi plus fort sur sol labouré qu'avec le semis direct ou le pseudo-

labour. Notons que, dans cet essai, le ruissellement observé dans le cas du pseudo-labour était plus proche de celui observé avec le semis direct qu'avec le labour. Au cours des 4 années de mesures du ruissellement effectuées sur un sol avec une pente de 9%, **Shipitalo et al. (2000)** ont également observé des écarts considérables entre semis direct (ruissellement de 2 mm par an en moyenne) et labour (178 mm par an).

Dans ce même contexte, des travaux de recherche ont été réalisées au niveau de l'université de Gand en Belgique sur l'impact des techniques culturales sans labour sur le ruissellement et l'érosion des sols, les résultats montrent que ces phénomènes est fortement influencé par la présence ou non d'une compaction du sol survenue l'année antérieure (essentiellement lors d'une récolte sur sol humide). Les techniques de conservation, surtout lorsqu'ils sont effectués en conditions humides, n'ameubliront pas les sols compactés.

Par contre, en absence de compaction et lorsque le travail est effectué en conditions sèches, les parcelles non travaillées montrent en moyenne moins de ruissellement et de pertes de sol que les parcelles labourées.

Cependant, lorsqu'il y a risque de compaction les parcelles non travaillées présentent plus de ruissellement et de pertes de sol car la compaction ne peut pas être corrigée par les techniques de conservation. Si on considère l'ensemble des années (années avec et sans compaction), les mauvais résultats obtenus pendant les années de compaction camouflent les effets positifs des années pendant les quelles les travaux aratoires ont été réalisés dans de bonnes conditions (**Vermang J. et al., 2010**).

#### 3.3.5.4. Le tassement du sol

Le tassement du sol résulte d'une réorganisation de ses constituants solides suite à l'application d'une pression dont l'effet se propage du point d'application vers les côtés mais surtout vers le bas (ondes de propagation). Le tassement (ou compactage) se fait par le mouvement des agrégats jusqu'à atteindre un nouvel équilibre entre la résistance qu'oppose le sol et la pression exercée. L'arrangement spatial, la taille, la forme, et l'état interne des agrégats déstabilisés sont modifiés, conduisant à la formation d'agrégats anguleux ou aplatis, une diminution de la porosité, en particulier les grands pores (et donc une augmentation de la densité du sol) et la rupture de la continuité des pores. Par exemple, sous l'effet du passage d'un tracteur dont le poids est transmis au sol par les pneus, le sol se densifie jusqu'à pouvoir porter cette charge. La conséquence visible en surface est la formation d'une ornière. (**Prosensols, 2011**)



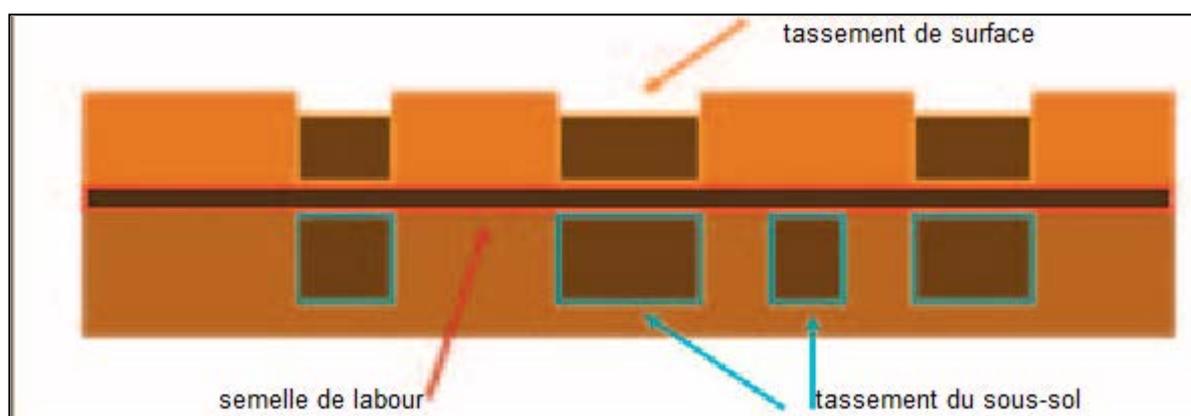
**Figure 1** : Formation d'ornières sous le poids d'un engin ayant circulé sur un sol trop humide.

Source: UCL, (2011)

Le tassement de surface se limite à la couche arable (selon les situations, jusqu'à 20 à 30 cm de profondeur). Il s'observe suite au passage des roues des engins agricoles. Son intensité est d'autant plus grande que la pression exercée sur le sol est importante et que le sol est humide ou meuble.

La semelle de labour est une couche compacte et peu perméable à l'eau, aux racines et aux vers de terre. D'une épaisseur de quelques centimètres, elle se trouve juste en-dessous de la couche arable. Formée par répétition du labour à une même profondeur, elle est exacerbée par un soc de charrue non affûté qui écrase le sol en-dessous.

Le tassement du sous-sol peut dépasser largement la semelle de labour et atteindre une profondeur de 60 cm (et plus). La semelle de labour et les cailloux présents dans le sous-sol protègent quelque peu ce dernier contre d'importantes charges en surface (**Prosensols, 2011**).



**Figure 2** : Le tassement de surface avec ornière, la semelle de labour, et le tassement du sous-sol.

Source : VLM, (2011)

Le développement racinaire est entravé et ne permet qu'une exploration partielle du volume du sol. L'assimilation de nutriments peu mobiles, tel que le phosphore et le potassium, est réduite. L'eau plus fortement retenue dans un sol tassé ou présente sous la semelle de labour est moins facilement captée. Le tournesol, la luzerne, l'orge et le blé sont plus aptes à pénétrer un sol tassé, mais de nombreuses cultures ne possèdent pas cette capacité et sont alors freinées dans leur développement.



**Figure 3** : Racines déformées en «pieds de poule» se développant à angle droit en évitant des zones compactes, ou en «arête de poisson» le long d'une face lisse, occasionnant une exploration seulement partielle du sol.

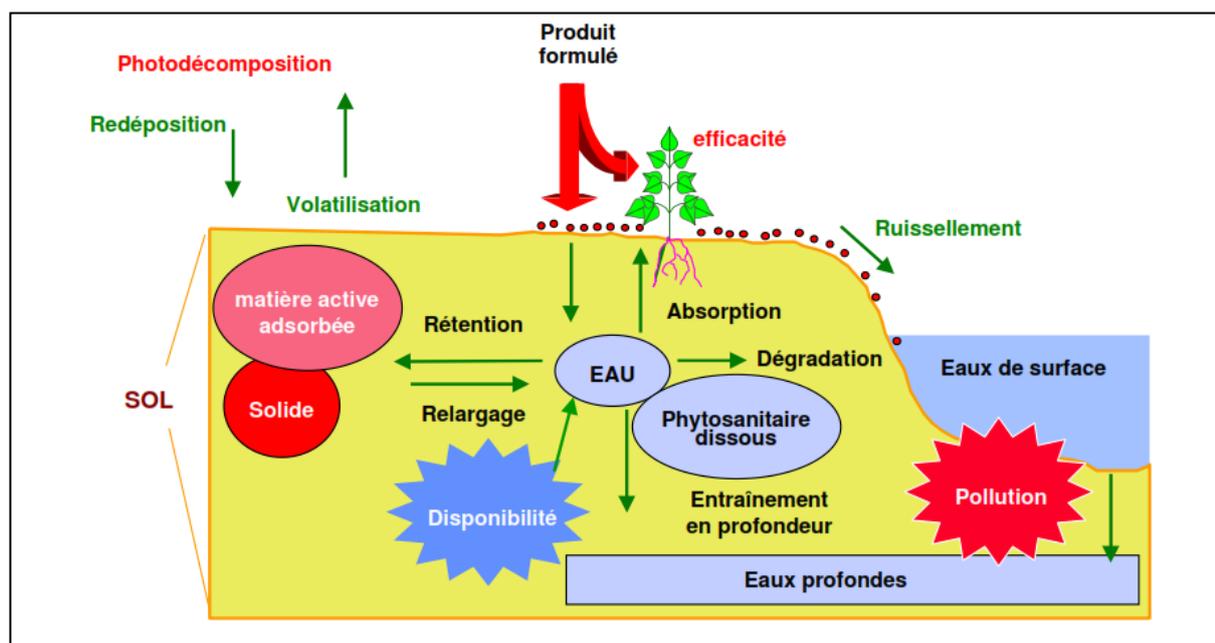
Source: **Agricultures & Territoires –  
Chambre d'Agriculture de Région du Nord – Pas de Calais, (2011)**

### 3.3.5.5. La pollution des eaux par les produits phytosanitaires

Les pollutions par les produits phytosanitaires ont deux origines : les pollutions ponctuelles et les pollutions diffuses. Les pollutions ponctuelles résultent essentiellement d'une mauvaise utilisation du pulvérisateur, lors de son remplissage ou de son nettoyage. Ce type de pollution aboutit à des concentrations de produits phytosanitaires élevées dans les eaux, se manifestant de façon relativement importante (mousse, mortalité d'organismes aquatiques...)

Les pollutions diffuses se manifestent par une quasi-absence de symptôme et des concentrations plus faibles. Une simulation réalisée sur la station Arvalis de La Jaillière (44) a montré que dans le pire des cas, avec un herbicide racinaire, les transferts par dérive de pulvérisation (à 1 m sans bande enherbée) peuvent concerner 4% de la dose appliquée. Les transferts par drainage et ruissellement représentent quant à eux chacun et dans le pire des cas 0.5% des apports. Ces deux derniers modes de transfert, sur lesquels les techniques sans labour peuvent avoir un impact, représentent donc une contribution à la pollution des eaux nettement moindre que la dérive ou les pollutions ponctuelles (**Labreuche et al.,2007**).

Les eaux superficielles sont les plus sensibles aux pollutions par les produits phytosanitaires : pollutions ponctuelles, dérive de pulvérisation, ruissellement, transfert par le réseau de drainage. Les eaux souterraines sont moins exposées, puisque ce sont essentiellement les flux par lixiviation qui peuvent les atteindre. Il arrive toutefois que dans certaines zones, les exutoires des réseaux de drainage rejoignent des zones d'infiltration rapide vers les nappes. De manière globale, ce sont surtout des molécules de la famille des herbicides qui sont retrouvées dans les eaux.



**Figure 4 :** Représentation schématique des processus impliqués dans le devenir des produits phytosanitaires dans les sols

Source : Barriuso *et al.*, 1996.

Lorsqu'un produit phytosanitaire est appliqué au champ, il va subir différents processus. Une fraction peut ne pas atteindre sa cible (le sol ou les plantes), après avoir subi de la volatilisation, immédiatement suivie de phénomènes plus ou moins intenses de photo décomposition par les rayons ultra-violets. La fraction de produit qui atteint le sol est soumise à un équilibre entre la phase liquide du sol et la phase solide. En effet, il existe une affinité plus ou moins grande des molécules pour les colloïdes du sol (composés minéraux de type argiles ou oxydes ; composés organiques).

Les phénomènes d'adsorption-désorption représentent cet équilibre entre les molécules phytosanitaires libres ou liées. La très large majorité des molécules appliquées sont dégradées à plus ou moins court terme par voie physico-chimique (hydrolyse, photo décomposition) et principalement par voie biologique (micro-organismes du sol). Les transferts hydriques dans le sol, notamment s'ils sont rapides après l'application, peuvent entraîner une partie des molécules appliquées par ruissellement ou infiltration. Ces transferts dépendent donc des flux d'eau dans la parcelle et aussi de la « disponibilité » des produits appliqués, résultant de leurs caractéristiques intrinsèques et des phénomènes d'adsorption et de dégradation (Labreuche *et al.*, 2007).

Selon Foucart (2016), une question se pose « Le glyphosate est-il cancérigène ? » C'est la question au cœur d'une dispute d'experts en cours, entre l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et l'union européenne.

Le Monde a entrepris d'explicitier les détails de cette controverse, dont l'objet n'est pas anodin : le glyphosate – la molécule active du Roundup, le célèbre désherbant de Monsanto – est le pesticide le plus utilisé au monde et le plus fréquemment retrouvé dans l'environnement. Il est aussi la pièce centrale de la stratégie de développement des biotechnologies végétales, puisque près des trois-quarts des cultures OGM actuelles sont modifiées pour tolérer le glyphosate, ce qui tire vers le haut les tonnages utilisés en agriculture.

En Algérie, selon **Daum (2016)** journaliste du monde diplomatique, le sud-est des hauts plateaux algériens connaît un développement spectaculaire de la culture de tomates sous serres. Obéissant à une logique de profit à court terme, cette production permet d'alimenter les marchés d'un pays longtemps éprouvé par les pénuries. Mais elle met en danger les palmeraies et les ressources aquifères fossiles, et pose de graves problèmes de santé publique en raison de l'usage intensif de pesticides.

L'interaction entre les modalités de travail du sol et le comportement des produits phytosanitaires (efficacité, devenir des résidus liés, lessivage...) reste à approfondir. Il semblerait que les pertes de produits vers les nappes sont similaires ou supérieures sous travail simplifié, mais les effets de l'utilisation accrue d'herbicides en terrains de non-labour restent à étudier, tout comme la possibilité d'augmenter les luttes biologiques dans ces terrains. En tous les cas, pour évaluer l'incidence potentielle des contaminants du sol, il convient de tenir compte non seulement de leur concentration, mais aussi de leur comportement environnemental et du mécanisme d'exposition pour la santé humaine (**CCE, 2002**).

## Conclusion

Au niveau de ce chapitre, il nous avons voulu mettre en évidence que plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'impact des techniques culturales sur l'état structural du sol et ses conséquences sur l'environnement.

Le choix de la technique culturale et les outils aratoires n'est pas chose facile, il faudrait tenir compte de plusieurs paramètres, ceux reliés au sol lui-même et ceux en relation avec les conditions de travail.

Si nous synthétisons ces effets, nous pouvons énoncer que les effets des différentes techniques de mise en place des cultures sont de plusieurs types :

Physique et mécanique : l'état structural du sol est modifié ou maintenue selon la technique adoptée.

Agronomique : les techniques culturales ont un effet certain sur l'évolution de la matière organique dans le sol et sur le développement de la partie souterraine de la plante.

Environnemental : le choix de la technique impose, dans le cas du semis direct, ou non, dans le cas d'un labour, un traitement chimique des mauvaises herbes important avec les risques de pollution.

A travers ces travaux, on a pu conclure que les techniques culturales allant du travail du sol classique au semis direct, ont des impacts sur les propriétés physiques et mécaniques du sol, sur le développement racinaire de la culture et son rendement, reste à savoir s'ils ont un effet sur le développement racinaire de la plante, et c'est ce qu'on tentera de savoir au prochain chapitre qui portera sur la relation entre le sol, racine et plante et l'impact de techniques culturales sur le développement des racines.

*Chapitre 4*  
*Etude et analyse des relations sol,  
racines et plante.*

## Chapitre 4 : Etude et analyse des relations sol, racines et plante.

### Introduction

Les parties aériennes des végétaux ont fait l'objet de nombreuses études depuis près d'un siècle alors que leurs parties racinaires ont été longtemps ignorées. Des raisons peuvent expliquer ce fait : les organes aériens, seuls visibles, semblaient les plus dignes d'intérêt. Leur rôle vis à vis de la photosynthèse a rapidement contribué à accroître leur importance. De nombreux travaux ont cependant montré qu'une bonne connaissance de la structure du système racinaire est essentielle pour comprendre le fonctionnement des végétaux. **(Groleau-Renaud, 1998)**

Il faut étudier tout d'abord les racines de façon indépendante, puis comprendre les relations qui les unissent dans le temps et dans l'espace. Le développement du système racinaire d'une plante est ainsi complètement étudié. Cette élaboration par extension des racines est en étroite relation avec les fonctions racinaires d'où la nécessité de maîtriser cette construction racinaire.

La racine fixe la plante au sol ; elle agit ensuite sur les gaz que renferme la terre, sur les liquides qu'elle contient et sur les solides qui la composent. En même temps que la racine fixe la plante au sol, elle fixe le sol lui-même et d'autant plus qu'elle s'y ramifie plus abondamment et plus profondément.

Les choix en matière de travail du sol, au niveau de l'exploitation, doivent entre autre, tenir compte de l'effet qu'aura ou non le travail sur les racines, grâce auxquelles se fera l'alimentation en eau et en éléments minéraux durant tout le cycle de développement de la plante.

### 4.1. Quelques aspects de la morphologie des racines

La racine constitue l'unité de base du système racinaire. La connaissance de sa structure est donc indispensable avant d'aborder l'étude du système racinaire dans sa globalité.

#### 4.1.1. Structure d'une racine

La racine peut être divisée en cinq zones distinctes, spécifiques par leur anatomie et leur rôle. On distingue en partant de l'apex racinaire: la coiffe, le méristème apical, la zone d'élongation, la zone pilifère et la zone de maturité.

#### 4.1.2. La coiffe racinaire

Elle se trouve à l'extrémité de la racine, c'est un tissu protecteur « le point végétatif » qui protège le méristème apical elle joue un rôle dans la pénétration du sol puisque elle produit un mucus (polysides) qui lubrifie la racine et permet sa progression dans le sol.

#### 4.1.3. Méristème apical

Il est composé d'un centre quiescent, ensemble de cellules qui se divisent peu et d'une autre partie qui est à l'origine des cellules qui constituent les tissus permanents de la racine que sont l'épiderme, le parenchyme et le cylindre central.

#### 4.1.4. Zone d'élongation

La zone d'élongation correspond à l'endroit où les cellules ne se divisent plus et commencent à s'allonger. Elles deviennent environ dix fois plus longues. Cette zone et la précédente se chevauchent légèrement car certaines cellules sont encore en train de se diviser alors que d'autres ont cessé et commencent à s'allonger.

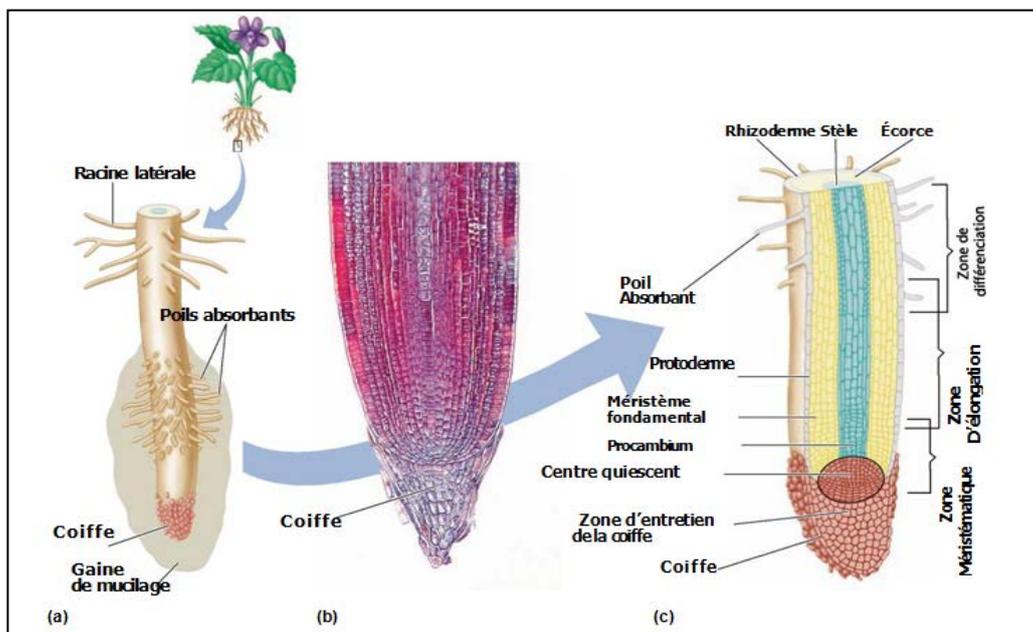
La zone d'élongation est l'endroit où s'effectue la majeure partie de la croissance racinaire, permettant à la racine de s'enfoncer plus profondément dans le sol.

#### 4.1.5. Zone pilifère

Zone morphologiquement importante de la racine elle est recouverte de poile absorbante et constitue le site d'absorption de l'eau et sels minéraux, les poile absorbantes sont microscopique en général et très longue et nombreuse environ 300 à 400 poile par cm carré leur longévité est courte et ils sont renouvelable continuellement.

#### 4.1.6. Zone de maturité

Il s'agit d'une portion racinaire tubérisée qui correspond au lieu d'apparition des premières ramifications de racines secondaires.



**Figure 5 :** Le méristème apical racinaire.

**Source :** Biologievegetale\_chap04, 2008.

(a) Ce schéma qui représente les premiers millimètres de l'extrémité d'une racine montre la présence de poils absorbants dans la zone de différenciation. Les racines latérales, ou secondaires, se forment plus haut.

(b) Sur cette section longitudinale de l'extrémité d'une racine de monocotylédone, la coiffe est bien identifiable.

(c) Le méristème apical racinaire est à l'origine de trois zones méristématiques : le Protoderme, le Procambium et le méristème fondamental. Au-dessus, on rencontre les zones d'élongation et de différenciation cellulaires. Le passage d'une zone à la suivante se fait de façon progressive.

La coiffe possède son propre méristème, appelé zone d'entretien de la coiffe. Entre ces deux méristèmes se situe le centre quiescent au niveau duquel les cellules se divisent peu souvent.

## 4.2. Croissance racinaire

La croissance des racines se déroule en deux phases distinctes :

\* **La croissance en longueur** a pour principale origine l'élongation cellulaire rapide des cellules situées dans la zone de croissance juste après l'apex.

\* **La croissance en épaisseur** est fonction de la division radiale et tangentielle des tissus secondaires à partir des méristèmes latéraux (cambium et phellogène). Cependant, chez les monocotylédones, les tissus secondaires ont disparu au cours de l'évolution. La croissance en épaisseur est alors due à l'activité du méristème apical de la racine qui lui s'arrête assez rapidement de croître. **(Leclercq et Verbrugge, 1984)**

Ces croissances sont étroitement liées à l'état physico-mécanique du sol et à son évolution dans le temps. De ce constat, l'intérêt du choix de la technique du travail du sol doit faire l'objet d'une sérieuse préoccupation de la part de l'agriculteur.

## 4.3. Les fonctions externes et internes de la racine.

Les principales fonctions des racines sont l'ancrage de la plante dans le sol et l'absorption puis la conduction de l'eau et des sels minéraux. Elles doivent transporter l'eau et les sels minéraux vers les tiges et les feuilles, mais également importer les molécules organiques provenant des tiges et des feuilles. En plus de l'absorption et de la conduction, les racines produisent des hormones et d'autres substances qui régulent le développement et la structuration de la plante **(Zahid, 2016)**.

## 4.4. Classification des racines

### 4.4.1. Selon l'importance de la racine principale

**4.4.1.1. Le système pivotant** : dans ce système la racine principale est prédominée par sa taille elle est plus grande que les racines sur lesquelles viennent se ramifier les racines secondaires. On retrouve ce type de racine chez les dicotylédones et chez la plupart des arbres. **(Frederic et al., 2010)**

**4.4.1.2. Le système fasciculaire** : C'est principalement le cas chez de nombreuses Monocotylédones (les graminées comme le blé par exemple). Les nombreuses racines ne dérivent pas d'une racine principale mais ont une origine commune. Elles croissent parallèlement en faisceau.

**4.4.1.3. Les racines adventives** : Dans certains cas, les racines peuvent apparaître sur des tiges, souvent au niveau des nœuds, c'est le cas du maïs.

**4.4.1.4. Racine tuberculeuse :** volumineuse ayant un volume considérable, la racine devient un réservoir où s'accumulent les réserves.

#### 4.4.2. Selon la durée de vie

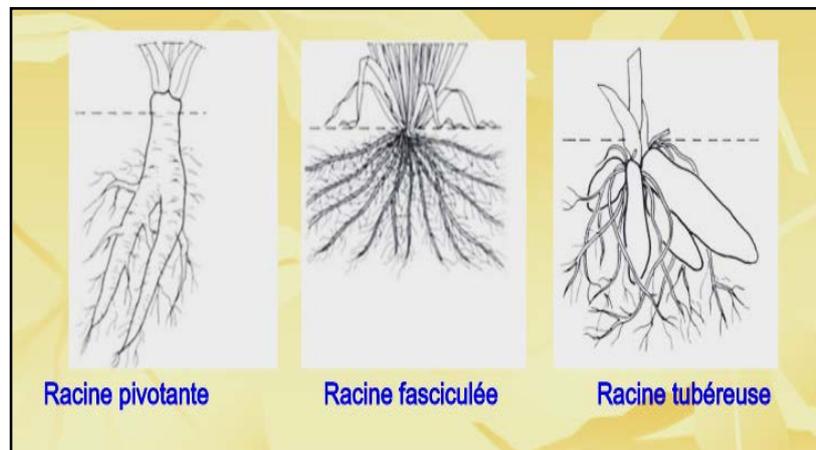
Selon la culture, les racines sont classées en fonction de leurs durées de vie ; nous avons respectivement :

**-Racines annuelles :** ce sont des racines qui se développent au même temps que les autres parties du plant, durant un an puis elles meurent « les céréales ».

**-Racines biannuelles :** c'est des racines qui survivent deux années, les fleurs sont produites à partir des réserves de la racine de la première année, par exemple « le chou ».

**-Racines pluriannuelles :** survient plusieurs années, cultures pérennes « les arbres ».

Les racines sont aussi souvent classées en fonction de leurs formes générales et surtout de la profondeur du sol exploité ; nous avons des racines pivotantes qui vont en profondeur, les racines fasciculées qui exploitent la couche superficielle du sol et enfin les racines dites tubéreuses. Ceci est illustré par la figure ci-dessous :



**Figure 6 :** Les différents types de racines.

**Source :** (Frederic et al., 2010)

#### 4.5. Relations entre la plante, le sol et les micro-organismes

La progression d'une racine dans le sol s'effectue en déplaçant son propre volume, ceci créant une compaction du sol près de la surface d'autant plus forte que la racine est de gros diamètre. L'interaction physique qui se produit entre le sol et la racine dépend de la résistance du sol au déplacement et à la déformation. Les racines ont tendance à se développer préférentiellement dans des zones où la résistance à la pénétration est faible ou bien à profiter de pores de gros diamètre existants ou bien de l'humidité du sol. Il se produit une réorientation des minéraux du sol qui se trouvent disposés parallèlement à la racine.

La racine, en tant qu'organe d'absorption, appauvrit la zone autour d'elle, ce qui aboutit à long terme à une modification du pH du milieu. Il existe un appauvrissement de la rhizosphère en oxygène et un enrichissement en  $\text{CO}_2$ . D'autre part, les racines apportent dans la rhizosphère des composés organiques qui contribuent à enrichir le sol en matière organique (Groleau-Renaud; 1998)

Les micro-organismes constituent l'un des partenaires qui forment la rhizosphère. Ils sont abondants dans le sol rhizosphérique, environ  $10^8$  par  $\text{cm}^3$ . Ils colonisent le mucilage produit par les racines et y dégradent les cellules racinaires. Environ 10% de la surface racinaire des plantes est colonisé par des bactéries. Les bactéries peuvent être 200 fois plus abondantes dans la rhizosphère que dans une fraction de sol non rhizosphérique.

Les micro-organismes sont organisés en colonies de 5-15 mm de diamètre et les espèces sont reconnaissables d'après leur morphologie, cytologie et les composés qu'elles contiennent. Les micro-organismes peuvent de plus sécréter des carbohydrates, formant un gel d'origine microbien. Enfin, une compétition avec les pathogènes se produit par fois pour l'utilisation des exsudats racinaires. Des inhibitions se produisent par sécrétion d'antibiotiques dans le milieu (**Benizri et al, 1995**).

De façon générale, les divers éléments chimiques (fertilité du sol) et physiques (état structural, tassement, humidité) des sols jouent un rôle considérable sur le développement des racines et de la vigueur de la plante.

#### 4.6.Méthodes d'étude des systèmes racinaires

Les racines mènent une vie secrète dans le sol. Par exemple un hectare de blé d'hiver peut cacher 300.000 km de racines qui apportent de l'eau et des substances nutritives à la culture. Pour cette raison, l'analyse des racines est souvent problématique. Nous présentons ci-dessous quelques méthodes d'analyse des racines.

Diverses méthodes d'étude de l'enracinement ont été décrites par de nombreux auteurs. Elles varient suivant la finalité de l'étude (étude descriptive ou étude visant à quantifier une production racinaire), la nature du sol (dureté, texture ...) et les espèces botaniques rencontrées (absence ou présence d'une racine pivot, végétation abondante ou pauvre ...).

#### 4.7.Méthodes descriptives

##### 4.7.1. Etude du profil cultural

Le profil cultural est l'ensemble constitué par la succession des couches de terre, individualisées par l'intervention des outils aratoires, des racines des végétaux et des facteurs naturels réagissant à ces actions (**Henin et al. 1960**).

Cette étude décrite par **Henin et al en 1969**, consistait à mettre en évidence les caractéristiques physiques des diverses couches de sol et à examiner la façon dont elles sont exploitées par les racines. Elle permet une bonne observation du volume de terre exploité par les racines et du mode d'exploitation de ce volume en fonction notamment des techniques culturales.

Cette méthode est simple et toujours intéressante à réaliser. Elle présente cependant des inconvénients :

- destruction partielle du site d'étude excluant de nombreuses répétitions.

- méthode qualitative ne permettant pas de comparaisons rigoureuses de l'enracinement d'une même plante soumise à différents traitements ou de ceux de différentes plantes lorsqu'ils sont voisins (variétés d'une même espèce, espèces voisines).

#### 4.7.2. Méthode des profils racinaires

Venant en complément de l'étude du profil cultural, cette méthode utilisée par **Bonzon et Picard (1969)** reprend celle décrite par **Schuurman et Goedevisgen (1964)**. Elle a pour but d'apprécier le développement des racines sur une partie ou la totalité du profil cultural, non plus sur un plan, mais pour un certain volume de sol.

Cette méthode est constituée de deux étapes :

- **Technique de prélèvement**

Pour réaliser le prélèvement, on utilise un panneau (dimensions voisines de 150 x 55 cm, variables selon la profondeur de l'enracinement) muni de pointes de grande dimension (10cm) et écartées les unes des autres de 5 cm.

- ✓ Il faut creuser une fosse dont les dimensions sont fonction de celles du panneau utilisé et dont la position par rapport à la plante étudiée est fonction de la partie du système racinaire à prélever.
- ✓ Après avoir recouvert le panneau d'une feuille de plastique, enfoncer les pointes dans la paroi verticale retenue, parfaitement aplanie.
- ✓ Caler le panneau en-dessous puis creuser une saignée sur les trois côtés de la planche.
- ✓ Découper à l'aide d'un fil d'acier passé dans les saignées la tranche de sol incluse entre les pointes. Le panneau et la portion de sol ainsi fixée sont alors transportés au laboratoire.

- **Traitement des échantillons**

Si la terre prélevée contient un pourcentage d'argile important (à partir de 15% environ) l'ensemble panneau plus terre est desséché dans un courant d'air chaud à 60 °C pendant 24 h et trempé dans un dispersant (chlorure de sodium à 5% par exemple ; ou d'autres dispersants comme l'hexamétaphosphate de sodium). Cette opération n'est pas indispensable si l'échantillon n'est pas trop argileux.

La terre est ensuite éliminée par aspersion. Les racines sont maintenues en place pendant cette opération par les pointes.

Après séchage, les racines sont sorties d'entre les pointes grâce à la feuille de plastique et collées sur une feuille de papier blanc, prêtes pour observations et mesures.

Cette méthode a l'avantage de donner une image très nette de l'enracinement de la plante. Elle présente les mêmes inconvénients que l'étude du profil cultural avec la difficulté supplémentaire due à la manipulation d'un panneau encombrant et lourd (jusqu'à 200 kg pour l'ensemble panneau et terre).

#### 4.8.Méthodes quantitatives

Ces méthodes visent à déterminer un poids de matière sèche de racines ramené à un volume ou à un poids de sol connu avec précision.

##### 4.8.1. Prélèvements de blocs de sol

Cette méthode consiste à découper des blocs parallélépipédiques de dimensions variables. **César (1971)** a travaillé sur des blocs de petite taille (20 x 20 x 20 cm et 40 x 40 x 20 cm). **Lieth(1968)** propose de prélever des blocs de 0,5 à 1 mètre cube.

Ces prélèvements sont destructifs, longs (et donc coûteux) et il est difficile de prélever un nombre élevé de blocs nécessaire à l'obtention d'une précision satisfaisante.

#### 4.8.2. Méthode des sondages

Cette méthode est la plus couramment utilisée. Elle consiste à effectuer des prélèvements au moyen de sondes à carotter. Les types de façons sonde sont très nombreux et plus ou moins complexes. Le prélèvement des carottes peut se faire de deux façons :

- En creusant une fosse et en enfonçant la sonde horizontalement dans les parois de la fosse ;
- En enfonçant la sonde verticalement à partir de la surface du sol.

La première méthode nécessite le creusement d'une fosse et détruit le site d'étude. Elle présente l'avantage de pouvoir faire une rapide observation du profil avant de délimiter les horizons à prélever.

La deuxième méthode détruit peu le milieu et permet d'obtenir une précision identique à celle des blocs en un temps nettement plus court. Elle devient difficilement réalisable pour des sols très durs. Elle semble également mal adaptée pour une étude de systèmes racinaires peu denses (**Chopart et Nicou, 1976**).

### 4.9. Effets des facteurs environnementaux sur le développement racinaire

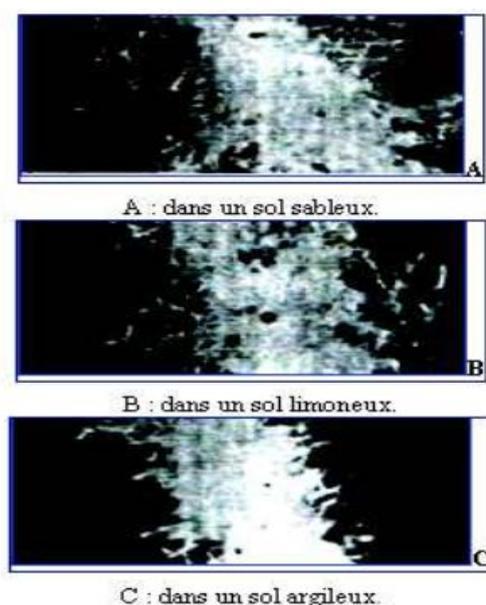
#### 4.9.1. Les facteurs physiques

##### 4.9.1.1. La texture

Une roche subie, avant de devenir un sol proprement dit, des processus d'altération physique et chimique qui ont pour effet, d'une part de la fragmenter et d'autre part de faire apparaître des minéraux nouveaux, essentiellement des argiles. La partie minérale d'un sol est donc formée de fragments plus ou moins gros issus de la roche mère et de minéraux de néo formation généralement très fins. La fraction des particules minérales du sol de dimensions supérieures à 2 mm forme le squelette du sol, graviers et cailloux, le reste formant la terre fine. C'est surtout à propos de cette terre fine qu'on parle de la texture, qui est le mode de distribution des particules du sol entre différentes classes de dimensions (**Feddal, 2011**).

D'une manière générale, la texture du sol influence l'enracinement des plantes, il est généralement admis que la croissance des racines est favorisée par une texture grossière (**Callot et al., 1988**).

Selon ce même auteur, comme on peut le voir sur la figure ci-dessous où sont comparés des enracinements de fléole, dans deux sols de textures différents mais de même porosité (40%) : un sol à texture limoneuse (10% d'argile et 40% d'éléments inférieurs à 50  $\mu$ ) et un sol à texture grossière (5% d'argile et 41% d'éléments supérieurs à 200  $\mu$ ), l'un et l'autre à plusieurs niveaux de richesse en élément nutritifs.



**Figure 7 :** Production comparative de matière sèche de racines selon la texture et le pouvoir alimentaire du sol (Callot et al, 1988).

On constate, sur cette figure, que pour les mêmes concentrations en éléments N,P et K, l'enracinement est nettement plus abondant le sol sableux que dans le sol limoneux. L'enrichissement en éléments ne modifie pas sensiblement les rapports entre les enracinements dans ces mêmes milieux.

Par ailleurs, des observations sur le blé ont permis de constater que l'influence de la texture ne s'exerce pas seulement sur l'élongation des racines, mais également sur la rhizogénèse, c'est –à-dire l'émission des racines qui influencent bien entendu la longueur totale du système racinaire des jeunes plants de blé. En début de tallage, l'élongation des racines principales et secondaires est favorisée par une texture sableuse.( Feddal, 2011).

**Tableau 4:** Caractérisation de l'enracinement d'un plan de blé au tallage dans trois sols de textures différentes.

Caractérisations de l'enracinement	Argile (terrefort) (1)	Limon (boulbène) (2)	sable
<i>Racines séminales et adventives:</i>			
Nombre	8	8	10
Longueur moyenne (cm)	42	127	129
Longueur totale (cm)	340	1021	1290
Diamètre moyen (cm)	0.48	0.48	0.34
Surface total en mm <sup>2</sup>	510	1500	1380
<i>Racines secondaires:</i>			
Nombre	181	638	941
Longueur moyenne	10.2	12.8	17
Longueur totale	960	7200	16000
Diamètre moyen	0.3	0.22	0.2
Surface total en mm <sup>2</sup>	904	5000	10800
<i>Enracinement</i>			
Longueur totale	2520	10300	17466
Surface total en mm <sup>2</sup>	2329	7600	11636

Source: Callot et al., 1988.

Une analyse de ce tableau montre bien que l'influence de la texture est encore beaucoup plus marquée sur la rhizogénèse, le nombre des racines secondaires est cinq fois plus important dans le sol sableux que dans le sol argileux; pour la texture limoneuse, le comportement de l'enracinement est intermédiaire, il se rapproche toutefois d'avantage de celui qu'on observe dans le sable. Les écarts de surface qui résultent de ces différences de ramification sont très importants, ce qui influe sur la surface de contact milieu-plante et sur l'intensité de colonisation du sol, donc du niveau de nutrition des plantes.

Selon **Feddal, (2011)**, la texture modifie également la morphologie des racines, notamment au niveau des poils absorbants. Dans le sable, la quantité de poils absorbants est beaucoup plus importante que dans l'argile ou le limon. On peut également remarquer que la disposition des poils sur la racine est variable selon la texture. Dans le sable, ces poils sont longs et disposés perpendiculairement à la racine, ils prospectent ainsi un volume de sol plus important que dans le limon ou dans l'argile où ils sont plus courts et plus tangents à la racine.

Nous signalerons entre autres, selon **Amara, (2007)**, que la texture d'un sol influence le comportement de ce dernier sous l'action des outils aratoires, d'où l'intérêt d'un bon choix de la forme des surfaces actives des pièces travaillantes pour la préparation du sol.

#### 4.9.1.2. La structure

La structure du sol est une caractéristique dynamique, son évolution est régie par les actions qui entraînent soit une dégradation, donc une diminution de la porosité structurale, soit une régénération, c'est-à-dire un accroissement de la porosité structurale (**Girard et al., 2005**).

D'une manière générale, dans les milieux à structure continue, les racines sont peu nombreuses, droites et présentent un aspect filiforme. Au contraire, dans les sols à structure construite, elles sont sinueuses, ramifiées et garnies de nombreux poils absorbants.

L'influence de la structure est bien mise en évidence par la comparaison de l'enracinement du blé dans deux sols voisins sablo-limoneux de granulométrie semblable mais de structure différent, appréciée par les indices, d'instabilité S et de stabilité K de Henin. L'indice S d'instabilité structurale diminuant avec la stabilité alors que l'indice K de stabilité augmente avec la stabilité (**Callot et al., 1988**).

D'après les résultats, dans le sol moins stable, l'enracinement du blé est concentré en surface et est réduit de 40% environ par rapport à celui du sol bien structuré. Dans ce dernier, les racines sont sinueuses et bien réparties dans l'horizon. Si l'enracinement est semblable dans le second horizon des deux sols, malgré des porosités différentes, il est pratiquement inexistant dans le troisième horizon du sol compact et instable ; indice S environ deux fois plus élevé que dans l'autre sol.

En fait, la structure idéale pour un enracinement permettant une bonne alimentation minérale, dépend naturellement de la disponibilité des éléments minéraux. On peut cependant rappeler une structure favorisant au mieux l'absorption minérale pour les racines; structure construite à gros éléments de faible cohésion, se divisant successivement en éléments plus petits, de cohésion de plus en plus forte pour finir par des agrégats de l'ordre du millimètre de très forte cohésion. Ainsi, les racines pourraient coloniser jusqu'aux petits agrégats et profiter au

maximum des éléments retenus par le sol et ceci dans la zone la plus riche en éléments minéraux, c'est-à-dire généralement dans la couche arable. ( **Feddal, 2011**).

Par contre, pour une bonne utilisation des réserves en eau du sol, il n'est pas nécessaire que la colonisation soit aussi intense, notamment en surface, mais il importe surtout qu'elles soient bien réparties dans tout le profil. De telles conditions se rencontreront dans des sols bien aérés à forte macroporosité et homogènes sur une profondeur relativement importante, ces sols sont généralement labourés.

#### 4.9.1.3. La porosité du sol

La porosité l'une des principales caractéristiques physiques du sol est essentielle, car c'est elle qui permet l'aération du sol et la perméabilité. A une certaine limite, elle est d'autant plus élevée que la structure est meilleure. On admet que, pour un bon sol, elle est de d'ordre de 50 % à 70 %. Dès qu'elle tombe à 40 %, on peut estimer qu'on a affaire à un sol tassé. Il ne faut pas s'imaginer la porosité comme uniquement formée d'espaces vides entre des agrégats. Les canaux creusés par les vers de terre et les larves d'insectes, les petits rongeurs, contribuent activement à cette porosité (**Bonneau, 1963**).

C'est à travers le réseau poral (fracture, fissure, pores) que se développe le système racinaire, et que se font les échanges entre le sol et la racine. A l'exception des systèmes irrigués où l'eau (solution fertilisante) peut être fournie directement à la racine, dans la plupart des cas, l'extraction de l'eau du sol s'effectue en milieu non saturé. Cette extraction semble d'autant plus forte que l'on se situe près des parties aériennes.

Dans le cas de la fléole (*Phleum pratense*) cultivée en vases de végétation, **Callot et al, (1988)** affirment avoir pu constater que de faibles variations de porosité, de 40 à 45% étaient suffisantes pour modifier considérablement l'enracinement, passant respectivement de 1,3 à 2,10 grammes de racines sèches par kilogramme de sol.

Les différences d'élongation dues à la porosité sont très importantes. Nous avons observé des longueurs moyennes des racines de 10,88 cm pour une porosité de 50% et de 6,48 cm pour une porosité de 35%. Pour chacune de ces valeurs de porosité, la longueur des racines augmentait avec le taux d'humidité, du fait de l'action de cette dernière sur la résistance mécanique du sol. Dans les conditions de l'essai dirigé par **Callot et al., 1988**, l'élongation des racines d'orge est indépendante de la porosité libre à l'air, et donc liée à la résistance mécanique. Cette dernière varie non seulement avec la porosité, mais également avec le taux d'humidité du sol.

La qualité et l'intensité de ces deux derniers paramètres sont étroitement liées et même déterminées par la qualité des opérations de travail du sol. La technique culturale choisie, soit la technique classique avec retournement du sol, les techniques sans labour ou le semis direct agiront de différentes façons sur la structure et la porosité du sol (**Amara et al., 2014**).

#### 4.9.1.4. L'Humidité

La conservation de l'eau dans le sol est un paramètre important de qualité du sol. Il constitue souvent un facteur limitant dans la productivité en agriculture (**Abdellaoui, et al, 2011**).

La variation de l'humidité dans le sol est tributaire de multiple paramètres, dont ceux cités précédemment,

certains dépendent du type de sol, tel que la structure, la texture et la profondeur, d'autres sont liés à la condition culturale, le climat et la région.

L'extraction de l'eau du sol par le système racinaire s'effectue de manière préférentielle dans les couches de surface, tant que l'humidité est suffisante. Ainsi, l'alimentation hydrique des cultures irriguées se réalise surtout dans la couche arable, alors qu'en culture sèche, l'extraction se déplace rapidement vers les couches profondes. Les niveaux d'extraction varient selon les types de culture, mais aussi en fonction du sous-sol, de la profondeur et de l'humidité des couches (**Callot et al., 1982**)

A la suite d'études sur le comportement hydrique du sol en relation avec des enracinements différents (**Jaillard et Luc, 1979**), trois horizons hydriques sont défini ;

- Horizon de surface à fortes variations de teneur en eau, directement soumis aux conditions météorologiques. Dans cet horizon, les phénomènes d'humectation et de dessiccation sont rapides et fréquents ; c'est également dans cette couche supérieure du sol que l'extraction racinaire est la plus importante, du moins pour les plantes annuelles.
- Horizons intermédiaires, à tendance saisonnière où l'activité des racines conditionne les variations du régime hydrique ; l'amplitude de variation peut être très différente d'une parcelle à l'autre. Il correspond le plus souvent aux horizons pédologiques appelés horizon B texturaux ou structuraux.
- Couches profondes ne présentant pas de variations décelables des teneurs en eau, au cours de l'année ; alimentés par les couches proches du substratum géologique grâce aux phénomènes de remontée capillaire et écoulement latéraux. Le comportement hydrique de ces couches profondes s'affranchit du facteur climatique. Il est déterminant pour l'alimentation hydrique des plantes sous des climats à longue période de sécheresse, cas des régions méditerranéennes en particulier.

#### 4.9.1.5. L'aération

L'aération du sol est très importante pour le développement de la culture mise en place. Les pores et cavités de diamètres plus grands (macroporosité) restent occupés par l'air, dans le cas au moins où le drainage est libre. C'est donc grâce à ces pores grossiers que l'air peut continuer à circuler dans le sol lorsque la réserve en eau de celui-ci est à son maximum, et ceci est essentiel pour la croissance et la vie des racines

Les racines ont toujours besoin d'oxygène. Cette exigence varie avec les espèces. Cet oxygène ne peut se trouver que dans l'atmosphère du sol qui circule, nous l'avons dit, dans les pores les plus gros. Les sols à macroporosité nulle ou trop faible ne seront donc pas, en général, prospectés par les racines. C'est le cas notamment des sols limoneux ou argileux mal structurés, complètement saturés d'eau au printemps au moment de la phase de développement actif des racines. Des études d'enracinement ont même montré que des racines qui pouvaient s'y être développées pendant une année sèche mouraient rapidement par la suite. Sur de tels sols, l'enracinement des espèces sensibles ne peut être que très superficiel (**Bonneau, 1963**).

**Geisler (1967)**, a montré que la longueur des racines d'orge et de pois diminue à partir de 2 à 8 % de CO<sub>2</sub>, selon la concentration en oxygène. Plusieurs auteurs s'accordent aussi à considérer que le manque d'oxygène

contribue à diminuer l'absorption de nombreux éléments minéraux par les plantes, dont notamment le potassium et le manganèse. (Giovannozz et al.,1967)

## 4.9.2. Les facteurs chimiques

### 4.9.2.1.Nutrition minérale

Des résultats contradictoires ont été établis en ce qui concerne les relations entre les zones de prolifération racinaire et la présence des éléments minéraux. En effet, certaines études montrent que les racines se développent préférentiellement dans les zones où la nutrition minérale est optimale (Drew et al., 1973). D'autres travaux montrent que l'absence d'éléments nutritifs induit un allongement racinaire, ce qui permet à la plante de parvenir dans des zones plus riches en éléments nutritifs (Clarkson et al., 1978). Il peut exister des disparités évidentes dans le développement racinaire d'une même plante obtenue selon différents modes de culture.

En effet, en solution nutritive, les éléments nutritifs sont disponibles en grande quantité dès l'émergence racinaire. Au contraire, dans le sol, les éléments nutritifs ne sont pas répartis de façon homogène. Certaines parties du sol où les racines sont plus nombreuses sont favorisées. Il faut donc tenir compte du type de culture lors de toute comparaison.

Chez les céréales, l'apport d'éléments nutritifs tend à augmenter la longueur totale ainsi que la biomasse racinaire. Cependant, le diamètre racinaire est souvent diminué au profit d'une production excessive de ramifications racinaires fines (Liljeroth et al., 1990).

L'azote constitue un des facteurs de modification de la croissance racinaire. En effet, des travaux réalisés sur le maïs âgé de 16 jours en présence de  $\text{NO}_3^-$  ou de  $\text{NH}_4^+$  racine primaire est restreinte lorsque la nutrition est réalisée avec  $\text{NH}_4^+$  montrent que l'élongation de la racine se produit par contre un épaissement racinaire (Teyker et Hobbs, 1992). Des expérimentations similaires ont par ailleurs conduit aux mêmes conclusions sur le maïs en cultures hydroponiques (Cramer et Lewis, 1993). La croissance racinaire dépend donc de la forme d'azote utilisée. D'autre part, une forte teneur d'azote (120 kg N/ha) conduit à une diminution de biomasse racinaire chez l'orge cultivée au champ.

Le calcium, élément peu mobile dans le sol, intervient dans le processus de formation et de stabilisation de la structure du sol. En effet, il s'associe aux macromolécules très hydrophiles que sont les colloïdes. Le calcium joue un rôle particulier par rapport aux autres éléments minéraux. Au niveau de la racine de la plante, la teneur en  $\text{Ca}^{2+}$  est particulièrement élevée dans la coiffe racinaire car cet ion intervient comme messenger permettant la perception de cette zone racinaire à la gravité. L'ajout de calcium induit généralement une inhibition de la croissance racinaire mais cela dépend étroitement du site d'application des ions calcium. Selon Nantawisarakul et Newman (1992), lorsque la concentration en calcium dépasse la valeur seuil de  $0,2 \text{ mole.m}^{-3}$  la croissance racinaire est fortement inhibée.

Le sodium est un élément chimique non indispensable pour la majorité des végétaux et qui est bien toléré à faibles doses. Par contre, son utilité est reconnue chez les plantes en  $\text{C}_4$  importante concentration en sodium (75 mM) entraîne cependant une réduction de la croissance racinaire.

Par exemple, chez le maïs, deux (2) jours d'exposition à 100 mM de NaCl conduisent à une réduction de 75% de la croissance racinaire (**Zidan et al., 1990**).

Le cuivre agit dans les processus d'oxydation qui font intervenir l' $O_2$  moléculaire. Le fait de traiter du maïs en culture hydroponique par du cuivre à 4  $\mu$ M induit une diminution de la longueur racinaire de 25%. A un taux supérieur de 80  $\mu$ M, l'élongation racinaire est inhibée à 90%. Il en est de même pour la masse fraîche racinaire (**Ouzounidou et al., 1995**).

Les éléments nutritifs n'exercent donc pas tous les mêmes impacts sur la croissance et le développement racinaire. Il convient de s'assurer que pour une plante, la solution nutritive apportée lors de sa culture contient les macroéléments ainsi que les oligo-éléments indispensables à sa croissance optimale. Des doses strictes sont à respecter permettant de minimiser les variations de croissance (notamment biomasse et/ou longueur racinaire) qui se produisent sous l'influence des éléments nutritifs.

### 4.9.3. Les facteurs mécaniques

#### 4.9.3.1. La résistance mécanique à la pénétration

Elle dépend dans une certaine mesure de la texture et du squelette du sol. L'abondance de gros cailloux, les lits très graveleux, a fortiori la présence d'une dalle rocheuse, limitent à peu près totalement l'enfoncement des racines. De même les horizons d'altos, caractérisés par un concrétionnement (précipitations chimiques et agrégation de particules solides) très accentué, forment un obstacle quasi infranchissable; c'est là un des inconvénients de la dégradation des sols par podzolisation.

Ces obstacles ne sont pas les seuls, certains auteurs estiment que les jeunes racines ne peuvent pénétrer que dans des pores d'au moins 200  $\mu$  de diamètre, qu'elles agrandissent ensuite progressivement. Ici intervient donc la porosité totale, ou plus exactement la dimension des pores et la structure. Ainsi si un horizon très argileux ou très limoneux, dont les éléments sont très fins, n'a pas une structure convenable qui compense sa texture défavorable, ou n'est pas abondamment pénétré par les vers de terre, par de vieilles racines, il y a des chances que même du strict point de vue mécanique il offre un obstacle à l'enracinement. (**Bonneau, 1963**).

#### 4.9.3.2. La compaction du sol

Des études ont montré que le compactage avait un effet sur les rendements de 0 à 80 pour cent, selon les conditions de croissance et le degré de compactage. Mais comment expliquer une telle variation? Les conditions climatiques jouent évidemment un rôle. Habituellement, si les précipitations ont lieu au bon moment, que le sol reste meuble et permet aux racines de s'étendre, et qu'il pleut régulièrement pour nourrir la culture, le compactage n'est pas un gros problème. Malheureusement, ces pluies idéales sont rares. Alors qu'arrive-t-il, en fait aux racines? Selon une étude menée dans le nord de l'Europe, l'effet du compactage du sol sur les racines dépend de la présence et de la répartition des pores du sol. Nous savons que le compactage diminue dans l'ensemble la taille et le nombre des pores du sol. Les racines réagissent elles par une diminution de leur longueur et donc un accès réduit aux pores. On assiste alors à une croissance racinaire plus horizontale avec des racines qui se concentrent surtout dans les couches supérieures du sol; dans ce cas encore, moins de pores sont accessibles pour l'approvisionnement en eau. Les racines ont aussi tendance à réagir au compactage en prenant de l'épaisseur, ce

qui demande un surplus d'énergie à la plante et explique la diminution de rendement et la réduction de la taille des pores accessibles aux racines. En résumé, les racines compactées sont plus courtes et plus charnues et n'ont pas accès à l'eau contenue dans les pores du sol (**Verhallen, 2014**).

Des études ont montré que, dans un sol compacté dont la résistance à la pénétration excède 2000 kPa, la longueur des racines de différentes espèces céréalières (blé, orge, maïs, triticale et seigle) est réduite d'au moins 50% par rapport à un sol non compacté. La proportion de racines secondaires augmente avec le taux de compaction du sol au détriment des racines principales (**Bakken, Njo, 1987 in Destain, 2013**).



**Figure 8 :** Plants de maïs provenant d'une zone de compaction, à gauche, présentent 77 % moins de racines que les plants non affectés.

#### 4.9. Impacts des différentes techniques culturales sur le développement des racines

L'étude du système racinaire est un critère important d'évaluation et d'amélioration des caractéristiques physiques du profil cultural. Selon **Richard et al. (2004)**, les racines mènent une vie secrète dans le sol. Un hectare de blé d'hiver peut cacher 300.000 km de racines qui apportent de l'eau et substances nutritives aux cultures. Un système racinaire bien développé est le résultat d'une bonne structure du sol et est essentiel pour un rendement élevé.

Les racines ancrent la plante dans le sol et lui fournissent de l'eau et des substances nutritives. Le système racinaire d'une plante est habituellement génétiquement prédéterminé en termes de forme et d'aspect, comme les feuilles et les tiges au-dessus du sol. Cependant, l'environnement du sol (sable, argile, etc.) limite l'expansion des racines. Dans un sol argileux bien drainé présentant une bonne structure, les racines de certaines plantes peuvent atteindre 2-3 m.

Les façons culturales ont une influence profonde et certaine sur la forme et le développement des racines ; car elles touchent de nombreux aspects de l'environnement racinaire, à savoir : l'humidité et la température du sol, l'espace entre les pores, la concentration en oxygène, la répartition des matières organiques, la mobilisation des substances nutritives et la configuration physique des sols en surface. La technique utilisée dépend de nombreux facteurs, par exemple des résidus des récoltes, de l'équipement disponible, du type de sol, du climat, de

la qualification de la main-d'œuvre, etc. (Amara et al., 2014)

L'état structural laissé après le passage des outils aratoires doit permettre aux racines un développement optimum. Ce développement est caractéristique d'une plante à une autre.

Selon le même auteur **Richard et al. (2004)**, lors de période de croissance la plus rapide, en moyenne les racines avancent dans le profil du sol à une vitesse moyenne d'environ 0,5-3,0 cm/jour. Cependant, les racines dépendent des fissures et des trous du sol pour leur croissance, puisque leur capacité à créer leurs propres canaux est plutôt limitée.

Dans un sol humide, le bout des racines peut déplacer des particules de sol, mais dans un sol sec, les racines sont contraintes d'utiliser des pores d'un diamètre supérieur au leur. La résistance mécanique du sol se reflète dans épaissement du bout des racines et de leur ramification.

L'un des rôles importants du travail du sol est de faciliter la croissance des racines dans un milieu contraignant, le travail du sol agit sur la structure du sol en diminuant la résistance du sol à la pénétration des racines. Il améliore aussi l'humidité et l'aération du sol en facilitant les échanges gazeux au niveau des racines. Plusieurs travaux signalent que le travail réduit et le système direct sont généralement moins productifs en comparaison au travail conventionnel. Les résultats obtenus par **Chopart en 1980,1983 et 1985** sur l'effet de labour à la charrue à socs et le non-labour sur le poids des racines (g/ dm<sup>3</sup>) des principales cultures annuelles du Sénégal ont montré quelques caractéristiques des systèmes racinaires de ses plantes et aussi l'effet de labour et non-labour sur le développement racinaire. Le tableau suivant résume l'effet des deux techniques sur la densité racinaire.

**Tableau 5** : Effet de labour à la charrue et le non-travail sur le poids des racines (g/dm<sup>3</sup>) des principales cultures annuelles du Sénégal.

Culture	Nombre des résultats	Profondeur (cm)	Densité racinaire	
			Semis direct	Labour
Mil	6	0-10	0.764	0.792
		10-20	0.187	0.227
		20-30	0.065	0.072
Sorgho	8	0-10	1.505	1.652
		10-20	0.337	0.429
		20-30	0.135	0.132
Maïs	10	0-10	0.865	1.176
		10-20	0.377	0.615
		20-30	0.151	0.187
Riz pluvial	16	0-10	0.865	1.257
		10-20	0.228	0.507
		20-30	0.068	0.192
Arachide		0-15	0.287	0.318

Source :Chopart et Nicou, (1976)

Ce tableau il peut donner une idée sur la différence de développement du système racinaire à travers les

deux techniques. Ils montrent clairement que le labour permet une densité racinaire plus importante par rapport le semis direct pour toutes les cultures.

**Amara et al ., 2014**, montrent que le système racinaire est très développé sur les parcelles labourées où la densité racinaire est de 1,101 g/dm<sup>3</sup>, ensuite c'est celui des parcelles travaillées avec le chisel où cette densité est de 0,805 g / dm<sup>3</sup>. Au niveau des parcelles du semis direct nous avons la valeur la plus faible de la densité des racines qui est de 0,638 g / dm<sup>3</sup>.

**Tableau 6:** Valeurs moyennes de la densité et des diamètres des racines dans le sol pour chaque technique.

Techniques	Densités moyennes (g/18 dm <sup>3</sup> )	diamètre des racines (mm)
TC	19.83	1.38
TM	14.5	1.14
SD	11.5	1.10

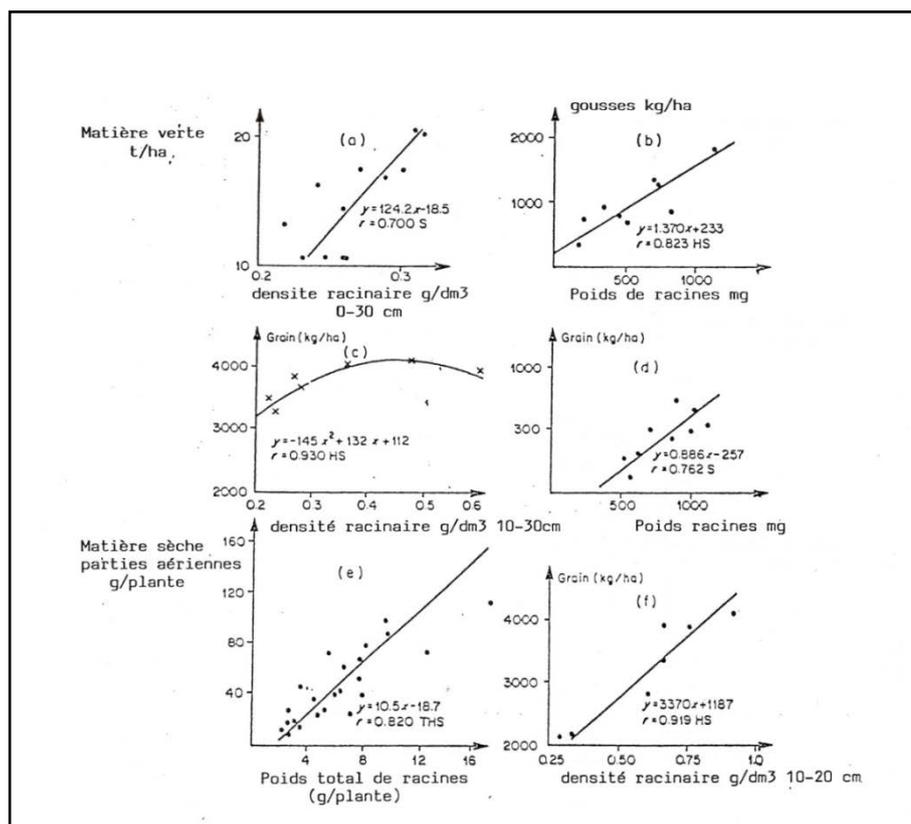
Ainsi que les diamètres des racines sont plus importants sur les parcelles travaillées avec la méthode classique la moyenne des diamètres est de 1,38 mm, ensuite les diamètres des racines pour les deux autres techniques sont relativement proches l'un de l'autre, mais toujours dans le même ordre il est de 1,14 mm pour le TM et de 1,10 mm pour le SD. Les racines se développent donc mieux dans un sol labouré.

Selon **Swart (2011)**, Dans le monde entier, la recherche désigne de plus en plus la santé de la racine comme étant la clé pour les futures améliorations de productivité des cultures agricoles. Comme elles sont loin des yeux, les racines sont souvent loin du cœur. On a estimé que 80 % de tous les problèmes d'un végétal commencent par des problèmes de sol et de racines. Le développement de certaines pratiques agronomiques telles que le non-labour et l'irrigation peut augmenter l'apparition des maladies du sol, qui compromettent la santé des racines. Ces maladies ont un impact sur les processus physiologiques du végétal et inhibent son développement, ce qui à son tour influence négativement le rendement. Il est important de comprendre parfaitement les dégâts provoqués par les pathogènes du sol pour concevoir de bonnes stratégies de lutte.

#### 4.10. L'effet de la densité racinaire sur le développement de la culture

Les racines ont un rôle très important dans le développement de la plante, elles assurent la fourniture d'eau et les éléments nutritifs à la plante, ses dernières sont nécessaires pour la croissance et aussi à la production de la plante.

**Nicou et Chopart, (1972)** ont pu montrer qu'il existait des corrélations positives entre le poids total de racines ou la densité racinaire par horizon (g/dm<sup>3</sup>) et les rendements en arachide, maïs, sorgho, riz pluvial. Pour augmenter les rendements il est nécessaire de favoriser la croissance racinaire en particulier dans l'horizon 0-30cm. Cela semble être une règle générale pour les sols sablo-argileux en surface et peut s'expliquer par le fait que dans ces sols la réserve en eau est faible et un enracinement profond est nécessaire pour assurer l'alimentation hydrique et minérale des cultures.



**Figure 9:** Relations entre développement racinaire et rendement de différentes cultures au Sénégal. a/ jachère Bambeys, b/ Arachide Bambeys, c/sorgho Nioro du Rip, d/Sorgho Bambeys, e/Riz pluvial Sefa, f/Maïs Sefa.

Source : Nicou et Chopart, (1972)

#### 4.11. Effets des techniques culturales sur le rendement et ses composantes

Le niveau de Production d'une culture donnée est la résultante de la disponibilité des différents éléments nécessaires à la croissance de la plante ; cependant la technique utilisée pour la mise en place de la culture influe indirectement sur le potentiel productif de la plante.

Plusieurs travaux signalent que le travail réduit et le système semis direct sont généralement moins productifs en comparaison au travail conventionnel. En effet une recherche réalisée en Suisse a démontré qu'une culture de blé biologique a subi une perte de rendement de 14% en travail réduit comparativement au travail conventionnel (Berner *et al.*, 2008).

De même, une augmentation de rendement de 10% d'une culture de blé de printemps a été observée en labour conventionnel par rapport au semis direct, dans une étude de Dill-Macky et Jones (2000). Les travaux menés par Hammel (1995) de 1984 à 1987 aux Etats-Unis ont mesurés de trois travaux du sol implantés depuis 10 ans sur un cultivar de blé d'hiver, le rendement moyen réalisé sous semis direct durant quatre saisons a diminué de 22% comparativement au travail conventionnel. Une expérimentation a été mise en place en 2012 sur deux

parcelles en France. Une parcelle est implantée en maïs, l'autre en sorgho. Dans chaque parcelle, deux modalités sont définies :

Une modalité en semis direct sous couvert végétal (SCV) et une modalité avec travail du sol superficiel (TCS).

La modalité en SCV a eu un impact sur différentes composantes du rendement des cultures suivies. De manière générale, le SCV a eu un impact négatif sur le peuplement et un impact positif ou nul sur le reste des composantes (biomasse aérienne, nombre d'épis ou de panicules/pied, PMG et rendement). Au final, les rendements significativement supérieurs du SCV pourraient s'expliquer, en partie, par les résultats des différentes mesures précédentes (**Kulagowski et al., 2012**)

La meilleure rétention en eau du sol, notamment, a pu favoriser un meilleur développement, de par le confort hydrique engendré, et un enracinement satisfaisant du fait de la structure du sol préservée.

### **Conclusion :**

Si le paramètre développement racinaire n'est pas une composante du rendement, il y influe fortement son élaboration du fait de l'intime corrélation entre le fonctionnement des racines et le poids des grains que l'on retrouve dans la formule du rendement. Il représente également un facteur de choix pour caractériser l'état du sol et un indicateur important du développement de la culture.

En conclusion de cette partie, il apparaît clairement que le bon développement des cultures est étroitement lié au développement racinaire qui est lui-même conditionné par plusieurs facteurs liés au sol, à son état et à ses propriétés physicomécaniques.

D'après les travaux cités ci-dessus, on peut dire qu'il y a plusieurs facteurs tels que, la porosité, l'humidité et la résistance à la pénétration qui ont une influence directe sur le développement des racines.

*Chapitre 5*  
*Moyens matériels utilisés pour*  
*la mise en place des cultures.*

## Chapitre 5 : Moyens matériels utilisés pour la mise en place des cultures.

### Introduction

L'objectif du choix des équipements ou des machines agricoles pour réaliser les différents itinéraires techniques se résume à l'obtention d'un bon lit de semis qui doit lui-même répondre aux préoccupations suivantes :

- 1- Absorption des fortes pluies pour assurer la stabilité contre la formation de croute et l'érosion
- 2- Servir de barrière contre l'évaporation
- 3- Assurer le transport d'eau par capillarité vers les semences en germination
- 4- Servir de réserve de substances nutritives, d'eau et d'oxygène, favoriser le développement des racines

Les moyens matériels pour la préparation du sol et la mise en place des cultures varient d'une région à une autre en fonction des conditions agro-climatiques et de la culture à mettre en place. Les associations de matériels et leur combinaison varient également d'une zone à une autre

Au niveau de ce chapitre il s'agira de mettre en évidence les principales machines agricoles utilisées par chacune des techniques étudiées. Nous nous limiterons à citer les principales machines sans pour autant rentrer dans les descriptions détaillées des machines.

### 5.1. Technique conventionnelle

La chaîne mécanique adoptée au niveau de la méthode classique se compose de trois étapes fondamentales:

- Le travail profond avec charrue.
- Le Pseudo-labour avec les outils à disques et à dents.
- Le travail superficiel.

#### 5.1.1. Le travail profond avec charrue

Il faut noter que la chaîne conventionnelle peut commencer par un sous-solage quand le sol présente une aptitude au compactage ou dans le cas de la formation de la semelle de labour, si non cette opération n'est réalisée qu'une fois tous les quatre ans et par fois même plus. Dans ce cas nous parlons d'un travail du sol très profond qui dépasse généralement les 40cm et nécessite des outils lourds tel que la sous-soleuse, décompacteur et le décompacteur rotatif.



**Figure 10 :** Sous-soleuse.

Les charrues à versoirs sont les plus répandues surtout au niveau des techniques conventionnelles dans les régions du pourtour méditerranéen. Ses objectifs sont de répartir la fumure de fond et les amendements sur toute l'épaisseur de la couche arable, de contrôler les adventices et les repousses, d'enfouir les résidus de récolte, d'assurer un ameublissement de la couche arable et d'améliorer le ressuyage des terres humides ou drainées (Guerif, 1994 in bellemou, 2012).

De surcroit les charrues à disques sont beaucoup moins répandues que les charrues à versoirs, elles sont généralement utilisées sur des sols caillouteux et sols légers à moyens avec un couvert végétal relativement faible. Ce type de charrues a tendance à disparaître au niveau de nos exploitations. Chaque corps de la charrue à disques est équipé d'une calotte sphérique appelée disque. Ce dernier découpe une bande de terre de section sensiblement elliptique et la retourne sous l'effet combiné de l'avancement, de l'autorotation et d'un déflecteur frontal appelé "versoir de disque". Le disque, fabriqué en acier traité pour résister aux chocs et à l'abrasion, a la forme d'une calotte sphérique de diamètre variant de 60cm à 1m, la flèche pouvant aller jusqu'à 20cm. Le bord du disque est en général biseauté pour améliorer l'efficacité de découpage du sol. Chaque disque tourne librement sur son axe (Barthélémy et al., 1987)

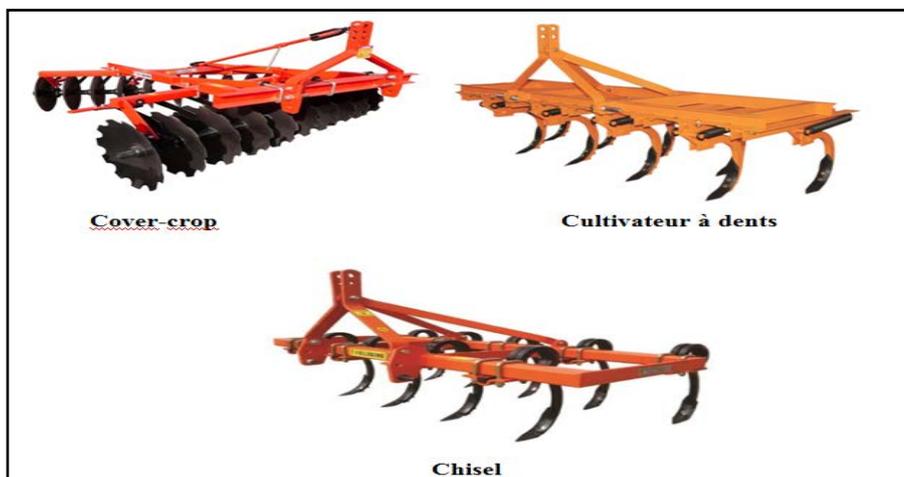


**Figure 11:** Charrue à versoir (vert) et charrue à disques (orange).

### 5.1.2. Le Pseudo-labour avec les outils à disques et à dents

La gamme d'outil utilisés en pseudo-labour est variée, dans des conditions de travail optimales les outils entraînés par la prise de force travaillent jusqu'à 40cm de profondeur et réalisent un ameublissement profond et mélangent d'une façon homogène les débris végétaux et la terre. D'autre part les outils classiques de pseudo-labour, comme les charrues à disques (cover-crop), les cultivateurs lourds (chisel) et les pulvérisateurs lourd, ameublissent le sol sur une profondeur de sol comprise entre 20 et 30 cm (**Barthélémy et al., 1987**).

D'autres outils aratoires sont également utilisés comme les cultivateurs à dents pour améliorer la structure du sol sur une profondeur moyenne et faciliter la dernière étape qui est le travail superficiel.



**Figure 12:** Outils de pseudo-labour

### 5.1.3. Le travail superficiel

Les outils utilisés à cet effet sont des outils qui travaillent à de faibles profondeurs ne dépassant pas quelques centimètres. Les outils qui affectent cette opérations ont nombreux, généralement ils sont polyvalents, Seul le réglage de la machine est adapté à la profondeur souhaitée. De plus il se trouve dans le marché des charrues combinées présentant plusieurs formes des pièces travaillantes, montées sur le même bâti, ce qui permet de réaliser plusieurs objectifs en un seul passage (**Barthélémy et al., 1987** in **bellemou, 2012**).

Dans le cas des outils à dents, les dents ne travaillent pas sur la même profondeur, ce qui nécessite un rouleau qui complète l'action d'émiettement et le nivellement du sol. Ces outils sont généralement:

- ✓ Les herse
- ✓ Les herse rotatives
- ✓ Les rouleaux lisses ou croskill



**Figure 13:** Matériels de travail superficiel

#### 5.1.4. Le semis

On peut définir le semoir comme une machine agricole qui sert à semer les graines en lignes régulièrement espacées, à une profondeur réglable, avec une certaine densité, réglée par des organes de distribution.

Le semoir est composé d'une trémie (c'est le réservoir des graines), d'un système de transport des grains qu'il soit pneumatique ou mécanique, et d'un système de distribution et d'organes de mise enterre constitués soit par de petits socs, soit par des disques. Il existe d'autres organes accessoires tels que les organes de jalonnement (soit un traceur soit un GPS pour les plus récents) permettant de repérer les sillons déjà ensemencés, les effaceurs de traces et les équipements de contrôle électronique

Le principe de fonctionnement des nouveaux semoirs en ligne consiste à niveler le lit de semence à l'aide d'une pièce travaillante dite chasse mottes, les graines, stockées dans la trémie, sont déposées à la profondeur souhaitée dans un sillon par les organes de distribution (disques alvéolés, cannelures ou ergots) sous l'effet de la gravité ou d'une assistance pneumatique juste après l'ouverture du sillon par l'organe d'enterrage. Si tôt le dépôt de la graine effectué, des rouleaux situés à l'arrière du semoir tassent légèrement le sol (Pour assurer un bon contact graine-sol) et referment le lit de semences, en ramenant la terre écartée par le chasse-motte **Barthélémy et al., 1992 in Bensabti, Zibani,2015**).



**Figure 14:** Semoir en ligne conventionnel.

## 5.2. Système du semis direct

Comme le semis direct consiste à mettre en place la graine dans le sol sans perturber la structure initiale du sol, le moyen utilisé se limite aux semoirs spécialisés.

Le mode d'action du semoir pour semis direct se limite au travail de la zone où sera placée la graine.

La ligne de semis est la partie la plus importante dans le semoir pour le semis direct. Elle est composée de trois éléments distincts:

- Élément de préparation de la ligne de semis (coutre).
- Élément de mise en place (ouvre sillon).
- Élément de fermeture de sillon (roue tasseuse).

### 5.2.1. Élément de préparation de la ligne de semis (coutre)

Les coutres sont de forme circulaire en acier, ils permettent de couper et dégager les résidus et d'ouvrir le sol pour faciliter le travail de l'ouvre-sillon, ils sont généralement placés devant l'unité de semis et ils doivent être ajustés pour travailler à la même profondeur que le semis.



Figure 15: Coutre

### 5.2.2. Élément de mise en place (ouvre sillon)

Cet élément est responsable de l'ouverture de sillon, dans le quel sera déposée la graine qui sera ensuite recouverte par les roues tasseuse. Il existe plusieurs types d'ouvre-sillon, mais les plus courants sont les double-disques et les double-disques décalés.



Figure 16: Ouvre Sillon

### 5.2.3. Élément de fermeture de sillon (roue tasseuse)

Les roues tasseuse assurent la fermeture du sillon avec un certain tassement du sol pour assurer le contact sol-semence.



Figure 17: Roue tasseuse.

### 5.2.4. Éléments de distribution

#### 5.2.4.1. Distribution mécanique

Dans le cas de la distribution mécanique, il existe deux mécanismes distinctes. ces mécanismes sont:

#### 5.2.4.2. Distribution cannelures

La distribution à cannelure appelée aussi distribution forcée. La graine est capturée par la cannelure à partir de la trémie pour la diriger vers le tube de descente et par la suite vers l'élément semeur.

#### 5.2.4.3. Distribution à ergots

La distribution à ergots consiste à accompagner un ou plusieurs grains vers le tube de descente, les ergots sont généralement de deux tailles différentes pour s'adapter avec les différentes tailles des graines.

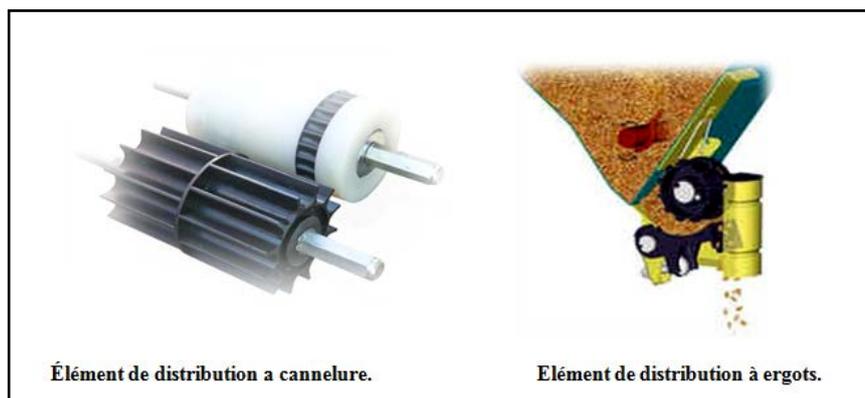
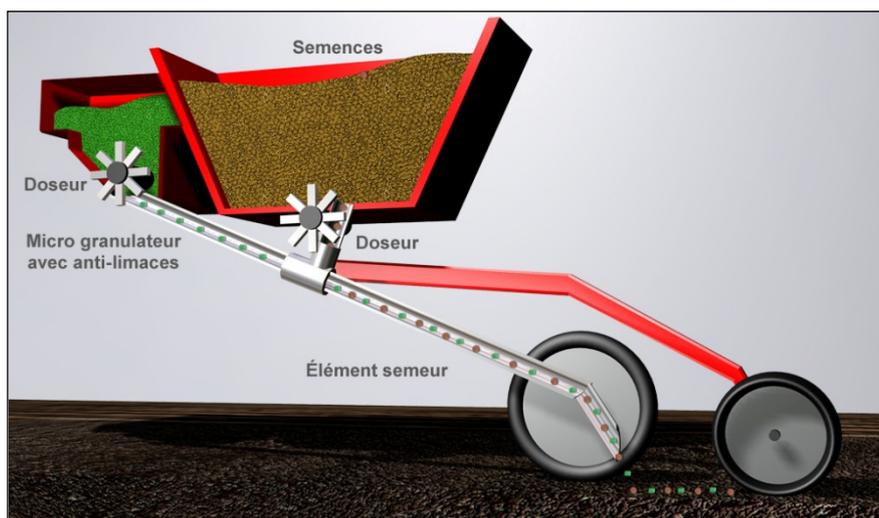


Figure 18 : Distribution mécanique des graines au niveau d'un semoir

#### 5.2.4.4. Distribution pneumatique

Ce système de distribution est constitué d'un pignon doseur qui tourne à l'intérieur d'un cylindre fermé. Les graines sont transportées vers l'élément semeur grâce à un courant d'air provoqué par la soufflerie.



**Figure 19:** Système de distribution pneumatique.



**Figure 20:** Semoir du semis direct.

En Algérie, quelques grosses exploitations ont pu s'équiper en semoirs pour semis direct européens ou brésiliens. Mais leur coût rend ces engins inaccessibles aux petites et moyennes exploitations. Depuis peu, deux constructeurs locaux proposent des semoirs semis direct low-cost, qui reprennent de nombreux éléments communs aux semoirs australiens John Shearer : éléments semeurs à dents ou roues plombeuses (**Anonyme, 2016**).

- **Le semoir « BOUDOUR » de CMA-SOLA :**

Le prototype « Boudour » de l'entreprise publique CMA-SOLA (Sidi Bel-Abbès) est le fruit d'une coopération entre experts de l'ITGC, de SOLA et des australiens dont Jack Desbiolles.

Il s'agit d'un semoir de 2,40 m à attelage trois points avec 14 éléments semeurs à dents. La trémie est en position surélevée ce qui permet un écoulement par simple gravité. Les dents à ressort sont étroites et courbées avec un soc ouvreuse de faible largeur afin de limiter la perturbation du sol. Les engrais et semences sont placés de façon séparée. Les dents sont placées sur 3 poutres différentes ce qui permet un large espacement entre

éléments semeurs et une bonne gestion des résidus de récolte. La dernière poutre permet la fixation de roues plumbeuses.

Des essais sont en cours chez des agriculteurs.



**Figure 21:** Semoir « BOUDOUR » de CMA-SOLA.

▪ **Le semoir des ETS REFOUFI (SÉTIF) :**

Il s'agit d'un semoir trainé de 3,40 m à 19 éléments semeurs. Ils sont constitués de larges dents droites fixées à des montants verticaux, d'où un châssis surélevé. Chaque dent est munie de ressorts et y sont accolés deux tubes permettant un placement distinct des semences et engrais provenant de deux trémies de grande capacité accolées l'une à l'autre. Derrière chaque dent sont fixées deux roues plumbeuses appuyant le sol au fond du sillon. Celles-ci sont munies d'un racleur de terre bien utile en cas d'utilisation en conditions humides. Certains éléments du semoir sont inspirés du semoir syrien de marque Aschbel présent dans la région (Anonyme,2016). .



**Figure 22:** Semoir de semis direct Ets Refoufi

## **Conclusion**

En conclusion à ce chapitre, et plus particulièrement, pour les exigences pédoclimatiques qui sont les plus difficiles à contrôler ; nous pouvons mentionner que les exigences point de vue sol sont plus facilement maîtrisables avec un bon choix de la technique culturale à utiliser, ce qui ne peut se réaliser que par un choix judicieux de la forme des pièces travaillantes des outils aratoires, en relation avec le type de sol et de son état structural initial et dans des conditions climatiques escomptées.

*Chapitre 6*  
*Synthèse de quelques résultats*  
*des travaux relatifs*  
*aux effets des techniques culturales sur*  
*l'état du sol et*  
*les conséquences sur le rendement des cultures.*

## Chapitre 6 : Synthèse de quelques résultats des travaux relatifs aux effets des techniques culturales sur l'état du sol et les conséquences sur le rendement des cultures.

### Introduction

Plusieurs travaux, réalisés dans des différentes régions comme la région de Sétif et de la Wilaya de Biskra, ont également montré que la technique culturale avait un effet certain sur l'état du sol et par conséquent sur le développement du blé et sur son rendement.

De manière générale les essais ont porté sur des analyses des effets de trois techniques de mise en place des grandes cultures et plus particulièrement les blés sur l'état du sol ainsi que sur le développement de la culture et sur les conséquences sur les rendements.

Ci-dessous nous citons quelques conclusions auxquelles ont abouti certaines de ces études :

Les résultats de **Adli et Feddal (2008)** ont montré que :

Les passages des différents outils aratoires ont un effet sur l'humidité du sol. Les résultats ont montré qu'au niveau des parcelles labourées, l'humidité est très importante sur le premier horizon et après le passage du cover-crop et du cultivateur à dents, la teneur en eau dans le sol diminue en surface.

Le degré de la porosité augmente fortement après le labour et légèrement après le passage du cover-crop et du cultivateur à dents. Par conséquent le passage de ses outils aratoires contribue à la création d'une forte porosité structurale.

Le labour permet une évolution de la porosité de 40.4% à 49.38%, le passage du cover-crop permet aussi d'atteindre une valeur de 51.02%, et après le cultivateur à dents la porosité est de 52.65%.

La résistance pénétrométrique du sol diminue fortement après le labour, cependant elle remonte légèrement après le passage du cover-crop et du cultivateur à dent. La résistance pénétrométrique est fortement influencée par la teneur en eau dans le sol, pour cela le choix correct du moment d'intervention avec les pièces travaillantes est important. Sa valeur passe de 10.65 à 6.36 daN/cm<sup>2</sup>, le passage du cover-crop permet aussi d'atteindre une valeur 10.1 daN/cm<sup>2</sup> et augmente après le passage de cultivateur à dents.

Pour le taux d'émiettement ils constatent que l'effet des outils aratoires sur la taille des mottes est hautement significatif. D'une manière générale, ce taux est lié directement au type de matériel de préparation du sol, la nature et l'humidité du sol.

Ainsi que pour les résultats obtenus par **Bekkouche; (2012)** dans la région sublittoral de Mitidja, précisément à la ferme de l'institut technique des grandes cultures d'Oued Smar ; permet de tirer les conclusions suivantes :

L'humidité au niveau du Semis Direct est très importante comparativement au Travail Conventionnel et au Travail Minimum.

La porosité est très élevée pour la technique classique car elle augmente fortement après le passage des outils aratoires.

Le passage des outils aratoires durant le travail du sol diminue fortement la résistance pénétrométrique du sol, par contre au niveau du semis direct la résistance pénétrométrique est importante sur tous sur les 10 premiers centimètres de profondeur.

Concernant l'enracinement l'effet du travail classique sur la taille et la longueur des racines est hautement significatif par rapport au travail minimum et le semis direct. En général, le taux d'enracinement est lié directement à structure du sol notamment la porosité et la résistance pénétrométrique qui sont-elles mêmes fonction de la technique culturale.

Dans le même cadre de recherche ; les résultats de **Hamani, 2013** sont respectivement :

Le passage des différents outils aratoires à un effet remarquable sur l'humidité du sol comparativement au semis direct ou l'humidité est bien conservé.

Les différents passages des outils aratoires par leur action et leur profondeur augmentent la porosité du sol ce qui conduit à un bon développement racinaire.

La résistance pénétrométrique est plus importante sur les parcelles en semis direct que sur les parcelles labourées. Les résultats de cette différence de résistance permettent de dire que les racines développent mieux au niveau des parcelles menées d'un travail conventionnel.

Concernant le rendement estimé et ces composantes, les résultats ont montré qu'au niveau du travail conventionnel le nombre d'épis par mètre carré est plus élevé avec 195 épis/m<sup>2</sup> ; le nombre de grains par épis est également plus élevé avec une moyenne de 64 grains/ épis. Toujours au niveau de la même technique classique, le poids de mille grains (PMG) est de 40g, toutes ces données annoncent le rendement est le plus élevé pour la technique classique, il avoisine les 50 q/ha.

D'autres résultats obtenus par **Ferrah (2014)** dans une région semis aride a permis de tirer les conclusions suivantes :

Le semis direct permet une meilleure préservation de l'humidité du sol, car la couche superficielle tassé du sol contribue à la diminution des pertes d'eau par le phénomène d'évaporation. Par contre au niveau du travail conventionnel ou le sol est travaillé (labouré), la surface de contact avec l'air est plus importante, à ceci s'ajoute l'effet d'une température très élevé dans la zone semi-aride ; tout ça se traduit par une forte perte d'eau.

Au niveau du travail conventionnel, l'enracinement est meilleur comparativement au celui de semis direct et du travail minimum ; ce qui est du à l'effet de la technique sur la structure du sol qui permet une porosité importante obtenue après labour.

Les constats qui concernent le poids de mille grains (PMG) caractérisant chacune des techniques montrent que le PMG obtenus au niveau du TC est le meilleur. Ce paramètre est un bon indicateur de la qualité du grain.

Le rendement estimé, de la technique conventionnelle est important par rapport aux autres techniques.

Economiquement, la technique du semis direct revient moins chère comparativement à la technique conventionnelle, cette dernière consomme une grande quantité d'eau et nécessite un nombre de passages des outils aratoires plus élevé.

L'augmentation du coût de la technique conventionnelle est traduite par un prix des reviens du quintal de blé plus important à ceux obtenus avec les autres techniques.

## 6.1. Etude économique comparative des techniques culturales

L'une des premières raisons de l'introduction des nouvelles techniques de mise en place des grandes cultures est une raison économique. En effet la technique dite conventionnelle est une technique énergivore. Au niveau de cette technique le labour à lui seul, selon plusieurs chercheurs consomme plus de 70 % de l'énergie totale pour la mise en place d'une grande culture ; d'où la qualification des nouvelles techniques par les techniques culturales sans labour.

Cette étude passe d'abord par l'analyse du temps de travail des techniques culturales. La diminution du temps passé au niveau de l'ensemble des interventions "machine" est importante.

**Rieu, (2001)** fait remarquer que plus la simplification, est poussée, plus le volume de terre travaillé est faible et, de ce fait, plus le temps de traction nécessaire par hectare est faible. En système céréalier, il est généralement observé une division par deux du temps de traction par hectare (de 7h en labour à moins de 4h en système très simplifié).

L'économie en carburant est étroitement liée au temps de traction. La diminution du temps de traction diminue la consommation de fioul de 40 l/ha pour l'implantation (**Tebrugge et al, 1997**).

En moyenne, la mécanisation et la main d'œuvre représentent entre 34% et 50% du coût de production d'un quintal de blé en France (**Young, 2001**). Le poste traction représente le poste le plus important des charges de mécanisation (43%).

Le coût total des opérations d'implantations pour une exploitation de 100 ha en labour est de 210 €/ha alors qu'en non-labour il peut être réduit à 50 €/ha. Cela est dû à la diminution du temps de consommation du carburant par accroissement du débit de chantier.

Les coûts de désherbage en non-labour sont plus élevés qu'en labour selon une enquête menée par L'ANPP en Bourgogne et en Lorraine entre 1990 et 1997 sur 23 parcelles. Nous remarquons donc qu'il y a un risque de pollution.

Nous reproduisons ci-dessous quelques travaux faisant ressortir les différences de consommation en temps et en énergie dans de différentes conditions.

### 6.1.1. Travaux de Barthélémy (1992):

Selon une étude réalisée par **Barthélemy et al., en 1992** sur la consommation du carburant et du temps, pour les trois techniques culturales, en fonction de types de sol (texture).

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

**Tableau 7:** Le temps et la consommation du carburant pour les différents types de sol et des itinéraires techniques

Type de sol	Labour		Travail superficiel		Semis direct	
	Temps (h/ha)	Carburant (L/ha)	Temps (h/ha)	Carburant (L/ha)	Temps (h/ha)	Carburant (L/ha)
Argileux	2h50 à 3h30	60-80	0h50 à 1h10	15-25	0h20 à 0h35	7-9
Limon-argile	2h10 à 2h50	30-45	0h50 à 1h00	12-16	0h20 à 0h35	6-9
Limon-battant	2h10 à 2h30	30-38	0h50 à 1h00	12-15	0h20 à 0h35	6-8
sol caillouteux	2h50 à 3h30	35-45	0h50 à 1h50	10-20	0h20 à 0h40	6-8

Source : Barthélemy et al.,(1992)

## 6.2.Travaux de Frédéric (2005)

Autre étude réalisée par **Frédéric en 2005** sur quinze sites différents. Il a trouvé aussi la consommation en carburant et de temps (hors récolte), pour la mise en place d'une céréale (blé dur). Ces résultats sont résumés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 8:** La consommation de fuel (L/ha) et le temps de travail (min/ha) hors récolte pour la mise en place d'une céréale (Blé dur)

	Labour		Technique culturale simplifiée		Semis direct sous couvert	
	Temps (min/ha)	Carburant (L/ha)	Temps (min/ha)	Carburant (L/ha)	Temps (min/ha)	Carburant (L/ha)
Moyenne	191	52	133	37	103	26
Consommation maximum	233	66	147	45	104	40
Consommation minimum	108	28	104	27	69	16

Source : Frédéric, 2005

L'analyse de ces résultats montrent clairement que :

Les nouvelles techniques culturales dites simplifiées sont toujours justifiées par une consommation très importante de temps et d'énergie de la technique dite conventionnelle.

D'après les résultats de **Barthélemy et al, 1992 ; Frédéric, 2005**, la simplification du travail du sol peut présenter des avantages économiques non négligeables, elles montrent le potentiel de réduction de la consommation en carburant et de temps.

Si les nouvelles techniques présentent un avantage économique, il est cependant nécessaire de rappeler que les herbicides sont reconnus comme des substances chimiques relativement dangereuses pour la santé humaine et celle des écosystèmes.

## **Conclusion**

En conclusion à tous ces travaux, on fait ressortir l'importance des effets des techniques culturales sur l'état du sol et sur le développement de la culture.

Donc, ces techniques culturales ont une influence sur les caractéristiques physico - mécaniques du sol, qui eux à leurs tours sont en corrélation les unes avec les autres et ont une action notable sur les paramètres qui conditionnent le développement des racines à savoir l'eau l'oxygène et les éléments nutritifs.

Nous avons aussi remarqué que les rendements obtenus sont généralement similaires avec un avantage pour les techniques conventionnelles.

*Conclusion*  
*bibliographique*

## Conclusion bibliographique

Au travers l'analyse de cette première partie de notre travail, qui est en fait une synthèse des études relatives à l'effet des techniques culturales sur les propriétés physico-mécanique du sol, l'impact de ces derniers sur le développement racinaire et conséquences sur le rendement final, nous avons voulu faire ressortir l'importance et le rôle des techniques de préparation du sol pour la mise en place d'une culture.

La production céréalière en Algérie est irrégulière et faible, elle est fortement dépendante des conditions climatiques ainsi qu'à la bonne maîtrise de la mécanisation et plus particulièrement des techniques culturales, ces dernières peuvent varier allant du travail du sol conventionnel classique avec retournement du sol jusqu'à la suppression totale de toute intervention mécanique sur le sol à savoir le semis direct.

Le blé est la base de l'alimentation de l'algérien et constitue sa principale source en énergie et en protéines. Le blé est, parmi les cultures assolées, celui qui occupe la superficie la plus importante.

Les Sorghos sont parmi les espèces fourragères sur lesquelles on peut fonder beaucoup d'espairs. Leurs qualités principales peuvent être résumées de la manière suivante: Ce sont des plantes qui, en peu de temps d'occupation du sol, fournissent, même avec un approvisionnement en eau minime, en saison estivale ; donc pendant la période de pénurie des prairies ; une masse fourragère très importante, susceptible d'être utilisée, soit en vert immédiatement sur le pré ou à l'auge, soit mise en réserve et consommée sous forme d'ensilage.

Le bersim en étant une légumineuse fourragère présente plusieurs avantages dont les plus importants sont : est un couvert des besoins d'animaux grâce à sa richesse en matière azotée et sa valeur énergétique qui favorise la production laitière - **la fixation d'azote atmosphérique par les nodosités qui joue un rôle majeur dans la rotation avec les céréales.**

Le bon développement des cultures est étroitement lié au développement racinaire, ce dernier est influencé par les paramètres physico - mécaniques du sol, or, un sol bien aéré permet un bon développement racinaire, c'est pour cela que nous tenterons dans notre expérimentation de montrer l'influence de techniques culturales sur les paramètres physico-mécaniques du sol et sur le développement racinaire et ces derniers sur le rendement de cultures.

Du fait que le rendement de cultures dépend aussi en grande partie de la dose de semis nous nous proposons d'utiliser différentes doses de semis pour essayer de mettre en évidence la relation entre les états structuraux et le développement racinaire et de rendements qui en découlent.

Ce travail une contribution afin de faire ressortir les effets du travail du sol et du semis direct sur les propriétés physico-mécanique du sol, et sur le développement racinaire. Et d'établir un modèle mathématique qui permet de quantifier le rendement des cultures en relation avec les caractéristiques physiques et mécanique du sol à savoirs : l'humidité, la porosité du sol et la résistance pénétrométrique d'une part, et les facteurs liés à chaque culture d'autre part.

L'expérimentation portera essentiellement sur :

- Une Analyse de l'effet des différentes techniques culturales sur l'humidité du sol, la porosité, et la résistance mécanique, paramètres fondamentaux pour la réussite d'une culture ;
- Une Analyse de l'effet des techniques culturales sur les paramètres caractéristiques des cultures ;
- Une Analyse des différentes corrélations entre les paramètres étudiés ;
- Une Modélisation des rendements des cultures en relation avec la technique utilisée.

*Démarche  
Expérimentale*

*Chapitre 7*  
*Sites d'études et*  
*protocole expérimental*

## **Chapitre 7 : Sites d'études et protocole expérimental.**

### **Introduction et objectifs de l'expérimentation**

Les techniques de mise en place d'une culture, comme le travail du sol classique dit conventionnel et les techniques culturales simplifiées et plus particulièrement le semis direct est un champ de recherche relativement négligé en Algérie. En effet, à part quelques recherches effectuées, les études sur le semis direct sont très éparées et fragmentaires. Les résultats obtenus jusqu'à présent ne répondent pas à la problématique de l'introduction de ces nouvelles pratiques en Algérie. Ceci nous a poussés à orienter notre expérimentation vers un objectif plus réaliste, à savoir l'analyse du comportement du sol sous l'action de deux techniques culturales, à savoir la technique conventionnelle et le semis direct. Une analyse de l'impact de ces techniques sur la croissance et le développement racinaire a été réalisée. L'objectif de cette partie est de montrer l'effet des techniques sur l'état du sol, sur le comportement des racines et les conséquences sur les rendements des cultures étudiées.

### **7.1.Présentation des sites de suivis**

Les données exploitées dans le cadre de ce projet ont été prélevées sur deux parcelles expérimentales. L'une est située à la station expérimentale de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique (ENSA) qui se trouve dans la plaine de la Mitidja, dans la commune d'El-Harrach Wilaya d'Alger ; l'autre est située au niveau de la ferme de démonstration et de production de semences d'ITGC (Institut Technique des Grandes Cultures) à Oued Smar, qui fait partie de la commune d'Oued Smar, daïra d'El Harrach, la wilaya d'Alger.

L'essai de la première année est déroulé au niveau de la station expérimentale de l'ENSA sur une culture de sorgho fourrager, les deux autres essais (compagne 2014/2015 et 2015/2016) se sont déroulés à la station de l'ITGC d'Oued Smar sur une culture céréalière qui est le blé dur et une légumineuse qui est le bersim, le choix des cultures rentrent dans la rotation blé-bersim.

Les coordonnées géographiques sont les suivantes : 3°08' de longitude est 36°43' de latitude nord. Elles se trouvent à 24 m au-dessus du niveau de la mer ; entre les isohyètes 600 mm et 700 mm. Elles appartiennent à l'étage bioclimatique subhumide à hiver doux.



**Figure 23:** Situation géographique de l'institut technique des grandes cultures (ITGC) Oued Smar.



**Figure 24:** Situation géographique de la parcelle expérimentale de l'ENSA.

## 7.2. Caractéristiques pédologiques des parcelles

### 7.2.1. L'analyse granulométrique du sol

Les analyses ont été réalisées au niveau du laboratoire de pédologie de l'École Nationale Supérieure Agronomique d'El Harrach sur des échantillons prélevés à la tarière à une profondeur de 0-30 cm. Les prélèvements ont été effectués en 05 endroits du champ expérimental comme suit:



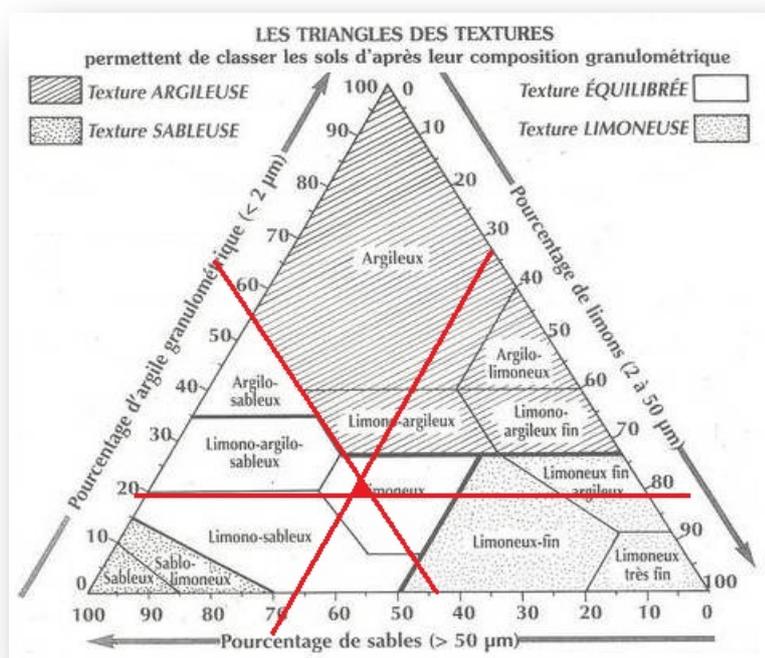
**Figure 25:** Endroits des échantillons sur la micro parcelle.

Tous les échantillons ont été mélangés puis mis à sécher dans l'étuve.

Les résultats des analyses sont notés dans les tableaux suivants:

**Tableau 9 :** Analyse granulométrique du sol au niveau de la parcelle de l'ENSA

Agrégats	Argile (%)	Limon		Sable	
		Limon fin (%)	Limon grossier (%)	Sable fin (%)	Sable grossier (%)
Teneur	19,85	18,65	15,32	18,5	26,17
		33,97		44,67	



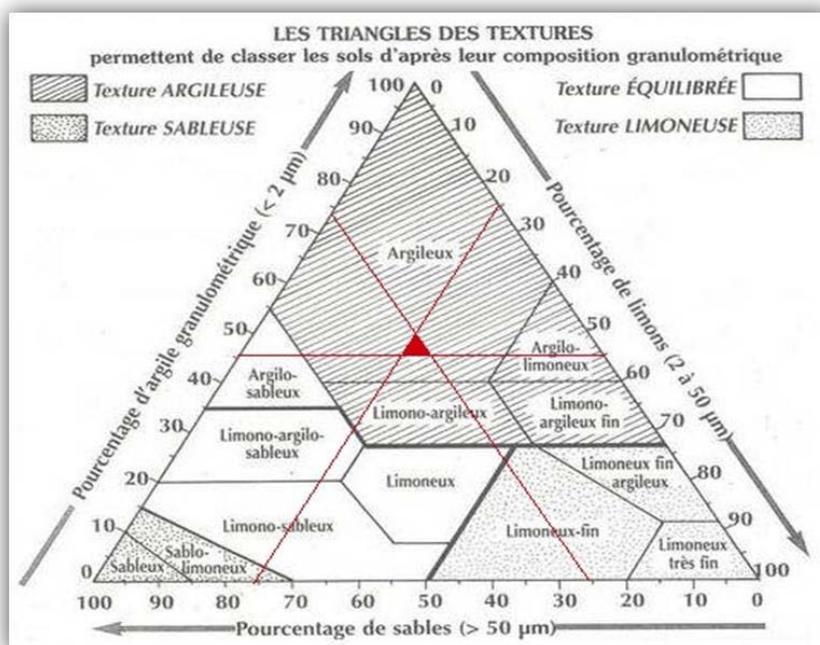
**Figure 26:** Triangle USDA de texture du sol (ENSA)

D'après le triangle textural, le sol de la parcelle a une texture limoneuse

**Tableau 10 :** Analyse granulométrique du sol au niveau de la parcelle de l'ITGC D'Oued Smar.

Agrégats	Argile (%)	Limon		Sable	
		Limon fin (%)	Limon grossier (%)	Sable fin(%)	sable grossier(%)
Teneur	46,51	16,67	8,36	10,28	16,51
		25,3		26,79	

Les résultats d'analyse pédologique de notre parcelle montrent qu'il s'agit d'un sol argileux, du couleur marron foncé a l'état humide, plastique et bien couvert par la chaume de la culture précédente.



**Figure 27:** Triangle USDA de texture du sol (ITGC)

### 7.3. Conditions climatiques des campagnes d'essais

Pour montrer les conditions dans lesquelles se sont déroulés nos essais, nous reproduisons ci-dessous le relevé mensuel de la pluviométrie pour les trois campagnes agricoles étudiées

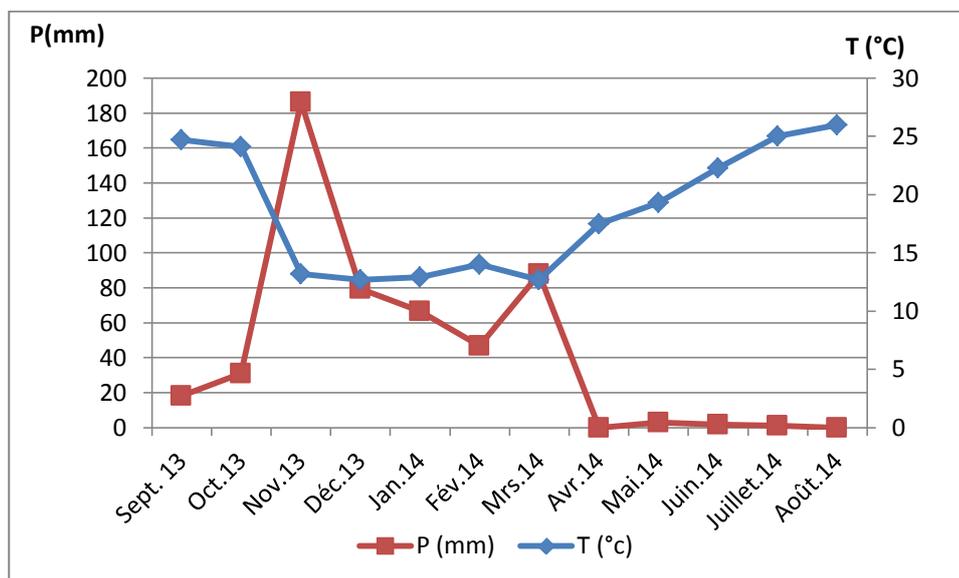
- **la campagne 2013/2014**

Dans le but de déterminer les conditions climatiques qui ont caractérisé la campagne 2013-2014, un suivi régulier a été réalisé par la station météorologique de l'ENSA. Les principales données sont rapportées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 11** : Conditions climatiques de la campagne 2013/2014

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mrs.	Avr.	Mai	Juin	Juillet	Août	Moyenne
	13	13	13	13	14	14	14	14	14	14	14	14	
T (°c)	24,7	24,1	13,2	12,7	12,9	14	12,7	17,5	19,3	22,3	25	26	<b>18,7</b>
P (mm)	18	31	186,4	79,3	66,6	46,7	88,0	00,0	3,0	1,8	1	0	<b>521,8</b>

Source : Station météorologique de l'ENSA.(2013-2014)



**Figure 28** : Conditions climatiques de la campagne 2013/2014.

La pluie enregistrée dans la campagne 2013/2014 n'a pas dépassé la moyenne calculée sur 100 ans dans cette région, c'est juste 530 mm contre 749 mm la normale de la région, ce qui représente 30% de déficit. La plus importante quantité de pluie a été reçue entre le mois de novembre et le mois de mars, soit avant le semis de sorgho. Après cela, il y a eu un printemps sec, donc une mauvaise pluviométrie pour la culture pour le début de cycle.

Le sorgho est une plante tropicale qui s'adapte à de nombreux milieux. C'est la céréale principale des zones recevant entre 800 et 1000 mm de pluie par an. Les besoins en eau du sorgho varient dans une fourchette de 350 mm à 750 mm en fonction de la longueur du cycle, de la masse du couvert végétal : grosseur des tiges et surface foliaire, et de la demande évaporative (Chantereau et Nicou, 1991 in N'DAH Alphonse, 2016).

Pour la variété SUDANGRASS, une pluviométrie bien répartie située entre 650 à 800 mm est nécessaire si l'on veut assurer le rendement optimal dans des conditions de bonne fertilité des sols. Or d'après nos données, le cumul de pluviométrie est déficitaire ce qui nous a emmené à faire un apport d'irrigation.

**- Les deux campagnes 2014/2015 et 2015/2016 :**

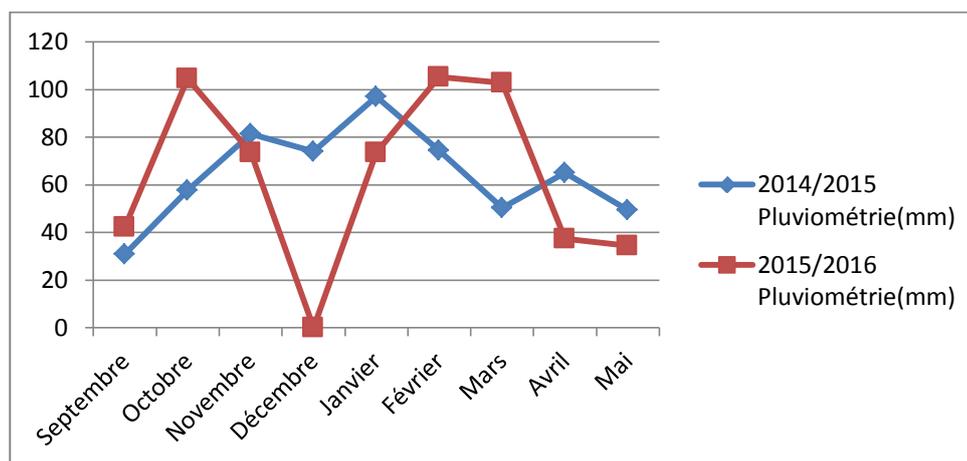
La station de l'ITGC appartient à l'étage bioclimatique subhumide qui correspond celui de la plaine de Mitidja, elle est caractérisée par un climat méditerranéen avec un été chaud et sec et un hiver froid et humide, à pluviométrie irrégulière et de rares gelées.

Selon un suivi régulier de la pluviométrie réalisé par la station durant les deux années (2015 et 2016), les données sont présentées par le tableau ci-dessous :

**Tableau 12 :** Conditions climatiques des campagnes 2014/2015 et 2015/2016

Campagnes	Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Total
2014/2015	Pluviométrie (mm)	30,9	57,7	81,4	74,1	96,9	74,5	50,3	65	49,4	8,3	588,5
2015/2016		42,2	104,7	73,5	0	73,5	105,2	102,8	37,3	34,4	/	573,6

**Source :** Station météorologique de l'ITGC Oued Smar.(2015-2016)



**Figure 29 :** Conditions climatiques des deux campagnes 2014/2015 et 2015/2016.

Les précipitations cumulées, durant la campagne 2014/2015, entre le mois de Septembre et le mois de Juin, s'élèvent à 588,5 mm, avec une variabilité dans la répartition assez importante.

La période qui coïncide avec la préparation du lit de semence a été relativement pluvieuse, allant du mois de Novembre, Décembre et Janvier (81,4mm, 74,1mm, 96,9mm), ce qui a entravé la mise en place de la culture

D'une manière générale, cette année est bonne grâce à la quantité des pluies accumulée surtout comme réserves dans le sol.

Pour la campagne 2015/2016, les valeurs de la pluviométrie sont relativement importantes pendant les mois d'Octobre, Février et Mars. Absence totale de pluie pour le mois de Décembre c'est –à-dire après la mise en place de la culture de bersim, ce manque d'eau au début du cycle végétatif avait eu une incidence sur la germination et la levée de la culture.

## 7.4. Protocole expérimental

### 7.4.1. Dispositif expérimental

Tenant compte du microrelief des parcelles qui est relativement plat, le dispositif expérimental choisi est de type factoriel bloc à deux facteurs étudiés avec quatre répétitions

La totalité de la surface a été divisé en quatre blocs, ces derniers sont subdivisés en quatre micro-parcelles de surface égale et un écartement de 1m entre micro-parcelles, les deux techniques et doses sont pratiquées dans chaque bloc.

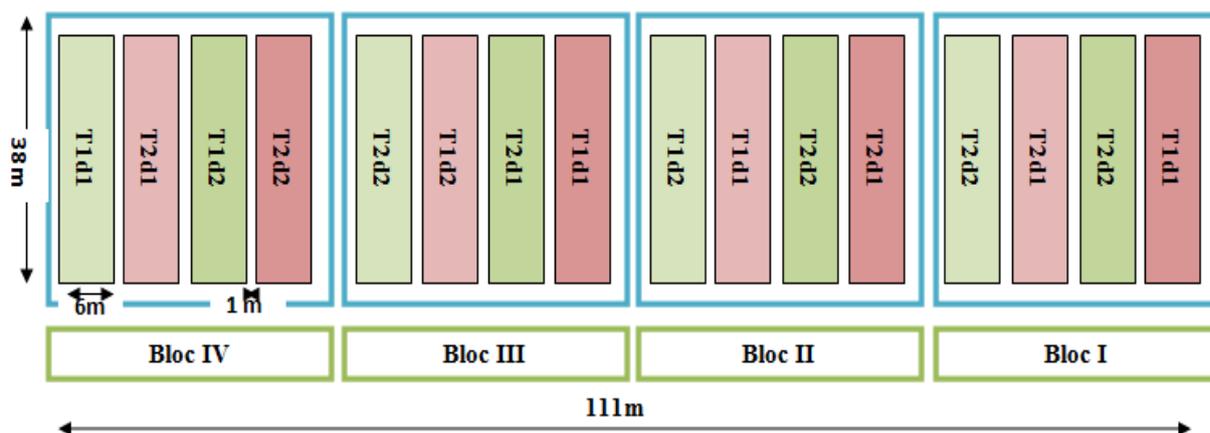


Figure 30 : Schéma de dispositif expérimental

#### 7.4.2. Facteurs étudiés et leur niveaux

Nous avons deux techniques de préparation du sol, et deux doses de semis ce qui nous donne deux facteurs :

Le **premier facteur** est la technique de travail du sol avec deux niveaux

- Niveau 1 (TC) : travail conventionnel : charrue à soc + cover-crop+ vibroculteur.
- Niveau 2 (SD) : semis direct : pas de travail du sol et passage du semoir direct.

Le **deuxième facteur** est la dose de semis avec deux niveaux

- Niveau 1 (d1) : dose faible
- Niveau 2 (d2) : dose forte.

**Les facteurs contrôlés** : c'est les répétitions ou les blocs avec quatre niveaux de symboles (B1, B2, B3 et B4)

#### 7.5. Conduite et suivi des essais expérimentaux

L'objectif de notre expérimentation étant l'analyse de l'effet des techniques culturales pour la mise en place des cultures sur l'état du sol et sur le développement des racines.

Nous présentons ci-dessous le déroulement des essais expérimentaux durant les trois ans d'études :

##### 7.5.1. La campagne agricole 2013/2014 : 1<sup>ère</sup> année

Pour le travail conventionnel, le labour a été réalisé le 13 Mars 2014 par une charrue bisocs à une profondeur moyenne de 25 cm, la reprise de labour a été réalisée par un cover-crop le 24 mars 2014 (deux passages croisés)

Un apport d’engrais de fond (NPK (15-15-15) a été appliqué avant le semis avec une dose de 100kg/ha.

Le semis a été réalisé à l’aide de deux types de semoirs avec deux doses de semis (d1=25 kg/ha et d2=35 kg/ha) directement après le passage de vibroculteur. Un passage d’un rouleau croskill a été réalisé le 09 avril 2014 pour augmenter le contacte grain-sol.

À note que la dose de semis normale est de 30kg/ha.

Une fertilisation azotée (Urée N46) a été réalisée le mois de Mai à la volée.

Deux doses d’irrigation à raison de 10 mm ont été apportées essentiellement au stade tallage et au stade fin montaison-floraison.

La récolte a été effectuée le 25 juin 2014 à l’aide d’une faucheuse rotative

Pour le semis direct un traitement d’herbicide totale (Roundup) à la dose de 5L/ha à été réalisé avant le semis avec un pulvérisateur. Après le stade de levée, une application d’un herbicide sélectif Damine, à la dose de 1l/500l d’eau à l’hectare.

### 7.5.2. La campagne agricole 2014/2015 : 2<sup>ème</sup> année

Le travail conventionnel nécessite une chaîne d’opération afin d’avoir une terre très convenable a la mise en place de la culture souhaitée; dans notre expérimentation nous avons suivi la chaîne suivante:

Le labour a été réalisé le 27 novembre2014à une profondeur de 25cm à l’aide d’une charrue bisocs.

La préparation de lit de semence a été réalisée le 22 Décembre2014 à l’aide d’un vibroculteur.

Le semis a été réalisé le25 décembre2014 à l’aide d’un semoir en ligne(Agric) avec deux doses de semis D1=160 kg/ha et D2= 180 kg/ha, avec une dose de semis normale de 150 kg/ha (ITGC)

L’apport d’azote a été réalisé en deux fractions, la date, la dose et le stade d’apport d’azote sont consignés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 13** : Dates et doses des apports en fertilisant.

Date de l'apport	Fertilisant utilisé et dose d'utilisation	Dose d'azote apporté (kg/ha)	Stade de culture
29/01/2015	Urée	50	Début tallage
	100kg/ha		
11/02/2015	Urée	50	Fin tallage
	100kg/ha		

Pour le non labour, Un désherbage chimique a été réalisé le22 décembre2014 par un herbicide total qui est le Glyphosate; et avec une dose, de 6 litres, diluée dans 300 litres d’eau.

Les semis ont été réalisés le 25décembre2014, sur le couvert végétal du précédant cultural.

### 7.5.3. La campagne agricole 2015/2016 : 3<sup>ème</sup> année

Pour la technique conventionnelle, le labour a été réalisé le 27/10/2015 avec une charrue bisocs réversible. Cette opération est effectuée au niveau de deux micro-parcelles par bloc une pour la dose 1 et une pour la dose 2.

La reprise de labour a été réalisée le 05/11/2015 avec un seul passage de vibroculteur

L'apport d'engrais MAP (mono-ammonium-phosphate-granule) a été réalisé le 08/11/2015 à la main, avec une dose totale de 50 kg/ surface ensemencée

Le semis a été réalisé le 11/11/2015 avec un semoir en ligne (AGRIC), avec deux dose de semis (D1=15kg/ha et D2 =25kg/ha).

Selon l'ITGC, la dose de semis normale est de 20 kg/ha.

Au niveau de semis direct, le sol n'est pas travaillé mécaniquement, d'où la nécessité d'un traitement chimique, pour cela, un désherbage avec le Rophosate 480g a été réalisé le 05/11/2015 avec une dose de 2 litre pour 150 litres d'eau pour les 8 micro-parcelles de semis direct, par un pulvérisateur semi-porté

Le semis direct a été réalisé avec un semoir de semis direct (Sulky)

*Chapitre 8*  
*Matériels et Méthodes*

## Chapitre 8 : Matériels et Méthodes

### 8.1. Moyens matériels

#### 8.1.1. Matériel végétal

Nous présentons dans le tableau ci-dessous les différentes cultures utilisées lors de l'expérimentation durant les trois campagnes agricoles.

**Tableau 14:** Les différentes cultures utilisées lors de l'expérimentation

Compagnes	Matériel végétal	Variétés	Pouvoir germinatif et le PMG	Pays d'origine	Caractéristiques
2013/2014 (1ère année)	sorgho fourrager	Sudan-grass HYBRIDE- F1	PG=94,80% PMG=24,25g	Texas	plante élancée à tiges fines et feuilles étroites, ayant de nombreuses talles et repoussant bien après la coupe
2014/2015 (2ème année)	blé dur (Triticumdurum)	Siméto	PG=96,6 % PMG=27,70g	Italienne	résiste à la sécheresse et à la verse elle donne une bonne production. Possède un système racinaire fasciculé à un grand nombre de ramification
2015/2016 (3ème année)	Bersim (Trifolium alexandrinum)	Tigri	PG=92,4% PMG= 2g	Italienne	possède un système racinaire pivotant très puissant avec de fortes ramifications résister à la sécheresse.

Pour la 2<sup>ème</sup> et la 3<sup>ème</sup> année, le choix des cultures rentrent dans le programme des essais de l'introduction du semis direct en Algérie, au niveau de l'ITGC avec une rotation blé/bersim.



Blé dur - Variété : Siméto



Sorgho fourrager -Variété :  
Sudan-grasse



bersim – variété : Tigri

**Figure 31 :** Photos des différentes variétés cultivées

### 8.1.2. Matériel de travail

Le matériel agricole utilisé pour réaliser nos essais est composé des machines suivantes :

#### 8.1.2.1. Matériel de traction

Pour la campagne 2013/2014, on a fait appelle à tracteur C6807, dans les caractéristiques sont les suivantes :

- ✓ **Nombre de cylindres** : 4.
- ✓ **Puissance** : 49 KW/ 68 CV.
- ✓ **Régime de la prise de force** : 540 et 1000 tr/min.
- ✓ **Empattement** : 2.150 m.
- ✓ **Poids total à vide** : 2550 kg.



**Figure 32:** Tracteur C6807.

Le tracteur utilisé durant la campagne 2014/2015 et pour toutes les opérations est le tracteur C 6006 quia les caractéristiques suivantes:

- ✓ **Puissance**: 44kw/60cv
- ✓ **Nombre de cylindres**: 4
- ✓ **Régime de la prise de force**: 540/1000 tr/min
- ✓ **Empattement**: 2.150 m



**Figure 33:** Tracteur C6006.

Pour la campagne 2015/2016 nous avons utilisées deux tracteurs :

- Tracteur Agrolux 80 pour les opérations « labour, reprise de labour, semis ». Ces caractéristiques sont :

- ✓ **Type** : 4x4
- ✓ **Puissance** : 80cv
- ✓ **Nombre de cylindre** : 4
- ✓ **Régime de la prise de force** : 540-1000 tr/min
- ✓ **Empattement** : 2,5 m



**Figure 34 :** Tracteur Agrolux 80

- Tracteur C4006 pour le désherbage. Ces caractéristiques sont :

- ✓ **Type** : 4x2
- ✓ **Nombre de cylindre** : 4
- ✓ **Régime de la prise de force** : 540-1000

tr/min

- ✓ **Empattement** : 2 m
- ✓ **Voie** : 1,6 m



**Figure 35** : Tracteur C 4006.

### 8.1.3. Les outils de préparation du sol

- **Campagne 2013/2014** :

Le labour a été réalisé avec une charrue bisocs qui a les caractéristiques suivantes :

- ✓ **Type** : portée.
- ✓ **Nombre de soc** : 2.
- ✓ **Profondeur de travail** : 25 à 30 cm.
- ✓ **Largeur du travail** : 75 cm.
- ✓ **Poids** : 480kg.



**Figure 36**: Charrue bisocs.

Pour réaliser le pseudo labour nous avons utilisés le cover-crop qu'il permet de briser les grosses mottes et d'assurer un bon émiettement. Ces caractéristiques sont :

- ✓ **Type d'attelage** : porté.
- ✓ **Largeur de travail** : 150 cm.
- ✓ **Profondeur de travail** : 10 à 15 cm.
- ✓ **Nombre de disques** : 14
- ✓ **Poids** : 290 kg.



**Figure 37**:Cover-crop.

Après le passage de cover-crop nous avons utilisés le vibroculteur qu'il permet de briser les mottes résiduelles laissées par le cover –crop et ainsi d'affiner le lit de semence. Il est caractérisé par :

- ✓ **Type d'attelage** : Porté.
- ✓ **Largeur totale de travail** : 260 cm.
- ✓ **Profondeur de travail** : 10 à 15 cm.
- ✓ **Nombre de dents** : 7dents.



**Figure 38** : Cultivateur canadien.

Pour améliorer le contact terre-graine, et favoriser les remontées d'eau par capillarité nous avons fait un passage d'un rouleau croskill dont les caractéristiques sont les suivantes :

- **Largeur de travail** : 2 m
- **Diamètre** : 50 cm
- **Vitesse de travail** : 6Km/h



**Figure 39** : Rouleau croskill.

#### - Campagne 2014/2015 et 2015/2016 :

Le labour a été réalisé avec une charrue bisocs réversible, qui a les caractéristiques suivantes:

- ✓ **Nombre de soc**:4
- ✓ **Type**: portée
- ✓ **Profondeur de travail**:25 à30 cm
- ✓ **Poids**:480 kg
- ✓ **Largeur de travail**:79 cm



**Figure 40**: Charrue bisocs.

Un passage d'un vibroculteur pour le travail conventionnel a permis un émiettement des premiers centimètres du sol (5à10cm)

Les caractéristiques techniques de ce vibroculteur sont les suivantes:

- ✓ **Largeur de travail:**3 m.
- ✓ **Nombre de dents :**26.
- ✓ **Diamètre de cage roulante:**550 mm.
- ✓ **Type:** porté
- ✓ **Profondeur de travail:**5 à15 cm
- ✓ **Poids:**400 kg



**Figure 41:** Vibroculteur

#### 8.1.4. Matériels de semis

##### - Pour le semis conventionnel

Le semis conventionnel pour les trois compagnes a été réalisé à l'aide d'un semoir en ligne (AGRIC PSM 30), il est caractérisé par :

- ✓ **Largeur de travail:**3 m.
- ✓ **Nombre d'élément distributeur:**19.
- ✓ **Distance entre les organes:**15 cm.
- ✓ **Système de distribution:** à cannelures.
- ✓ **Poids:**420 kg.
- ✓ **Type:** semi-porté



**Figure 42:** Semoir classique.

##### - Pour le semis direct

Dans la 1ere année 2013/2014 nous avons utilisées le semoir de semis direct (SEMEATO de type SHM 11/13). Les caractéristiques du semoir sont :

- ✓ **Système d'attelage :** traîné
- ✓ **Largeur de travail :** 2,10 m
- ✓ **Distance entre deux disques ouvreurs :** 20 cm.
- ✓ **Système de distribution :** Mécanique – hydraulique.
- ✓ **Volume de la trémie :** 270 L.



**Figure 43:** Semoir du semis direct SEMEATO SHM 11/13.

Pour les deux autres campagnes (2014/2015 et 2015/2016), les semis ont été réalisés à l'aide d'un semoir de semis direct (Sulky), ses caractéristiques techniques sont :

- ✓ **Largeur de travail:** 2.40 m.
- ✓ **Système de distribution:** à cannelures.
- ✓ **Nombre des éléments distributeurs:** 18.
- ✓ **Distances entre les rangs:** 18 cm.
- ✓ **Volume de la trémie:** 280L.
- ✓ **Type:** semi porté.



**Figure 44:** Semoir de semis direct.

### 8.1.5. Matériel de la lutte chimique

La lutte chimique a été effectuée avec un pulvérisateur à jet projeté, au régime de la prise de force de 540 tr/min.

Ses caractéristiques sont les suivantes:

- ✓ Largeur de travail: 9 m.
- ✓ Nombre de buses : 18
- ✓ Capacité 1200L.
- ✓ Type: semi-porté.



**Figure 45:** Pulvérisateur.

### 8.1.6. Matériel d'irrigation :

Pour irriguer la culture de sorgho fourrager nous avons utilisées les asperseurs de type C30



**Figure 46 :** Asperseur C30.

### 8.1.7. Matériel de récolte

Pour la récolte des fourrages nous avons utilisées une faucheuse alternative dont les caractéristiques sont les suivantes :

- ✓ **Type** : faucheuse alternative automotrice
- ✓ **Largeur de travail** : 1,2 m
- ✓ **Nombre de dents** : 29
- ✓ **Dents à section** : lisse



Figure 47 : Faucheuse alternative.

### 8.1.8. Matériels de mesure

#### 8.1.8.1. Matériels pour la détermination des propriétés du sol

➤ Pour le prélèvement des échantillons du sol, pour la mesure de la porosité et humidité, nous avons utilisé un cylindre dont les caractéristiques sont les suivantes:

- Diamètre: 49 mm.
- Hauteur: 51 mm.
- Volume: 0.96 dm<sup>3</sup>

$$V = \pi H \left(\frac{D}{2}\right)^2$$



Figure 48: Cylindre

➤ Pour l'enfoncement des cylindres, nous avons utilisés un marteau.

➤ Pour le séchage des échantillons du sol, nous avons utilisés une étuve, dont les caractéristiques suivantes:

- ✓ **Volume**: 1.6m<sup>3</sup>.
- ✓ **Température**: 180°

➤ Pour la pesée des échantillons, nous avons utilisés une balance de précision dont les caractéristiques sont les suivantes:

- ✓ **Poids max**: 5 kg
- ✓ **Type**: électronique.
- ✓ **Précision** : 0,01 g



Figure 49: Balance électronique.

➤ Pour la mesure de la résistance mécanique à la pénétration, nous avons utilisés un pénétromètre statique dont les caractéristiques sont les suivantes:

- ✓ **Force max:** 20 daN.
- ✓ **Profondeur max:** 35 cm
- ✓ **Type:** statique.



**Figure 50:** Pénétromètre.

### 8.1.8.2. Matériels pour la détermination des paramètres liés à la culture

➤ Pour la mesure des diamètres des tiges et des racines, nous avons utilisés un pied à coulisse numérique.



**Figure 51:** Pieds à coulisse.

➤ Pour le prélèvement des racines, nous avons utilisés un cube métallique dont les caractéristiques sont les suivantes:

- ✓ **Largeur:** 25 cm.
- ✓ **Longueur:** 25 cm.
- ✓ **Hauteur:** 30 cm.
- ✓ **Volume:** 18.75 dm<sup>3</sup>

## 8.2. Méthodologie expérimentale

### 8.2.1. Méthodologie de réglage pour le matériel de semis

#### 8.2.1.1. Réglage des semoirs

Le semoir n'étant pas équipés de manivelle, on doit agir sur la roue du semoir, pour le réglage il faut:

- Mesurer la largeur du semoir
- Mesurer la circonférence de la roue du semoir.  **$C = 2\pi R$ .**

Donc, pour un tour de la roue, la surface ensemencée par le semoir de largeur B:

$$S = C \times B (m^2)$$

Avec:

- S surface ensemencée en (m<sup>2</sup>).
- C circonférence de la roue en (m).
- B : largeur de travail en (m).

### 8.2.1.2. Réglage de la dose de semis:

Pour le réglage de la dose de semis, la relation suivante a été utilisée:

$$Ds = \frac{(PMG \times Dp)}{FG}$$

Avec:

- Ds: dose de semis g/m<sup>2</sup>.
- PMG: poids de mille grains(g).
- FG: faculté germinative(%).
- Dp: densité des plants par m<sup>2</sup> (plants/m<sup>2</sup>).

## 8.2.2. Méthodologie des mesures liées au sol

### 8.2.2.1. Détermination de l'humidité

L'humidité du sol est l'un des facteurs les plus importants pour le développement des cultures. Pour la détermination de l'humidité du sol, nous avons donc utilisé la méthode de l'humidité pondérale (Duchauffour, 1997). Les prélèvements ont été effectués à l'aide du même cylindre qu'on a utilisé dans la détermination de la densité apparente, sur chaque parcelle élémentaire de chaque technique. Les échantillons sont prélevés sur trois horizons 0-10, 10-20 cm et 20-30 cm.

La méthode de mesure de la teneur en eau d'un échantillon de sol s'effectue simplement par pesée avant et après étuvage, ces deux valeurs correspondant respectivement au poids total de l'échantillon (Pt) et le poids de fraction solide (Ps). La teneur en eau pondérale (H%) vaut alors :

$$H(\%) = \frac{(Pt - Ps)}{Ps} \times 100$$

Avec:

- H(%): taux d'humidité(%).
- Ps: poids sec (g).
- Pt : poids total du sol(g).

### 8.2.2.2. Détermination de la porosité

La porosité est calculée à partir de la relation suivante:

$$n(\%) = \left(1 - \frac{D_a}{D_r}\right) \times 100$$

Avec:

- n:porosité totale(%).
- Da: densité apparente (g/cm<sup>3</sup>).
- Dr: densité réelle (g/cm<sup>3</sup>).

#### a. Détermination de la masse volumique sèche

Pour la détermination de la porosité apparente ou masse volumique sèche (da), les mêmes échantillons utilisés pour la détermination de l'humidité ont été repris en tenant compte du volume du cylindre. La densité apparente (da) est calculée à l'aide de la relation suivante :

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

Avec:

- Da: densité apparente ou masse volumique sèche (g/cm<sup>3</sup>).
- Ps: poids sec(g).
- V: volume de l'échantillon de terre (cm<sup>3</sup>).

#### b. Détermination de la densité réelle

La densité réelle du sol est déterminée par la méthode de l'éprouvette ; le principe consiste à verser certain poids du sol (sol séché à l'étuve à 105° pendant 24h) dans une éprouvette graduée contenant un certain volume d'eau (V<sub>0</sub>) connu; les échantillons sont laissés jusqu'à la disparition totale de toutes les bulles d'air. Le volume d'eau déplacé correspond à celui de la terre. Ce qui donne un volume de (V<sub>1</sub>-V<sub>0</sub>)

La densité réelle se calcule alors par la formule suivante:

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

Avec:

- Dr: densité réelle (g/cm<sup>3</sup>).
- Ps: poids du sol sec(g).
- V: volume d'eau déplacé  $V = V_1 - V_0$

- $V_0$ : volume d'eau initial ( $\text{cm}^3$ ).
- $V_1$ : volume d'eau final ( $\text{cm}^3$ ).

### 8.2.2.3. Détermination de la résistance pénétrométrique

La mesure de la résistance pénétrométrique est réalisée par le 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 (graduée en Kilo gramme-force)

Avant l'utilisation de pénétromètre, il faut faire un étalonnage au laboratoire.

L'étalonnage est une façon de vérification de l'efficacité du ressort du pénétromètre, et aussi la correction des valeurs de la résistance pénétrométrique obtenus par la suite. La méthode d'étalonnage consiste à poser des charges sur la poignée du pénétromètre puis enregistrer le déplacement du curseur. Voir figure ci-dessous.

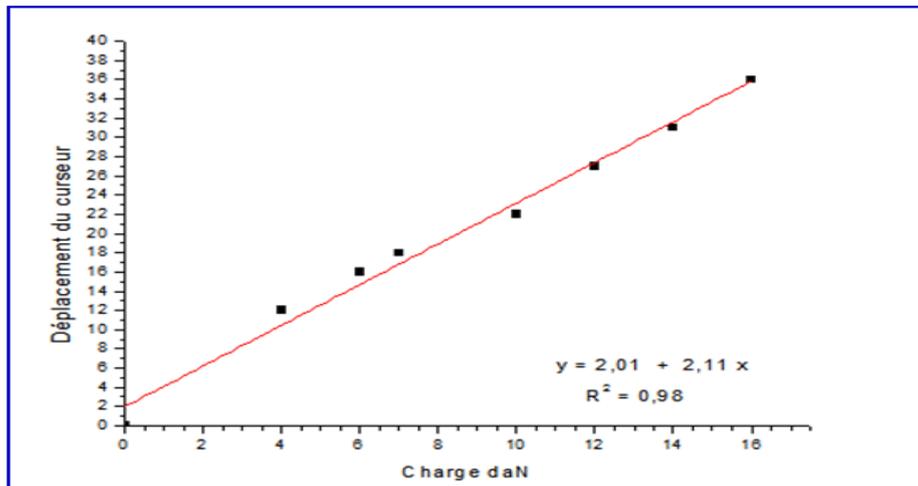


**Figure 52:** Etalonnage d'un pénétromètre

Les résultats sont consignés dans le tableau et illustrés par la figure au-dessus:

**Tableau 15: Résultats de l'étalonnage.**

Les charges en (daN)	4	6	7	10	12	14	16
Déplacement du curseur (cm)	12	16	18	22	27	31	36



**Figure 53: Droite d'étalonnage.**

La valeur du coefficient de détermination  $R^2 = 0,98$ , nous pouvons donc signaler que la déformation (compression) du ressort du pénétromètre suit une loi normale ( $y = a.x + b$ ). Les résultats obtenus seront donc fiables. La valeur de la résistance pénétrométrique est donnée par la relation:

$$X = \frac{y - 2,01}{2,11}$$

Où « x » représente l'effort appliqué sur la pointe du pénétromètre, soit la valeur corrigée de la charge appliquée sur la pointe du pénétromètre. Ou « y » représente la valeur enregistrée par le curseur sur le pénétromètre.

La valeur de la résistance pénétrométrique est calculée par la relation suivante :

$$R_p = x / \text{surface projetée du cône du pénétromètre qui est de } 1,767 \text{ cm}^2$$

Les valeurs obtenues nous renseignent sur l'aptitude des racines à pénétrer dans le sol.

### 8.2.3. Méthodologie des mesures liées à la culture

#### 8.2.3.1. Détermination de la densité racinaire

Pour obtenir la densité racinaire, on a utilisé la technique de carottage à l'aide d'un cube métallique d'un volume connu ( $18,75 \text{ dm}^3$ ) soit 25cm de largeur, 25cm de longueur et 30 cm de hauteur, l'extrémité affûtée a été enfoncée dans le sol d'une façon mécanique dans l'horizon (0-20 cm) ; puis dégagé en creusant autour.

Une fois les échantillons prélevés, on va extraire les racines sous la pression du jet d'eau. Une fois les racines extraites on mesure leurs poids.



**Figure 54** : Les étapes de la technique de carottage

Cas de sorgho fourrager

On a déterminé la densité racinaire par la relation suivante :

$$De = Pr / Vc$$

Avec :

De : densité racinaire.

Pr : poids des racines.

Vc : volume du cube.

### 8.2.3.2. Détermination du diamètre des racines

Après le prélèvement et le triage des racines, on a mesuré leurs diamètres à l'aide d'un pied à coulisse électronique. On place les racines propres entre les deux extrémités du pied à coulisse, l'appareil affiche le diamètre de la racine sur l'écran (en mm).

## 8.2.4. Méthodologie de mesure liée au rendement et ses composantes

### 8.2.4.1. Dans le cas de sorgho fourrager:

Il s'agit de faire des prélèvements en matière verte sur des échantillons de 1m<sup>2</sup> de la culture au stade fin montaison et début épiaison qui correspond en fait à la 1<sup>ère</sup> coupe. la matière verte récoltée sera ensuite pesée.

Pour obtenir le rendement en matière sèche, les échantillons de chaque parcelle sont passés à l'étuve (95°) pendant 3 jours (en raison de la teneur de dessèchement des tiges du sorgho), les taux de matière sèche ont été déterminés par la formule suivante :

$$Ms\% = \frac{Ps}{Ph} \times 100$$

D'où :

Ps: Poids sec (kg);

Ph: Poids humide (kg).

### 8.2.4.2. Dans le cas de bersim:

La détermination du rendement de bersim a été réalisée à l'aide d'un couteau et un carrée métallique (625 cm<sup>2</sup>), ou on a enlevé le bersim, peser avant et après l'étuve, on a obtenu le poids de la matière sèche et avec une simple règle de trois on a converti le rendement dans un hectare (ha).

### 8.2.4.3. Dans le cas de blé dur :

#### - Mesure du nombre d'épi/m<sup>2</sup>

Cette mesure a été faite à l'aide d'un carré d'un mètre de coté jeté d'une façon aléatoire dans la micro parcelle. Le nombre d'épis contenu dans le carré est compté directement. Nous avons pris la moyenne de huit échantillons par traitement.

#### - Mesure du nombre de grains/épi

Pour la mesure de ce paramètre, nous avons récolté 10 épis de chaque micro parcelle, les prélèvements ont été réalisés d'une manière aléatoire, puis les épis ont été battus manuellement. Le nombre de grains/épi égal au nombre de grains total divisé par le nombre d'épis 10. Cette caractéristique est utilisée pour le calcul du rendement estimé.

#### - Mesure du poids de mille grains

Le comptage du poids de mille grains a été réalisé à l'aide du compte grains électrique. Nous avons pris la moyenne de trois comptages par technique, ces échantillons ont été pesés par une balance électronique de précision.

#### - Mesure du rendement théorique

Pour la mesure de ce paramètre nous avons utilisé la relation suivante:

$$\text{Rendement estimé (kg/m}^2\text{)} = \text{nombre épis/m}^2 \times \text{PMG (kg)} \times \text{nombre grains/épi}$$

# *Résultats et discussions*

*Chapitre 9*  
*Analyse de l'effet des techniques culturales*  
*sur*  
*l'état structural du sol*

## Chapitre 9 : Analyse de l'effet des techniques culturales sur l'état structural du sol

### Introduction

Dans cette partie, nous abordons la présentation des résultats qui concernent l'effet des différentes techniques culturales sur l'état structural du sol. Les paramètres analysés sont respectivement, la teneur en eau dans le sol, la porosité et en fin la résistance à la pénétration du sol. Les résultats sont consignés ci-dessous selon les cultures étudiées.

### 9.1.Effet des techniques culturales sur la teneur en eau du sol

La conservation de l'eau est un paramètre important de la qualité du sol. Il constitue souvent un facteur limitant dans la productivité en agriculture. Le choix d'une technique de travail du sol repose essentiellement sur son aptitude à permettre au sol de stocker l'eau et la rendre disponible aux racines particulièrement dans les climats à faible pluviométrie.

#### 9.1.1. Cas de la culture du sorgho fourrager

Les valeurs détaillées obtenues pour les différentes techniques figurent dans le tableau A-1-1' en annexe, les valeurs moyennes de la variation de la teneur en eau du sol en fonction de la technique et de la profondeur sont illustrées par les figures 55 et 56

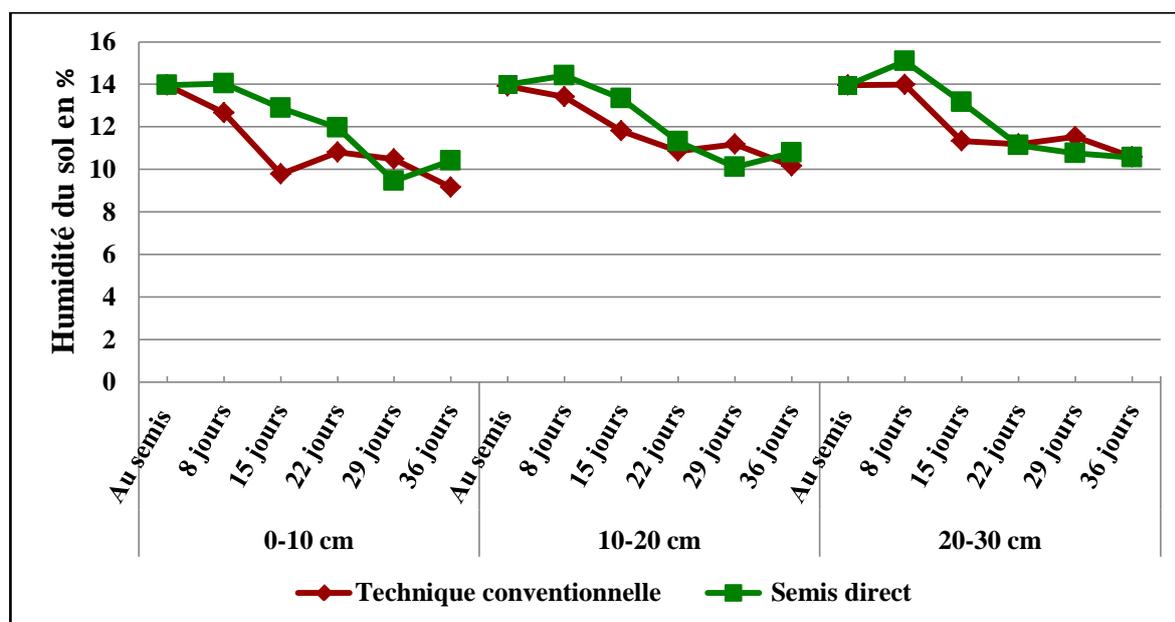
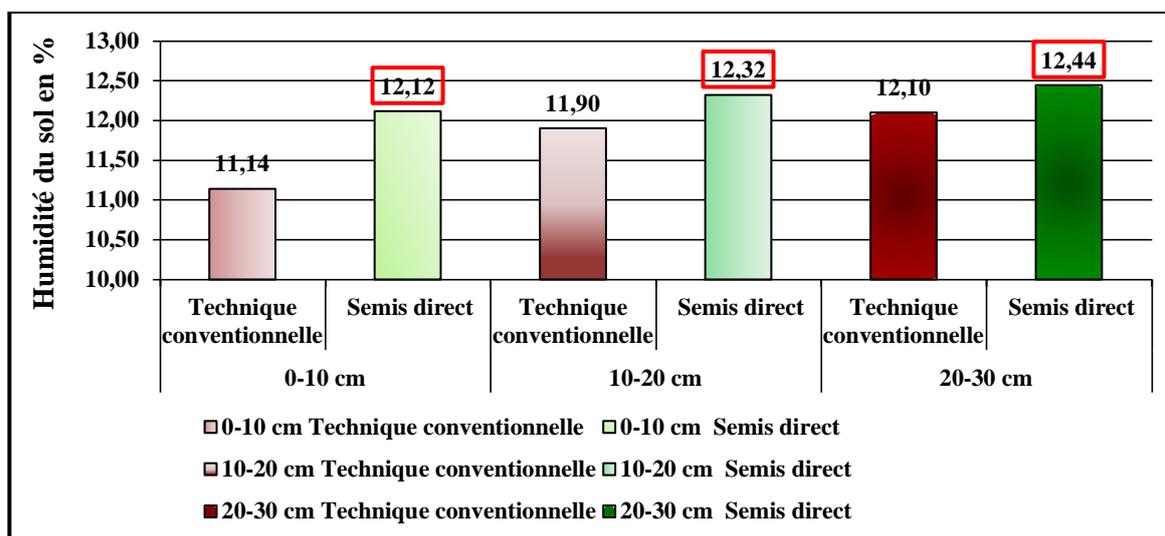


Figure 55: Evolution de la teneur en eau du sol dans le temps en %  
Cas du sorgho fourrager.



**Figure 56:** Variation de la teneur en eau du sol en fonction de la technique et de la profondeur en % cas du sorgho fourrager.

D'après les résultats obtenus et leur représentation sur les figures ci-dessus, nous avons remarqué que la teneur en eau dans le sol est à chaque fois supérieure au niveau de la technique du semis direct et ce quel que soit la période et la profondeur.

D'après la figure 55 nous remarquons qu'au niveau du premier horizon (0-10 cm) le taux d'humidité est plus élevée dans les sols menés en semis direct par rapport à ceux menés en travail conventionnel pendant tout le cycle végétatif. Cela s'expliquerait par le fait qu'au niveau des parcelles non labourées il y a une couverture végétale du précédent cultural en surface. Cette dernière contribue à la diminution de l'évaporation (effet mulch), le sol reste humide plus longtemps, ce qui diminuerait sa compacité.

Au niveau du deuxième horizon, le taux d'humidité est toujours supérieur pour le semis direct et inférieur pour la technique conventionnelle. Cette différence a été enregistrée pendant tout le cycle végétatif avec un écart moyen de 1,52 % après quinze jours après le semis, cet écart s'explique par le non découpage de cet horizon au niveau du semis direct, par contre pour l'horizon précédent où les socs du semoir ont fait des sillons sur la bande de terre, l'effet des techniques culturales se manifeste très bien à cet horizon.

Pour le troisième horizon, la supériorité du taux d'humidité est toujours marquée pour le semis direct avec cependant un faible écart (0,34 %), cela s'expliquerait par la structure du sol qui est presque identique pour les deux techniques, prêt de la semelle de labour pour le travail conventionnel et l'absence du travail du sol dans cet horizon pour le semis direct.

La capacité d'adaptation du sorgho au stress hydrique est bien connue. Cependant elle a ses limites qui ont été mises en évidence ces dernières années (Deumier et al, 1980 IN Feddal, 2011). Selon toujours les mêmes auteurs, des différences de l'ordre de 30 à 40q/ha ont été obtenues entre des cultures irriguées et des cultures conduites en sec. L'irrigation est donc intéressante si l'on veut atteindre un bon rendement ou le rendement potentiel des variétés.

La période la plus sensible au manque d'eau se situe du stade gonflement à la floraison. En cas de stress hydrique pendant cette période, la fertilité des panicules est systématiquement affectée. Avant cette période,

pendant la montaison, du stade 8-10 feuilles au stade gonflement, au besoin en eau non satisfait peut limiter la croissance du peuplement, perturber l'épiaison de certaines variétés et affecter la fertilité des panicules. Ce risque est accentué en cas de densité de peuplement trop élevée (**Deumier et al, 1980 in Feddal, 2011**)

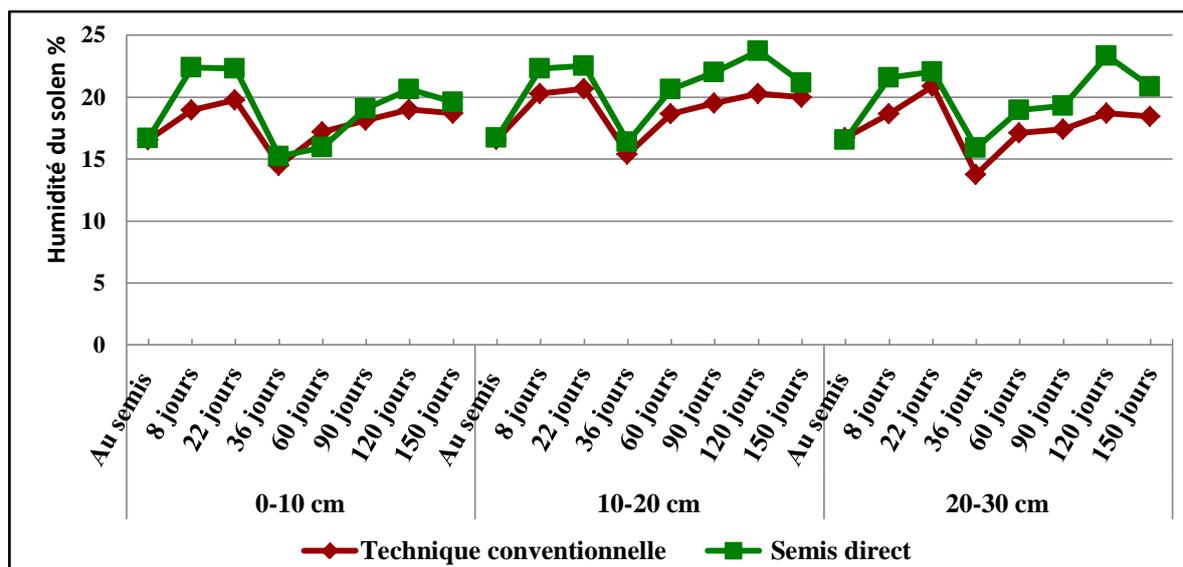
De façon générale, les différents passages des outils aratoires, par leurs actions, ont un effet diminutif sur la teneur en eau dans le sol et par conséquent sur la conservation de l'eau dans le sol par rapport au semis direct qui a pour principal avantage la conservation de l'eau dans le sol. (**Feddal, 2011**)

Ces résultats sont en accord avec les travaux de **Nouiri et al (2004)**, à l'issue d'une étude comparative de la dynamique de l'eau dans les couches du sol entre la technique du semis direct et celle du conventionnel effectuée en Tunisie, qui ont montré que le non labour valorise mieux les apports d'eau en préservant la quantité d'eau présente dans le sol avec un écart de 5% en sa faveur.

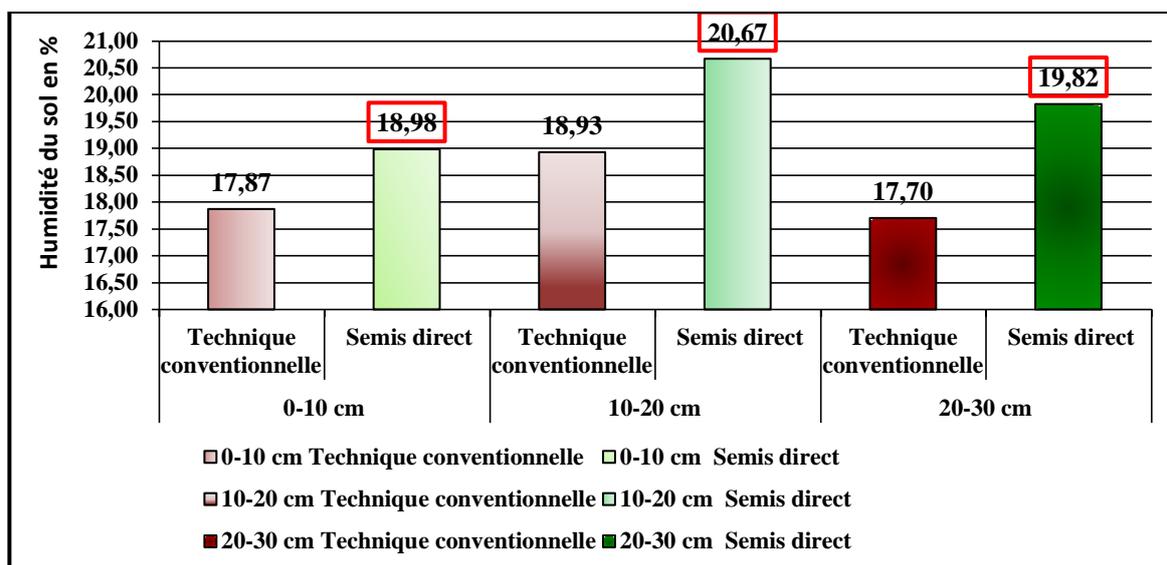
Nos résultats sont aussi conformes à ceux de **Bourguignon (2004)**, sur des sols argilo-calcaires tunisiens, qui affirme également que l'évolution de l'humidité du sol passe de 5,8 % à 12,7% en labour et de 10,6 % à 17,3% en semis direct de l'année 2001 à l'année 2004, confirmant ainsi que le non labour sous couvert végétal retient plus d'humidité dans le sol notamment après quelques années de conduite en semis direct.

### 9.1.2. Cas de la culture du blé dur

Les valeurs détaillées obtenues pour les différentes techniques figurent dans le tableau A-2-2' en annexe, les valeurs moyennes de la variation de la teneur en eau du sol en fonction de la technique et de la profondeur sont illustrées par les figures 57 et 58



**Figure 57:** Evolution de la teneur en eau du sol dans le temps en %  
Cas du blé dur.



**Figure 58:** Variation de la teneur en eau du sol en fonction de la technique et de la profondeur en % cas du blé dur.

Les résultats, représentés dans les figures, montrent que le semis direct permet une meilleure rétention en eau par rapport au labour conventionnel et ce quelle que soit la profondeur du prélèvement. En effet l'humidité varie de 18,98 à 20,67 % pour la technique du semis direct et il n'est que de 17,70 à 18,93 % pour la technique conventionnelle.

D'après la figure 57, nous remarquons qu'au niveau du premier horizon l'humidité du sol diffère pour les deux techniques. Pour le travail conventionnel le taux d'humidité atteint son maximum après 22 jours il est de 19 %, l'écart enregistré dans cette période est de 2,55% entre le semis direct et la technique conventionnelle.

Après 36 jours, on enregistre l'humidité la plus basse pour les deux techniques, elle est respectivement de 14.50% et 15.24 % pour le travail conventionnel et le semis direct.

Au de-là de 60 jours, on remarque une augmentation du taux d'humidité pour les deux techniques mais avec un écart important qui dépasse 1.64 %

Cette différence entre les techniques culturales s'expliquerait par le fait qu'au niveau des sols labourés il y a une évaporation plus importante comparativement aux sols non travaillés, qui présente de résidus en surface qui réduisant l'évaporation.

Au niveau du deuxième horizon, le constat est presque le même mais avec des valeurs un peu plus élevées. Le taux d'humidité atteint son maximum pour le travail conventionnel après 22 jours avec un taux de 20.66% et après 120 jours pour le semis direct avec un taux de 23.72%. L'écart moyen entre les deux techniques est de 1.74% durant tout le cycle végétatif de la culture, cet écart se traduit par l'effet des racines de cultures précédentes qui créent une porosité biologique ce qui permet une meilleure infiltration de l'eau en profondeur.

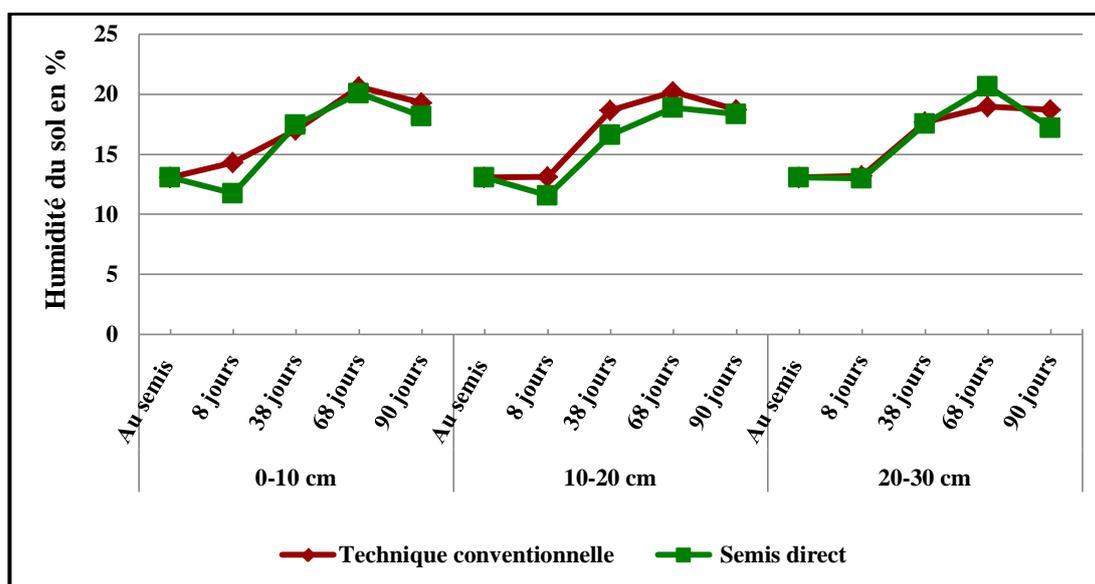
Pour le troisième horizon, le taux d'humidité est toujours supérieur au niveau de semis direct par rapport à la technique conventionnelle, cette différence a été enregistrée pendant tout le cycle végétatif avec un écart moyen de 2.12 %. On remarque toutefois au niveau de semis direct que l'humidité atteint son maximum après 120 jours avec un taux de 23.32 % et sa plus basse valeur après 36 jours avec un écart de 2.1 % par rapport au travail conventionnel. Cet écart se traduit par l'absence de travail du sol et la présence microbienne dans cet horizon.

Finalement, le semis direct permet une meilleure rétention par le sol de l'eau par rapport aux techniques conventionnelles en période végétative. Cette particularité du semis direct offre à la culture un meilleur comportement en situation de déficit hydrique notamment au stade de formation du grain, qui contribue dans l'élaboration d'une composante importante du rendement (poids des grains).

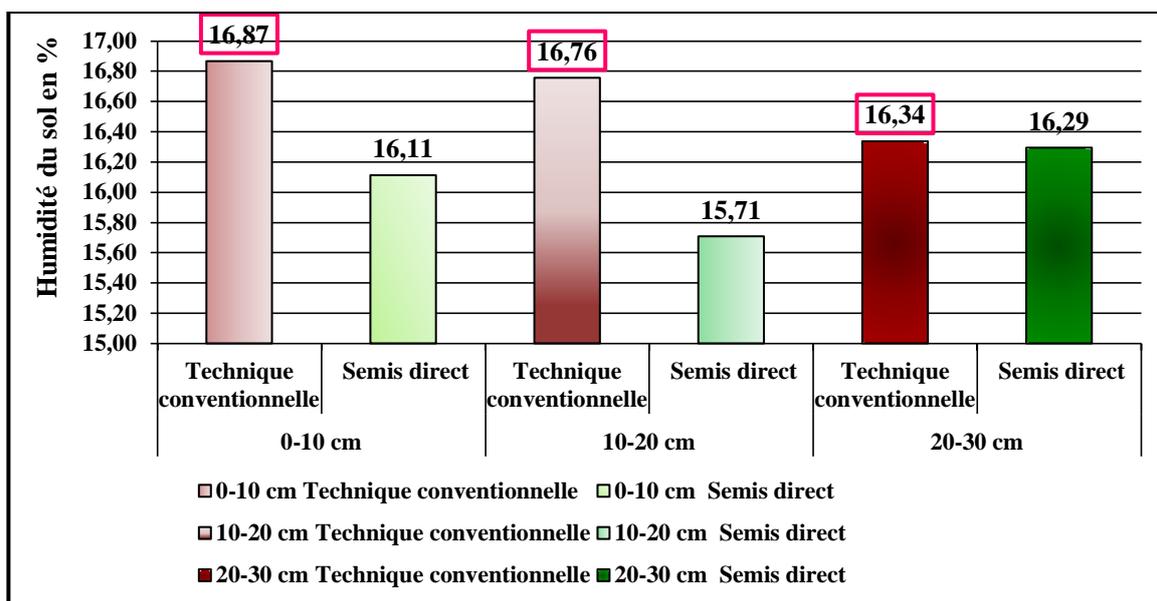
Nos résultats sont aussi conformes à d'autres essais ; ceux menés en (2000 à 2005) sur le blé, réalisé par le **CEMAGREF** en France ; en effet ces essais montrent que le semis direct valorise mieux les apports d'eau que le semis après travail profond avec un écart d'efficacité de 11%, il a permis de mieux préserver la quantité d'eau présente dans le sol avec un écart en sa faveur de 5%, ces résultats peuvent être attribués à l'augmentation des taux d'infiltration sous l'effet des chaumes laissées en surface. (**Khaledian et al,2005**). Les travaux menés par **Mrabet (1997)** qui stipule que la non manipulation du sol et le maintien d'un couvert végétal aident à prolonger la durée du dessèchement de la surface et gardent le sol plus humide une période de temps plus longue confirment également nos travaux.

### 9.1.3. Cas de la culture du bersim

Les valeurs détaillées obtenues pour les différentes techniques figurent dans le tableau A-3-3' en annexe, les valeurs moyennes de la variation de la teneur en eau du sol en fonction de la technique et de la profondeur sont illustrées par les figures 59 et 60



**Figure 59:** Evolution de la teneur en eau du sol dans le temps en %  
Cas du bersim.



**Figure 60:** Variation de la teneur en eau du sol en fonction de la technique et de la profondeur en % cas du bersim.

Contrairement au sorgho et au blé, le premier constat à faire est que la teneur en eau dans le sol est à chaque fois supérieure au niveau de la technique conventionnelle et ce quel que soit la profondeur.

D'après les figures, nous remarquons qu'au niveau du premier horizon l'humidité du sol évaluée de façon similaire pour les deux techniques, il est légèrement meilleur pour les sols labourés, avec un écart moyen de 0,76% par rapport au sol non travaillés.

Une grande différence est enregistrée après 8 jours entre le travail conventionnel et le semis direct qui est de l'ordre de 2.60%. Cet écart est traduit par la présence des mauvaises herbes au niveau de parcelles de semis direct qui épuisent l'eau du sol pour leurs développements.

Au niveau du deuxième horizon, le constat est le même que le premier horizon puisque les valeurs de l'humidité évoluent de façon croissante durant tout le cycle végétatif de la culture et cela pour les deux techniques culturales étudiées, mais avec un écart plus important qui est de l'ordre de 1.05%.

Pour le troisième horizon, nous remarquons que les valeurs du taux d'humidité entre le semis et 38 jours après sont très rapprochées pour les deux techniques culturales, après 68 jours on enregistre un taux d'humidité nettement plus élevé pour le semis direct avec un écart de 1.64% par rapport au travail conventionnel, cela peut être due à l'évaporation important de l'eau dans les sols travaillés.

Une grande différence est à remarquer au niveau de la deuxième profondeur, c'est-à-dire de 10 à 20 cm. Elle est respectivement de 15,1 % pour la technique Semis direct et de 16 % pour la technique conventionnelle.

Finalement, le travail conventionnel à une meilleure rétention pour l'eau par rapport au semis direct en période végétative, cela est probablement due au fait que la technique conventionnelle permet une meilleure infiltration de l'eau dans le sol, qui remonterait par effet capillaire après passage des outils de préparation du lit de semence.

## 9.2.Effet des techniques sur la porosité du sol

Le deuxième paramètre analysé est la porosité, ce dernier conditionne pour une grande part la rétention d'eau par le sol, l'aération des racines ainsi que leur oxygénation, et leur progression dans le sol.

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 sa 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 non-travail du sol et le passage répété d'engins lourds. C'est la stabilité de la structure qui affecte indéniablement l'état du sol, les pores y compris.

### 9.2.1. Cas de la culture du sorgho fourrager

Les valeurs détaillées obtenues pour les différentes techniques figurent dans le tableau B-1-1' en annexe, les valeurs moyennes de la variation de la porosité du sol en fonction de la technique et de la profondeur sont illustrées par les figures 61 et 62

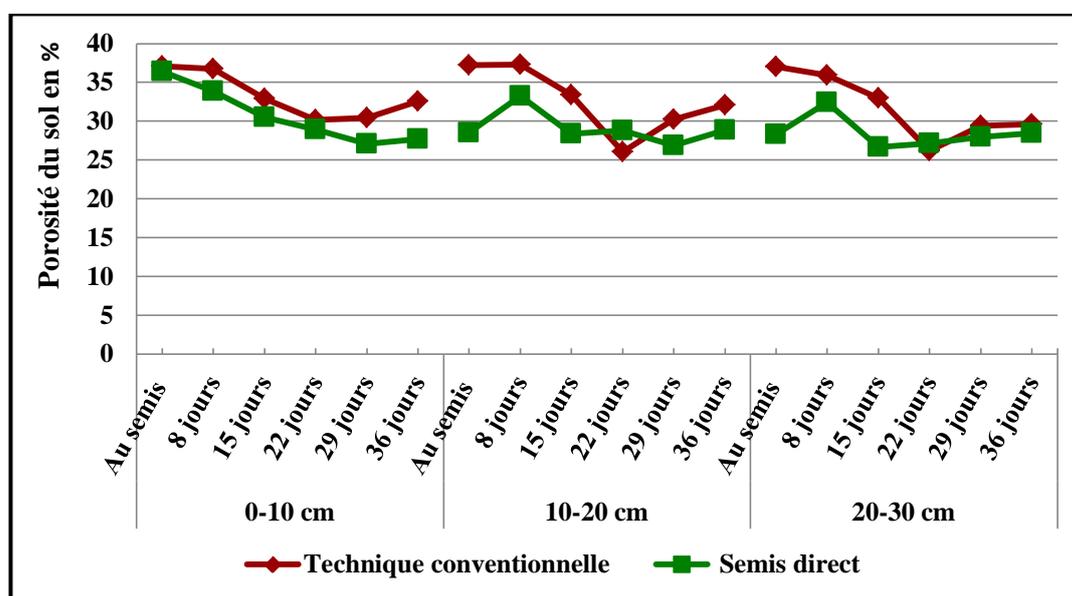
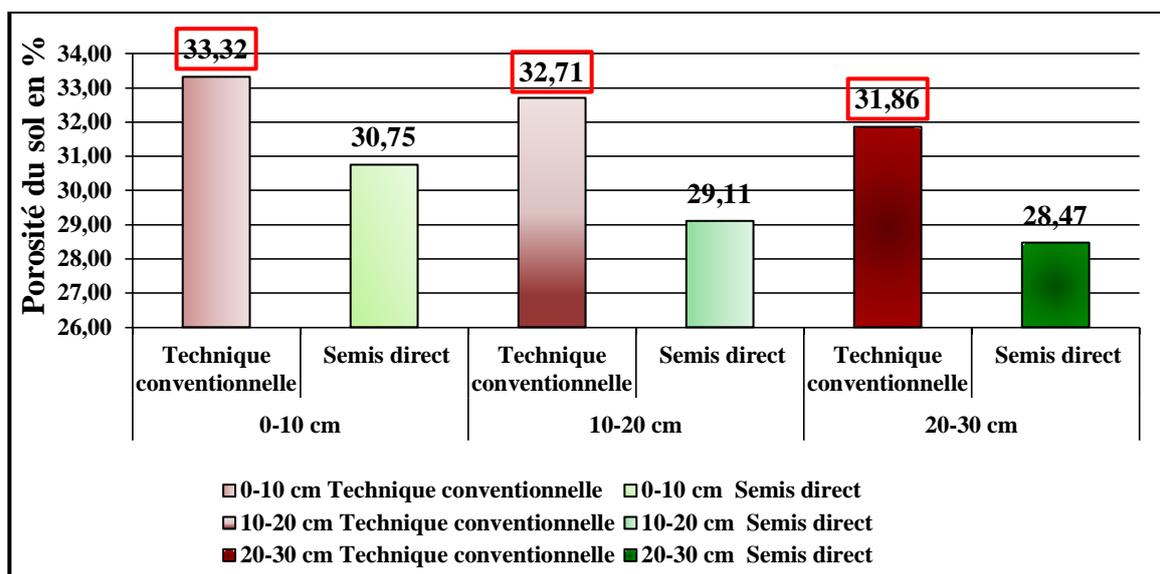


Figure 61: Evolution de la porosité du sol dans le temps en % cas du sorgho fourrager.



**Figure 62:** Variation de la porosité du sol en fonction de la technique et de la profondeur en % cas du sorgho fourrager.

D'après les résultats obtenus et leur représentation sur les figures ci-dessous, nous avons remarqué que la porosité du sol est à chaque fois supérieure au niveau de la technique conventionnelle et ce quel que soit la profondeur.

D'après la figure 62, nous remarquons un décroissement continu de la porosité du premier au dernier horizon pour les deux techniques culturales.

Au niveau de la couche supérieure (horizon 0-10), la porosité du sol est plus élevée dans les sols travaillés par rapports à ceux menés en semis direct durant tout le cycle de la culture.

En effet une nette différence est marquée entre les deux techniques ou on a enregistré une différence de 2,57 %.

On remarque aussi une diminution de la porosité pour les deux techniques dans le temps, cette diminution se traduit par la fermeture des pores du sol et la précipitation qui agit aussi sur la cohésion des particules du sol.

Pour le deuxième horizon, Les sols labours présentent toujours une grande porosité par rapport aux celles de semis direct, l'écart entre les deux techniques est plus important par rapport au premier horizon il est de 3,6%. la stabilité partielle de la porosité dans cet horizon se traduit par le non effet du labour secondaire c'est-à-dire que la terre est fissurée à cause du labour mais il n'est pas émietté.

Concernant le troisième horizon, l'évolution de la porosité du sol elle a la même tendance que les autres horizons, l'écart est plus important il est de 3,4% entre le semis direct et le travail conventionnel. La différence de la porosité entre les techniques se traduit par le travail ou le non travail de la bande de terre et leur profondeur.

D'une manière générale, les résultats montrent que la porosité est plus importante dans les sols labourés à différentes profondeurs étudiées et dans le temps. En effet la charrue décompacte le sol jusqu'à une profondeur de 25 cm, elle provoque un remaniement et un retournement de la terre, ce qui crée un nouvel arrangement des mottes de terre et par conséquent des vides qui augmentent la proportion des pores.

Donc les différents passages des outils aratoires par leurs actions et leur profondeur de travail ont un effet positif sur la porosité du sol, donc le travail du sol à un avantage très important pour un bon développement des racines.

### 9.2.2. Cas de la culture du blé dur

Les valeurs détaillées obtenues pour les différentes techniques figurent dans le tableau B-2-2' en annexe, les valeurs moyennes de la variation de la porosité du sol en fonction de la technique et de la profondeur sont illustrées par les figures 63 et 64

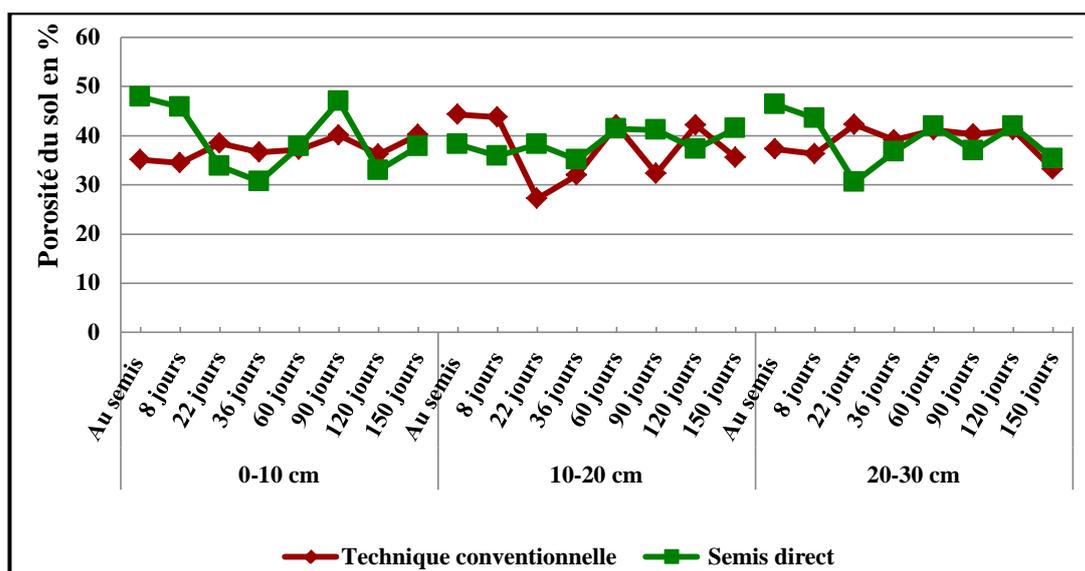


Figure 63: Evolution de la porosité du sol dans le temps en % Cas du blé dur.

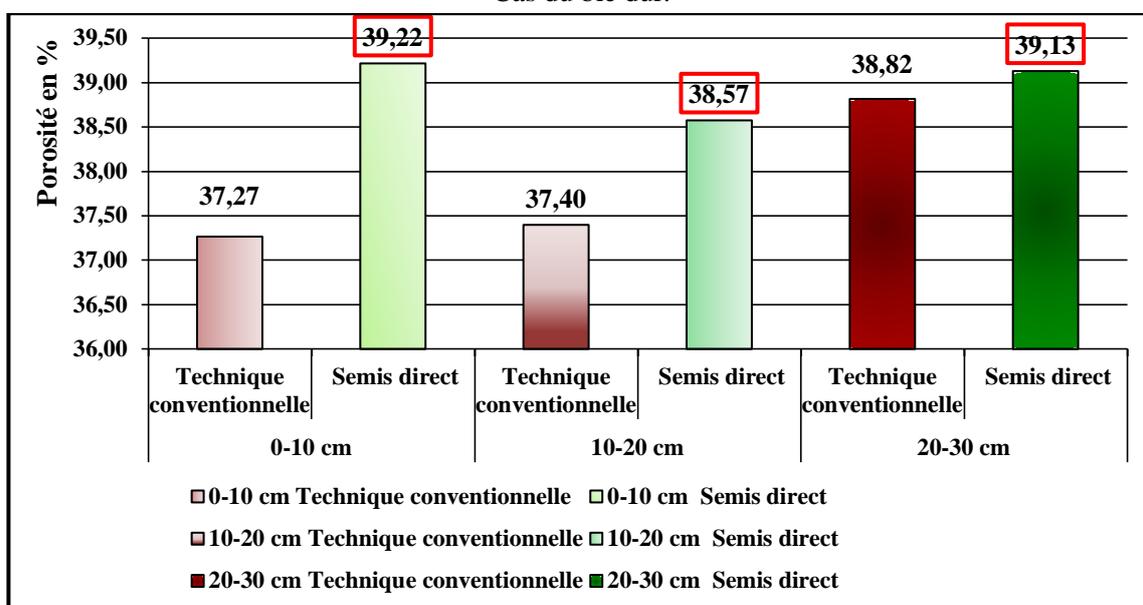


Figure 64: Variation de la porosité du sol en fonction de la technique et de la profondeur en % cas du blé dur.

Ces représentations graphiques montrent clairement que, quelque soit la profondeur, la porosité est plus importante au niveau du semis direct. Ces valeurs sont probablement justifiées par le fait qu'après les labours, il y

a eu forte chute de pluie qui a eu un effet sur la dégradation des mottes par érosion hydrique, ce qui fait que la terre fine descend et crée un milieu compact au niveau du travail conventionnel. Par contre au niveau des parcelles du semis direct, la surface du sol étant couverte par la chaume et les racines des mauvaises herbes qui maintiennent une certaine humidité dans le sol avec maintien de la structure.

D'après la figure 64, et pour le premier horizon, nous remarquons une diminution de la porosité au niveau de la technique du semis direct du semis jusqu'au 36 jours après, puis elle augmente jusqu'atteint son maximum avec un taux de 47%, contrairement aux sols travaillés où le taux d'humidité augmente avec le temps, il passe de 34.43 % à 40.16% .l'écart moyen entre les deux techniques est de 1,95%.

Pour le deuxième horizon, les valeurs de la porosité est presque stable au niveau de semis direct, elle augment au fur et à mesure avec le temps, passe de 35.82 % à 41.48%, contrairement aux sols travaillés où les valeurs sont instable durant tout le cycle végétatif de la culture où on enregistre une valeur maximale 43,78 %, et une valeur minimale de 27,15 %. Cette différence se traduit par le fait que le travail du sol provoque une perturbation dans la structure du sol donc une variation de la porosité dans le sol, ce qui n'est pas le cas pour le semis direct qui possède une structure stable (non travail de la bande de terre).

Pour ce qui est de la comparaison entre les deux techniques pour cet horizon on peut dire que la porosité des sols en semis direct est meilleure avec un écart de 1.17% par rapport aux sols labourés.

Pour le troisième horizon, on enregistre des valeurs de porosité rapprochées pour les deux techniques après 36 jours jusqu'au fin de cycle végétatif, et dans cet horizon où on trouve les valeurs maximales de porosité pour le travail conventionnel avec un taux de 38.82%.

De façon générale, la suppression du labour mettre le sol à un état presque stable durant tout le cycle de la culture, la petite différence qui manifeste est le résultat de la densité racinaire qu'il est différente dans les différents stades de développement de la culture.

### 9.2.3. Cas de la culture du bersim

Les valeurs détaillées obtenues pour les différentes techniques figurent dans le tableau B-3-3' en annexe, les valeurs moyennes de la variation de la porosité du sol en fonction de la technique et de la profondeur sont illustrées par les figures 65 et 66

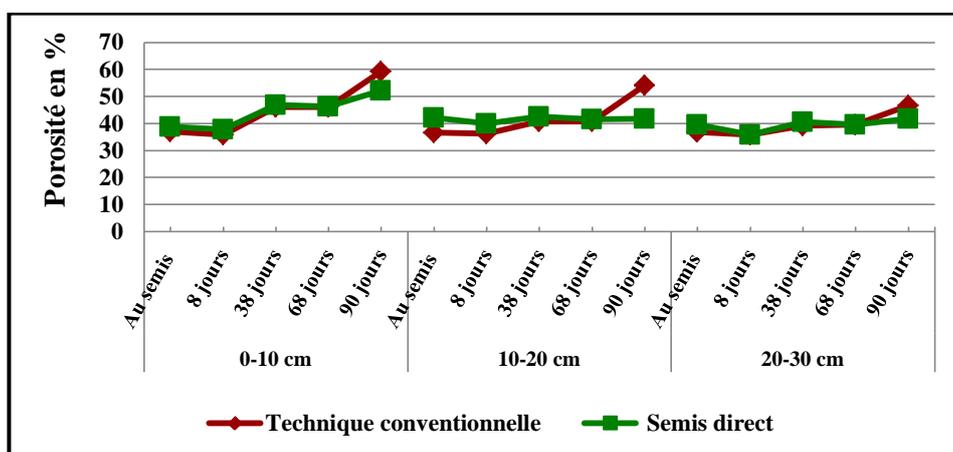
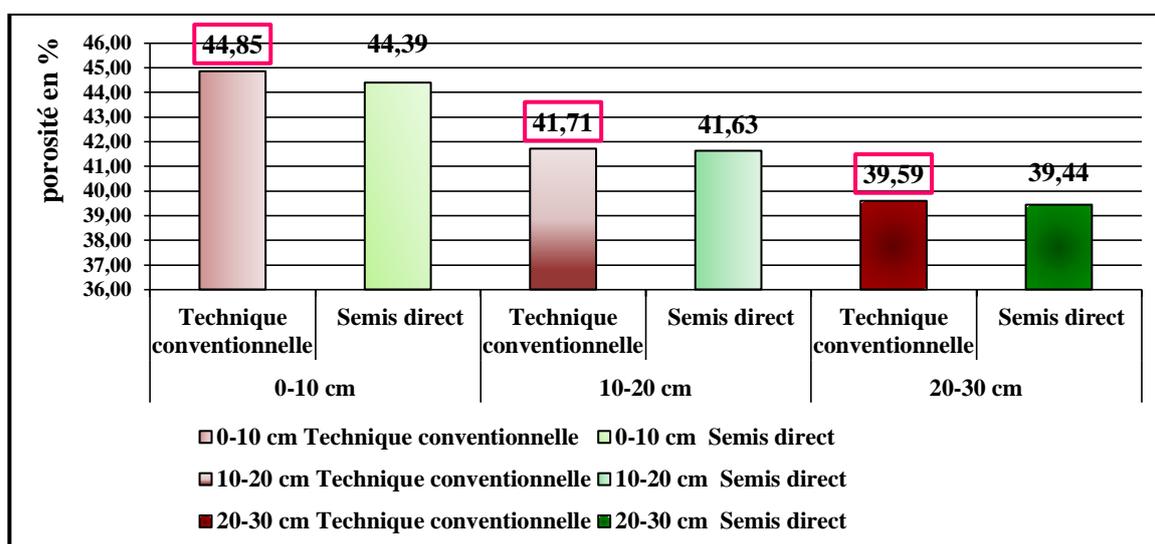


Figure 65: Evolution de la porosité du sol dans le temps en % Cas du bersim.



**Figure 66:** Variation de la porosité du sol en fonction de la technique et de la profondeur en % cas du bersim.

Ces représentations graphiques montrent avant tout que la porosité est plus importante sur les parcelles travaillées avec la technique conventionnelle quelque soit la profondeur.

D'après la figure 66, nous remarquons un décroissement continu de la porosité du premier au dernier horizon pour les deux techniques culturales, qui se traduit par la précipitation qui agit sur la cohésion des particules du sol.

Au niveau des trois horizons, la porosité du sol évaluée de façon croissante et similaire pour les deux techniques culturales, avec des écarts faibles sauf après 68 jours, où nous avons marquée une nette différence entre les deux techniques culturales avec des écarts de l'ordre 7.01%, 12.32% et 4.86 %, respectivement pour les trois horizons (0-10, 10-20, 20-30). Ces valeurs sont justifiées par la forte chute de pluie après le labour qui a eu un effet sur la dégradation des mottes et par conséquent provoque une diminution de volume des pores, par contre au niveau des parcelles du semis direct, les racines de cultures précédentes permettent de créer une porosité biologique.

Globalement, les résultats montrent clairement l'effet du passage des différents outils aratoires sur la porosité du sol : la valeur moyenne de la porosité est plus importante au niveau du premier horizon (0-10) sur les parcelles travaillées avec la charrue à socs. Elle est respectivement de 44,85 % pour la technique conventionnelle et de 44,33 % pour la technique de semis direct.

La porosité du sol joue un rôle important dans les échanges hydriques et gazeux, ainsi que dans le développement racinaire. Elle est souvent sujette à des modifications variables lorsque les sols sont compactés. Généralement, la compaction affecte la qualité physique du sol, elle réduit la porosité, ce qui entraîne une mauvaise aération du sol, un mauvais drainage et augmente la résistance à la pénétration des racines, par conséquent réduit la croissance et le rendement de la récolte (McBride et al., 1989).

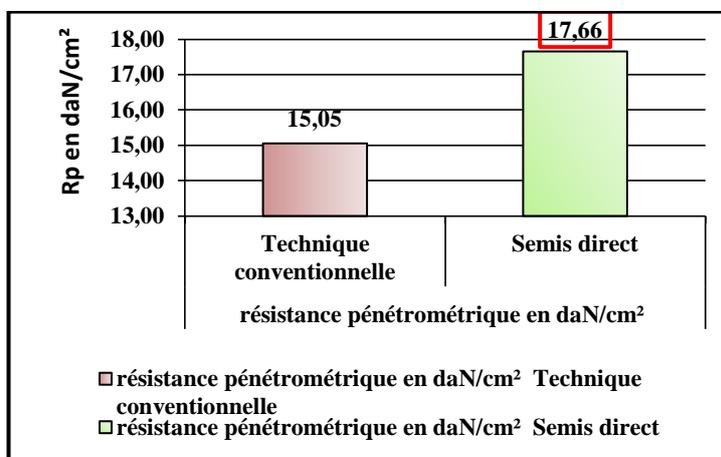
### 9.3. Effet des techniques sur la résistance pénétrométrique

La résistance à la pénétration est une mesure indirecte de la résistance du sol au cisaillement. Selon plusieurs auteurs, la résistance pénétrométrique du sol doit être mesurée avec la masse volumique apparente et

l'humidité du sol car ces facteurs affectent significativement résistance à la pénétration (Unger et Jones, 1998 in Feddal, 2015).

### 9.3.1. Cas de la culture du sorgho fourrager

Les valeurs détaillées obtenues pour les différentes techniques figurent dans les tableaux C-1-1'-1'' en annexe, les valeurs moyennes de la variation de la résistance pénétrométrique en fonction de la technique culturale, sont illustrées par la figure 67



**Figure 67:** Variation de la résistance pénétrométrique du sol (daN/cm<sup>2</sup>) en fonction de la technique, cas du sorgho fourrager.

D'après ces résultats on remarque que la résistance à la pénétration est plus élevée dans les sols menés en semis direct par rapport au travail conventionnel, les valeurs obtenues sont respectivement de 14,24 à 16,79 daN/cm<sup>2</sup> pour le travail conventionnel et de 16,35 à 19,71 daN/cm<sup>2</sup> pour le semis direct.

L'augmentation de la résistance au niveau de semis direct est due à l'état compact du sol non travaillé. Cet état risquerait à long terme après plusieurs campagnes avec le semis direct d'entraver le développement des systèmes racinaires ce qui pourrait influencer négativement sur la levée et sur le développement de la partie aérienne de la culture.

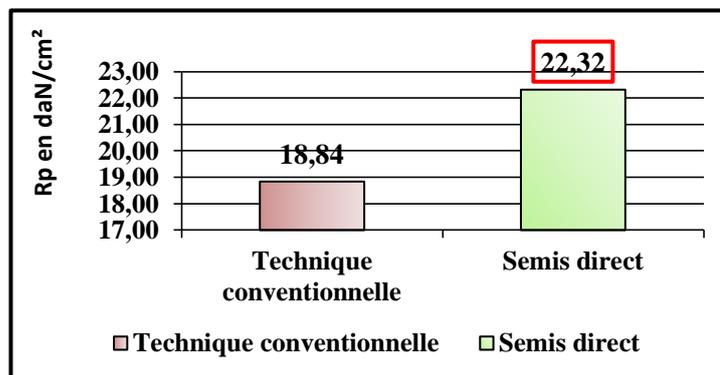
Des études ont montré que, dans un sol compacté dont la résistance à la pénétration excède 2000 kPa, la longueur des racines de différentes espèces céréalières (blé, orge, maïs, triticale et seigle) est réduite d'au moins 50% par rapport à un sol non compacté. La proportion de racines secondaires augmente avec le taux de compaction du sol au détriment des racines principales (Bakken, Njo, 1987 in Destain, 2013).

Globalement les résultats montreront clairement l'effet du passage des différents outils aratoires sur la résistance pénétrométrique du sol : la résistance mécanique est beaucoup plus élevée dans les sols menés en semis direct par rapport au travail conventionnel avec un écart de 2,61 daN/cm<sup>2</sup>.

Ainsi que ces résultats nous permettent de dire que les racines se développent plus facilement sur les parcelles travaillées avec la charrue.

### 9.3.2. Cas de la culture du blé dur

Les valeurs détaillées obtenues pour les différentes techniques figurent dans les tableaux C-2-2'-2'' en annexe, les valeurs moyennes de la variation de la résistance pénétrométrique en fonction de la technique culturale, sont illustrées par la figure 68



**Figure 68:** Variation de la résistance pénétrométrique du sol (daN/cm<sup>2</sup>) en fonction de la technique, cas du blé dur.

D'après les résultats obtenus et leur représentation sur les figures ci-dessous, nous avons remarqué que la résistance pénétrométrique du sol est supérieure pour les sols non travaillés grâce à leur structure du sol qui est compact, par contre pour les sols travaillés qui sont bien structurés et poreux, la résistance pénétrométrique est faible.

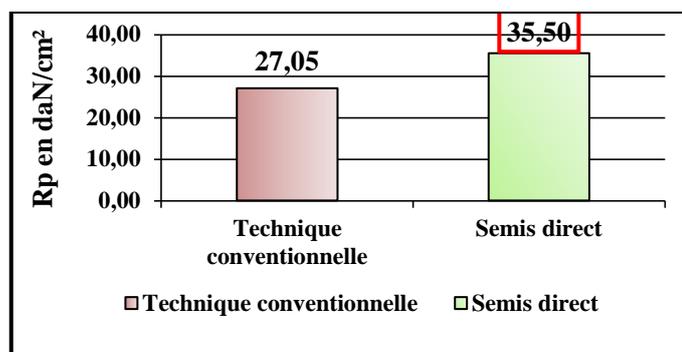
Nous remarquons aussi que la résistance pénétrométrique du sol évolue de façons similaires pour les deux techniques culturales; juste que elle est nettement plus supérieure dans les sols menés en semis direct, de semis jusqu'aux 60 jours de cycle végétatif, puis elle s'approche jusqu'au 120 jours; c'est-à-dire que les racines des deux cultures exercent presque la même force pour pénétrer plus en profondeur. Au-delà de 120 jours, la technique de semis direct reprend sa place de supériorité avec un écart de 2,04 daN/cm<sup>2</sup> par rapport au travail conventionnel.

D'autre part, la figure 68 donne une idée sur la différence de résistance pénétrométrique des racines entre les deux techniques culturales qui est de l'ordre de 3,48 daN/cm<sup>2</sup>.

Globalement, les différents passages des outils aratoires par leurs actions ont un effet positif sur la résistance pénétrométrique des racines c'est-à-dire sur le développement des racines dans le sol.

### 9.3.3. Cas de la culture du bersim

Les valeurs détaillées obtenues pour les différentes techniques figurent dans les tableaux C-3-1' -1'' en annexe, les valeurs moyennes de la variation de la résistance pénétrométrique en fonction de la technique culturale sont illustrées par la figure 69



**Figure 69:** Variation de la résistance pénétrométrique du sol (daN/cm<sup>2</sup>) en fonction de la technique, cas du bersim.

A noté que la profondeur de pénétration de la pointe du pénétromètre est comprise entre 15 à 30 cm pour le travail conventionnel ; pour le semis direct cette profondeur est comprise entre 2 à 18 cm.

D'après la figure 69, nous remarquons un décroissement continu de la résistance à la pénétration pour les deux techniques culturales durant tout le cycle de la culture et elle est plus importante au niveau de la technique du semis direct. Les valeurs sont respectivement de 35,50 daN/cm<sup>2</sup> pour le semis direct et de 27,05 daN/cm<sup>2</sup> pour la technique conventionnelle.

Ces résultats s'expliqueraient par l'action positive des outils aratoires qui donnent un bon milieu pour que la racine de la culture de bersim se développe de façon simple et facile dans le sol, contrairement au semis direct où la racine exerce une grande force pour traverser le sol qui possède une structure compactée. Ces résultats sont en concordance avec ceux de **Afzalnia et Zabihi, 2014; Taser et Metinoglu, 2005**, qui affirment que les sols menés en semis direct présentent des résistances pénétrométriques élevées alors que les sols travaillés avec la charrue présentent les résistances les plus faibles.

Tenant compte de ces résultats nous pouvons avoir une idée sur le développement des racines qui sera plus facile et rapide sur les parcelles labourées où le sol est bien structuré et possède des grands vides qui sont créés après les passages des outils aratoires ; contrairement au semis direct où la racine doit exercer une force plus élevée pour traverser les agrèges du sol.

## Conclusion

Cette partie porte essentiellement sur une analyse de l'évolution de l'humidité, de la porosité et la résistance pénétrométrique du sol sous l'effet de deux techniques culturales. Dans notre cas, il s'agit du travail classique appelé travail conventionnel et le semis direct (technique simplifiée) pour la mise en place des différentes cultures à savoir la culture du sorgho fourrager, le blé dur et le bersim.

À travers les résultats obtenus lors de nos essais, il apparaît clairement que la croissance des plants dans le sol dépend, en grande partie, de la technique culturale choisie. Celle-ci a une influence profonde et certaine sur quelques paramètres physiques caractéristiques du comportement du sol (humidité du sol, la porosité et la résistance pénétrométrique) ; et par conséquent, sur la forme et le développement des racines. Reste à confirmer si ces résultats ont des incidences sur le développement racinaire et le rendement final de cultures, c'est ce qui fera l'objet du prochain chapitre.

*Chapitre 10*  
*Analyse de l'effet des techniques culturelles*  
*sur*  
*paramètres caractéristiques des cultures*

---

## Chapitre 10 : Analyse de l'effet des techniques culturales sur paramètres caractéristiques des cultures

### Introduction

Dans cette partie, nous nous focaliseront sur la partie végétale, on analysera l'évolution de la partie aérienne quantifier par la hauteur et le diamètre des tiges et la partie souterraine telles que : la densité racinaire, la longueur et le diamètre des racines, ainsi que les conséquences sur les rendements des cultures et ce pour chaque technique culturale.

On va s'appuyer sur l'analyse statistique qui nous aidera à confirmer l'effet des techniques culturales sur les paramètres étudiés pour chacune de cultures.

### 10.1.Effet des techniques culturales sur la levée de cultures

#### 10.1.1. Taux de levée en fonction de la technique et de la dose de semis

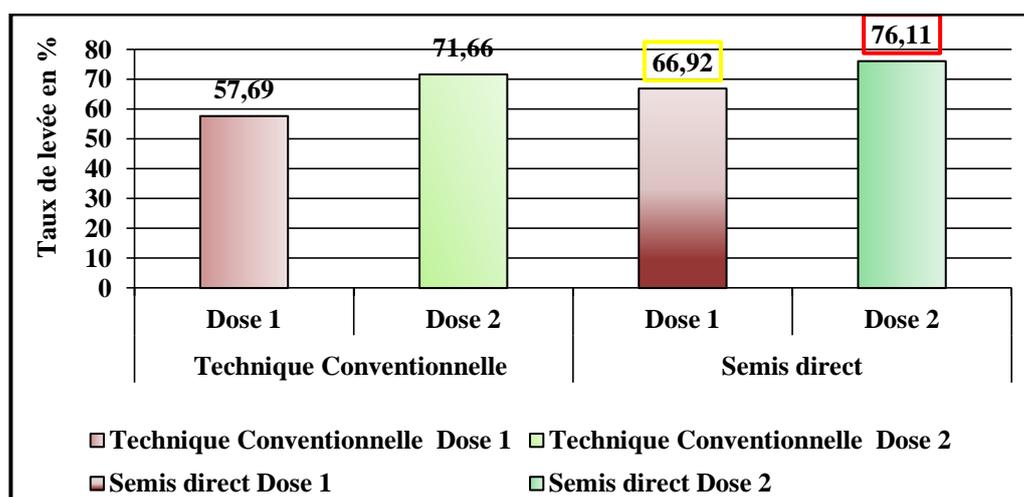
L'intérêt de la connaissance de taux de levée porte essentiellement sur l'adaptation des graines aux conditions réelles de sol. L'état de ce dernier est fortement influencé par la technique culturale pratiquée en modifiant ses propriétés tant physiques que mécaniques, ces modifications peuvent avoir un effet indirect sur la levée de la plante ainsi que sur son développement.

Il s'agit de faire un comptage du nombre de pieds sur des échantillons de 1 m<sup>2</sup> de surface, au stade fin de levée. Pour cela, nous avons utilisé un cadre en bois mesurant 1 m de chaque côté. Le calcul a été fait en trois répétitions pour chaque dose soit 6 répétitions par micro parcelle.

##### 10.1.1.1.Cas du sorgho fourrager

Les valeurs détaillées obtenues pour les différentes techniques figurent dans le tableau D-1-1' en annexe.

Les résultats de l'effet des techniques culturales sur le nombre de pieds par m<sup>2</sup> pour les deux doses de semis étudiées sont représentés dans la figure ci-dessous :



**Figure 70:** Taux de levée du sorgho fourrager en fonction de la technique et la dose de semis en %.

D’après les résultats exposés ci-dessus, la première remarque qu’on peut dire est que le peuplement à la levée reste dépendant de la dose de semis et de la technique culturale.

Quelle que soit la dose de semis, la technique du semis direct présente un taux de levée supérieur à celui de la technique conventionnelle avec un taux égale à 66,92 % et 76,11 % respectivement pour la dose 1 et 2. Ceci correspondant à un nombre de 87 plants par m<sup>2</sup> et 137 plants par m<sup>2</sup> pour la dose 1 et 2 respectivement. Cette différence se traduit par le bon emplacement des semences dans le semis direct (3 à 4 cm de profondeur), par contre dans le travail conventionnel, la semence peut rentrer dans les fissures produites lors de travail du sol, donc va s’éloigner à la lumière et ne germe pas.

La deuxième remarque qu’on peut aussi faire est que le semis à la dose élevée d2=35kg/ha permet le meilleur peuplement à la levée quel que soit la technique appliquée avec un écart moyen de 52 plants/m<sup>2</sup> par rapport au semis à la dose de 25 kg/ha. Afin d’interpréter nos résultats, une analyse statistique a été réalisée elle est représentée sur le tableau suivant :

**Tableau 16 :** Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95%( nombre de pieds levée/m<sup>2</sup>-sorgho fourrager)

Nombre de pieds levée/m <sup>2</sup>	Probabilité	E.T	C.V%	Signification	PPDS	Groupe homogène
<b>F1 : Technique</b>	<b>0,01003</b>	1,859	1,74%	<b>S</b>	<b>4,502</b>	<b>T2 : A T1 : B</b>
<b>F2 : Dose de semis</b>	<b>0,00017</b>	3,099	2,90%	<b>T.H.S</b>	<b>4,983</b>	<b>D2 : A D1 : B</b>
<b>INTER F1*2</b>	<b>0,33952</b>	-	-	<b>N.S</b>	-	-

L’analyse de la variance pour ce paramètre a révélé une différence significative entre les techniques culturales, une différence très hautement significative entre les doses de semis d’une part et non significative entre les deux facteurs d’autre part.

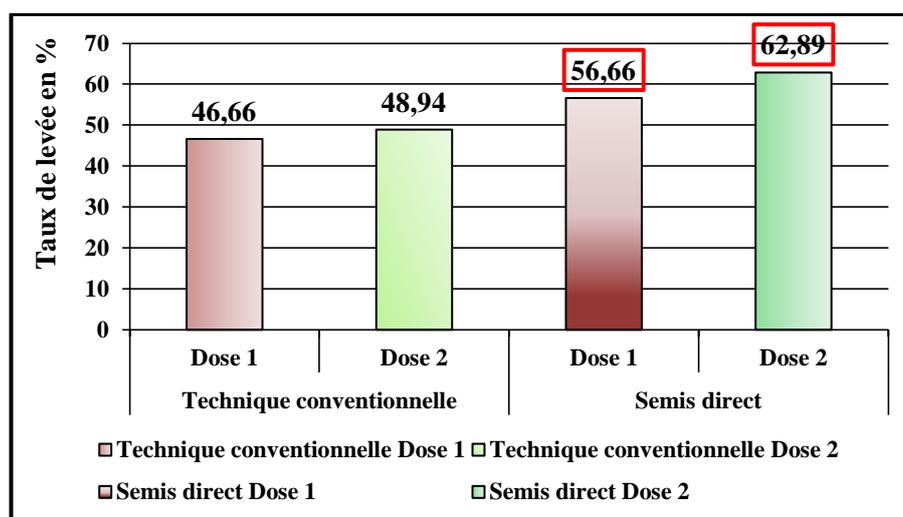
Concernant l'effet de la technique culturale, le test de comparaison des moyennes montre que la technique du semis direct permet le meilleur peuplement à la levée quelle que soit la dose de semis avec un écart moyen de 10plants/m<sup>2</sup> par rapport à la technique conventionnelle.

Pour l'effet de la dose de semis, le test de comparaison des moyennes montre que, quelle que soit la technique étudiée, c'est la dose 2=35 kg/ha qui permis le meilleure peuplement à la levée avec une différence de l'ordre de 50 plants /m<sup>2</sup> et 54 plants/m<sup>2</sup> pour la technique du semis direct et conventionnelle respectivement par rapport à la dose 1=25 kg/ha.

### 10.1.1.2. Cas de la culture du blé dur

Les valeurs détaillées obtenues pour les différentes techniques figurent dans le tableau D-2-2' en annexe

Les résultats de l'effet des techniques culturales sur le nombre de plants par m<sup>2</sup> pour les deux doses de semis étudiées sont représentés dans la figure ci-dessous :



**Figure 71:**Taux de levée du blé dur en fonction de la technique et la dose de semis en %.

La figure ci-dessus représente le taux de levée de la culture du blé dur exprimée en % en fonction de la technique culturale et de la dose de semis.

D'après les résultats, on peut tirer que le nombre de plants par m<sup>2</sup> est dépendant de la méthode de préparation du lit de semence et de la dose de semis.

D'après la représentation graphique, il est clairement montré que, quelle que soit la dose, le taux de levée est meilleur sur les parcelles de la technique du semis direct. Ce qui pourrait s'expliquer par l'existence des conditions favorables à la germination des graines citant l'humidité considérable du sol et une stabilité de la structure (non travaillée) qui favorise un bon contact graine-sol, contrairement aux autres techniques qui provoquent un changement de la structure du sol. Cette dernière faciliterait l'évaporation d'une importante quantité d'eau qui aura nécessairement une influence néfaste sur la germination des graines. De plus la profondeur de semis qu'est de 3à4cm contrairement aux autres techniques qui ont une profondeur de semis un peu plus profond, et comme il y a des vides les graines peuvent pénétrer au fond.

La technique du semis direct présente un taux de levée supérieur à celui de la technique conventionnelle avec un taux égale à 62,89 % pour la dose 2 et 56,66 pour la dose 1 ce qui correspondant à un nombre de 239 plants par m<sup>2</sup> pour la dose 2 et 204 plants par m<sup>2</sup> pour la dose 1.

A noté que, quelque soit la technique culturale étudiée, le taux de levée est plus important au niveau de la dose 2=180 kg/ha.

D'une manière générale, une bonne germination des graines dépend de plusieurs facteurs endogènes et exogènes à savoir :

- Un bon émiettement des premiers centimètres du sol ;
- Une porosité ainsi qu'une humidité idéale ;
- Un contact sol – graines favorable

L'analyse de la variance de l'effet des techniques culturale sur le nombre de plants par m<sup>2</sup> du blé dur donne les résultats suivants :

**Tableau 17:** Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95% ( nombre de plants levée/m<sup>2</sup>-blé dur)

Nombre de plants levée/m <sup>2</sup>	Probabilité	E.T	C.V%	Signification	PPDS	Groupe homogène
<b>F1 : Technique</b>	0,04372	26,728	13,41%	<b>S</b>	42,076	T2 : A T1 : B
<b>F2 : Dose de semis</b>	0,00312	11,07	5,55%	<b>H.S</b>	13,47	D2 : A D1 : B
<b>INTER F1*2</b>	0,16662	-	-	<b>N.S</b>	-	-

L'analyse de la variance a mis en évidence une différence significative entre les deux techniques culturales. Ce qui nous amène à conclure que la technique choisie à un effet certain sur le peuplement plant à la levée, le test de comparaison des moyennes montre que c'est la technique du semis direct qui donne le meilleur nombre de peuplement à la levée quelle que soit la dose de semis.

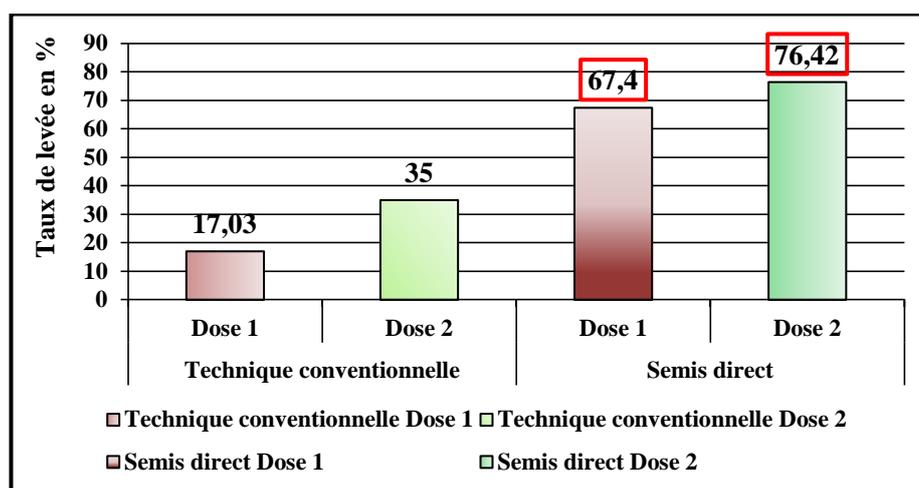
Pour l'effet de la dose de semis, le test de comparaison des moyennes montre que, quelle que soit la technique étudiée, c'est la dose 2=180 kg/ha qui permis le meilleure peuplement à la levée avec une différence de l'ordre de 35 plants /m<sup>2</sup> et 18 plants/m<sup>2</sup> pour la technique du semis direct et conventionnelle respectivement par rapport à la dose 1=160 kg/ha.

Concernant l'effet interaction entre la technique culturale et la dose de semis, aucune différence significative n'a été révélée.

### 10.1.1.3. Cas de la culture du bersim

Les valeurs détaillées obtenues pour les différentes techniques figurent dans le tableau D-3-3' en annexe

Les résultats de l'effet des techniques culturales sur le nombre de plants par m<sup>2</sup> pour les deux doses de semis étudiées sont représentés dans la figure ci-dessous :



**Figure 72:** Taux de levée du bersim en fonction de la technique et la dose de semis en %.

La figure ci-dessus représente le taux de levée de la culture du bersim exprimée en % en fonction de la technique culturale et de la dose de semis.

Au vu de ces résultats, la première conclusion qu'on peut tirer est que le nombre de plants ou plantules par m<sup>2</sup> est dépendant de la méthode de préparation du lit de semence et de la dose de semis.

D'après la représentation graphique, il est clairement montré que, quelle que soit la dose, le taux de levée est meilleur sur les parcelles de la technique du semis direct. Ce qui pourrait s'expliquer par une régularité de profondeur de semis sur les parcelles du semis direct ; par contre sur les parcelles travaillées conventionnellement les profondeurs de semis est plus importante vue la structure légère et poreuse à la surface du sol.

La technique du semis direct présente un taux de levée supérieur à celui de la technique conventionnelle avec un taux égale à 76,42 % pour la dose 2 et 67,4 pour la dose 1 ce qui correspondant à un nombre de 214 plantules par m<sup>2</sup> pour la dose 2 et 182 plantules par m<sup>2</sup> pour la dose 1.

A noté aussi que le taux de levée est plus important au niveau de la dose 2 pour les deux techniques.

Afin de synthétiser nos résultats, une analyse statistique a été réalisée et représentée sur le tableau suivant :

**Tableau 18:** Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95% ( nombre de plants levée/m<sup>2</sup> de Bersim)

Nombre de plants levée/m <sup>2</sup>	Probabilité	E.T	C.V%	Signification	PPDS	Groupe homogène
<b>F1 : Technique</b>	0,00002	4,962	3,68%	T.H.S	7,811	T2 : A T1 : B
<b>F2 : Dose de semis</b>	0,00006	6,772	5,02%	T.H.S	8,241	D2 : A D1 : B
<b>INTER F1*2</b>	0,02604	-	-	S	16,332	T2D2 : A T2D1 : B T1D2 : C T1D1 : D

L'analyse de la variance a mis en évidence une différence très hautement significative entre les deux techniques culturales. Ce qui nous amène à conclure que la technique choisie à un effet certain sur le peuplement plant à la levée, le test de comparaison des moyennes montre que c'est la technique du semis direct qui donne le meilleur nombre de peuplement à la levée quelle que soit la dose de semis.

Concernant le facteur dose de semis, l'analyse de la variance montre une différence très hautement significative entre les différentes doses étudiées pour le peuplement plant à la levée. Quelle que soit la technique étudiée, c'est la dose élevée ( $d_2=25$  kg/ha) qui permis le meilleur peuplement à la levée avec une différence de l'ordre de 32 plants /m<sup>2</sup> par rapport à  $d_1=15$  kg/ha.

Concernant l'effet interaction (techniques x doses de semis) est significatif pour le peuplement plants à la levée, le test de comparaison des moyennes montre que c'est la technique du semis direct semée à 25 kg/ha qui permet le meilleure peuplement plant à la levée avec un écart de l'ordre de 116 plants/m<sup>2</sup> par rapport à la technique conventionnelle semée à la même dose.

## 10.2.Effet des techniques sur la partie aérienne de cultures

### 10.2.1. Cas de la culture du sorgho fourrager

#### 10.2.1.1. Hauteur et diamètre des tiges du sorgho fourrager en fonction de la dose de semis et de la technique culturale

Pour quantifier la croissance de la plante, deux catégories de données ont été collectées, il s'agit notamment de la hauteur et du diamètre des tiges.

Les valeurs détaillées obtenues pour les différentes techniques figurent dans le tableau E-1-1' en annexe

Les résultats moyens de ces deux paramètres en fonction de la technique culturale et la dose de semis sont représentés dans les figures suivantes :

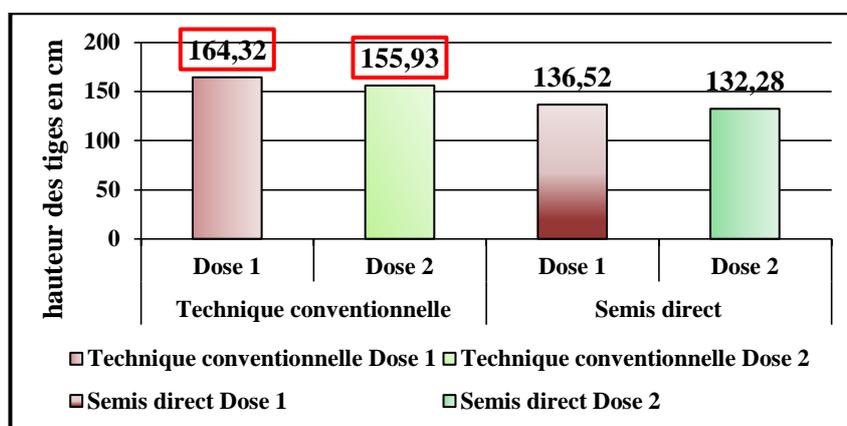


Figure 73: Hauteur des tiges du sorgho fourrager en fonction de la technique et de la dose de semis.

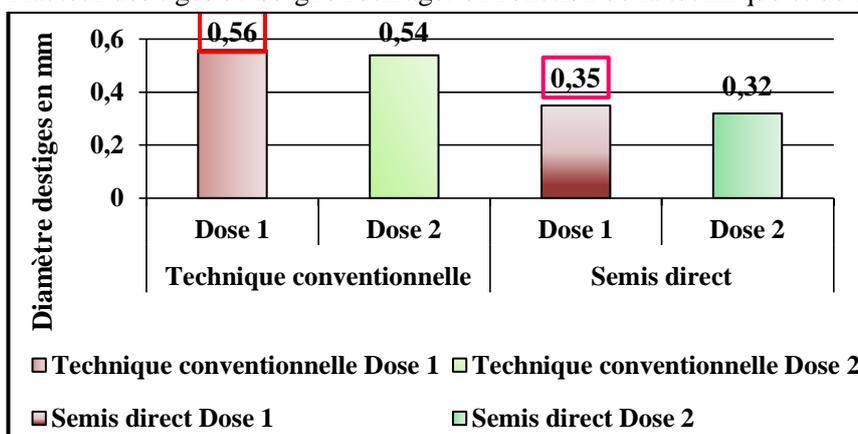


Figure 74: Diamètre des tiges du sorgho fourrager en fonction de la technique et de la dose de semis.

Les résultats de la hauteur et du diamètre des tiges donnent la même tendance, c'est-à-dire une croissance de la plante, meilleur au niveau des sols travaillés par rapport à ceux menés en semis direct et cela quelle que soit la dose de semis appliquée. Avec une différence de hauteur de 27,8 cm entre la technique conventionnelle semée avec la dose =25kg/ha et le semis direct semée à la même dose de semis, et 23,65 entre la technique conventionnelle et le semis direct semées avec la deuxième dose de semis

Pour ce qui est du diamètre des tiges, le travail du sol classique semble avoir donné les meilleurs résultats, on a mesuré une moyenne de 0,56 mm en travail conventionnel semée avec la dose 1 contre 0,35 mm en semis direct semée avec la même dose de semis soit une différence de plus de 0,21 mm. Même constat pour le travail conventionnel et le semis direct semés avec la deuxième dose de semis, puisque le diamètre est plus important dans les sols travaillés avec une différence de 0,22 mm.

L'analyse de la variance de l'effet des techniques culturale sur la hauteur et le diamètre des tiges donne les résultats suivants :

**Tableau 19** : Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95% (hauteur et diamètre des tiges-sorgho fourrager)

Stades	Facteurs	Probabilité	E.T	C.V%	Signification	PPDS	Groupe homogène
Hauteur des tiges	F1 : Technique	0,00037	1,005	0,68%	T.H.S	2,434	T1 : A T2 : B
	F2 : Dose de semis	0,00798	2,121	1,44%	H.S	3,411	D1 : A D2 : B
	INTER F1*2	0,16381	-	-	N.S	-	-
Diamètre des tiges	F1 : Technique	0,00062	0,011	2,58%	T.H.S	0,028	T1 : A T2 : B
	F2 : Dose de semis	0,48334	0,016	3,53%	N.S	-	-
	INTER F1*2	0,04903	-	-	S	0,057	(T1D1 ; T1D2) : A (T2D1 ; T2D2) : B

Pour la hauteur des tiges, l'analyse de la variance a révélé une différence très hautement significative pour le facteur technique culturale, et une différence hautement significative entre les doses de semis. Aucune interaction entre les deux facteurs n'a été enregistrée.

Concernant le facteur technique culturale, le test de comparaison des moyennes montre que quelle que soit la dose de semis étudiée, c'est la technique conventionnelle qui permis la meilleure hauteur des tiges avec un écart moyen de 25,75 cm.

Le test de comparaison de moyenne a fait ressortir pour l'effet dose de semis deux groupes distincts : la 1ère dose est classée dans le groupe A et la 2ème dose de semis au niveau du groupe B.

Par ailleurs, l'analyse de la variance pour le diamètre des tiges a révélé une différence très hautement significative pour le facteur technique culturale, et une différence significative entre les deux facteurs. Aucune signification entre les doses de semis étudiées.

L'analyse de la variance de l'effet des techniques culturales sur le diamètre des tiges présent la même tendance que la hauteur des tiges.

Ainsi que l'effet d'interaction entre la technique et la dose de semis est significatif pour ce paramètre, le test de comparaison des moyennes a fait ressortir deux groupes homogènes : la technique conventionnelle semée avec les deux doses sont classées dans le groupe A, le semis direct avec les doses de semis au niveau du groupe C.

Pour conclure, on peut dire que le travail conventionnel favorise la croissance des plantes, et ces résultats confirment les études précédemment, qui affirment que le travail du sol améliore la structure du sol en créant un état du sol caractérisé par une porosité moyenne qui favorise l'infiltration et la circulation de l'eau et des éléments nutritifs pour le bon développement des cultures. La différence dans la croissance entre les deux techniques culturales étudiées peut s'expliquer par la présence des mauvaises herbes dans les sols non travaillés qui ont livré une concurrence accrue au sorgho fourrager mis en place, ce qui a conduit à une croissance ralentie de la culture.

### 10.2.2. Cas de la culture du bersim

#### 10.2.2.1. Hauteur de la partie aérienne de la culture du bersim en fonction de la technique et de la dose de semis

46 jours après la réalisation du semis qui a eu lieu le 11/11/2015 pour les deux techniques de mise en place de la culture, les résultats obtenus par la mesure des hauteurs de la tige réparties sur quatre dates différentes qui sont respectivement :

- Le 22 Décembre 2015,
- Le 06 Janvier 2016,
- Le 28 Janvier 2016,
- Le 13 Février 2016.

Les valeurs détaillées obtenues pour les différentes techniques figurent dans le tableau E-2-2' en annexe

La figure suivante représente l'évolution de la partie aérienne de la culture du bersim en fonction de la dose et de la technique culturale.

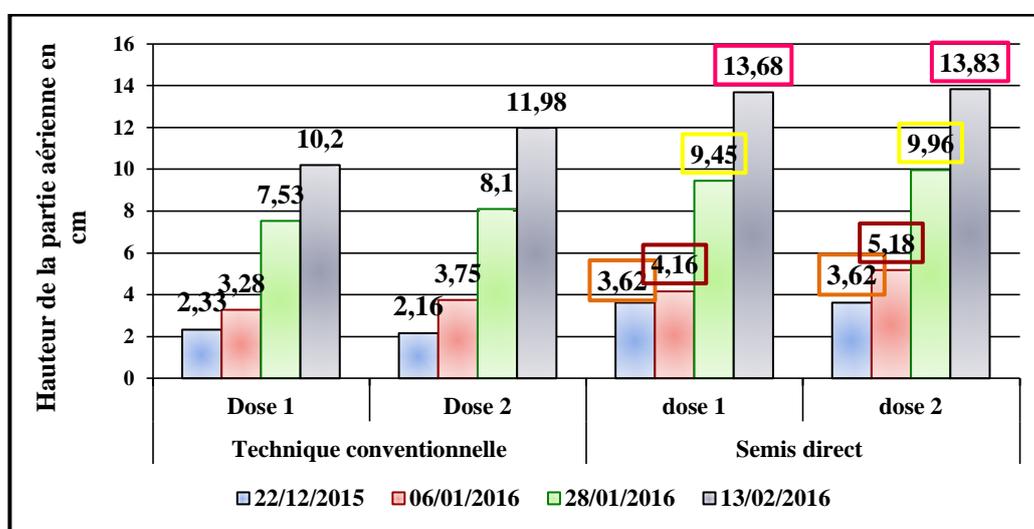


Figure 75: Evolution de la hauteur de la partie aérienne du bersim en fonction de la dose et la technique culturale.

D'après la représentation graphique, il est clairement montré que l'évolution des hauteurs au niveau du semis direct est beaucoup plus importante que dans le travail conventionnel et cela pour les quatre dates et quelques soit la dose de semis.

On remarque que pour la 1date de mesure, l'élongation de la tige est faible malgré la durée de 46 jours après le semis, ou la culture est en phase d'installation. Cette faible croissance de la tige est probablement liée à l'absence de pluie au mois de décembre.

La quantité de pluie marquée dans les trois mesures restantes était de 83,7mm, on remarque une croissance de façon exponentielle de la partie aérienne du Bersim. Ce qui indique que la pluviométrie est un facteur primordial dans la croissance du bersim, plus particulièrement lors de la phase de son installation.

L'analyse de la variance de l'effet des techniques culturale sur la hauteur de la partie aérienne de la culture du bersim et ses composantes donne les résultats suivants :

**Tableau 20:** Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95% ( hauteur de la partie aérienne -Bersim)

Dates	Hauteur de la partie aérienne	Probabilité	E.T	C.V%	Signification	PPDS	Groupe homogène
22/12/2015	F1 : Technique	0,00014	0,13	4,42%	T.H.S	0,204	T2 : A T1 : B
	F2 : Dose de semis	0,6647	0,366	12,48%	N.S	-	-
	INTER F1*2	0,6589	-	-	N.S	-	-
06/1/2016	F1 : Technique	0,00018	0,117	2,85%	T.H.S	0,183	T2 : A T1 : B
	F2 : Dose de semis	0,00051	0,204	4,98%	T.H.S	0,248	D2 : A D1 : B
	INTER F1*2	0,03313	-	-	S	0,457	T2D2 : A (T2D1 ; T1D2) : B T1D1 : C
28/01/2016	F1 : Technique	0,01496	0,778	8,88%	S	1,225	T2 : A T1 : B
	F2 : Dose de semis	0,13127	0,626	7,15%	N.S	-	-
	INTER F1*2	0,92521	-	-	N.S	-	-
13/02/2016	F1 : Technique	0,00338	0,683	5,50%	H.S	1,076	T2 : A T1 : B
	F2 : Dose de semis	0,18514	1,296	10,43%	N.S	-	-
	INTER F1*2	0,2545	-	-	N.S	-	-

L'analyse de la variance montre une différence très hautement significative entre les techniques culturales étudiées pour l'ensemble de dates mesurées. Le test de comparaison des moyennes montre que la technique du semis direct présente une hauteur plus élevée que la technique conventionnelle quelle que soit la dose de semis.

Concernant la date du 06/01/2016, l'analyse de variance montre que le facteur dose de semis a été très hautement significative sur la hauteur de la partie aérienne du bersim. Le test de comparaison des moyennes montre que la dose de semis d2=25 kg/ha permis la meilleure hauteur avec un écart de 1.02 cm par rapport à la dose de semis de 15 kg/ha.

Concernant l'effet interaction (technique x dose de semis) est significatif pour la date 06/01/2016, le test de comparaison des moyennes à fait ressortir trois groupes homogènes classés comme suit : T2D2 : A ; (T2D1 ; T1D2) : B ; T1D1: C.

### 10.3.Effet des techniques sur la partie souterraine de cultures

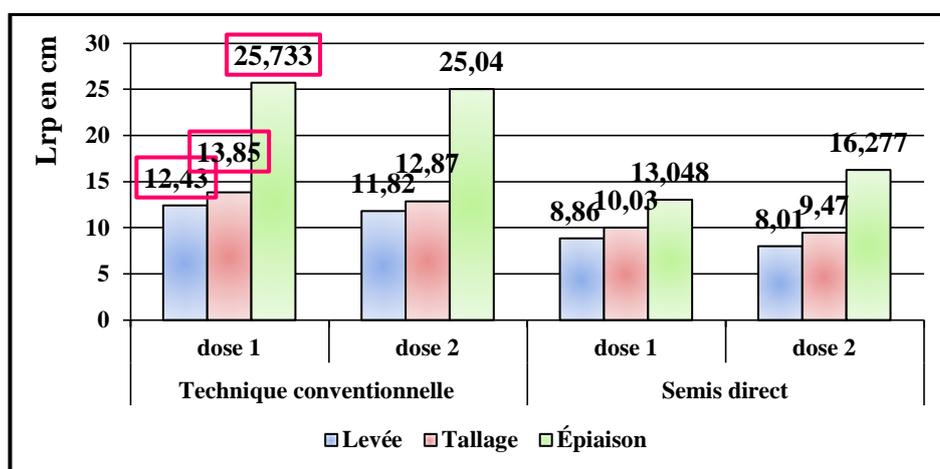
Les racines ont un rôle très important dans le développement de la plante, elles assurent la fourniture d'eau et les éléments nutritifs à la plante, ses dernières sont nécessaires pour la croissance et aussi à la production de la plante.

#### 10.3.1. Longueur et diamètre de la racine principale, densité racinaire en fonction de la dose de semis et le stade végétatif

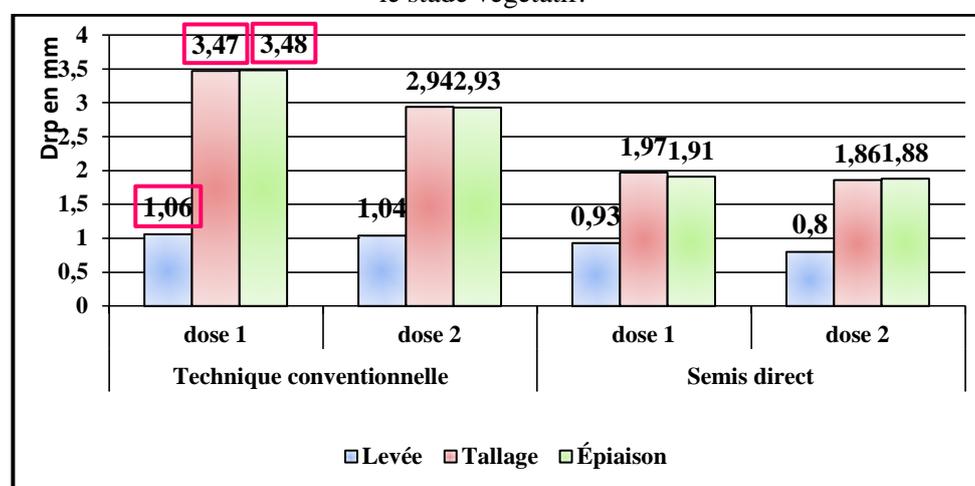
##### 10.3.1.1. Cas de la culture du sorgho fourrager

Les valeurs détaillées obtenues pour les différentes techniques figurent dans les tableaux F-1-1' en annexe

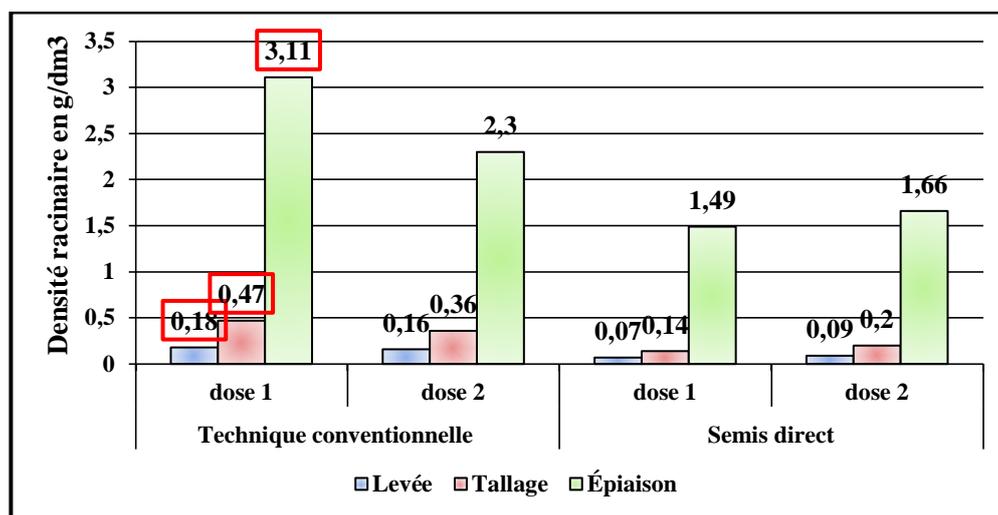
Les résultats de l'effet des techniques culturales sur la longueur et diamètre de la racine principale, densité racinaire pour les deux doses de semis étudiées sont représentées dans les figures ci-dessous :



**Figure 76:** Evolution de la longueur de la racine principale du sorgho fourrager en fonction de la dose de semis et le stade végétatif.



**Figure 77:** Evolution de diamètre de la racine principale du sorgho fourrager en fonction de la dose de semis et le stade végétatif.



**Figure 78:** Densité racinaire de la culture du sorgho fourrager en fonction de la dose de semis et le stade végétatif.

D'après les résultats obtenus dans le tableau et représentés graphiquement par les histogrammes ci-dessus, nous remarquons que :

Quelle que soit la dose de semis et le stade végétatif, la technique conventionnelle a permis les meilleures conditions de développement des jeunes plants comparées au semis direct, et a obtenu en conséquence la longueur des racines la plus importante 25.73 cm et aussi le diamètre des racines la plus élevée avec 3.48 mm. Cela pourrait s'expliquer par une porosité plus importante au niveau des parcelles travaillées et que l'application de semis direct a permis au sol de stocker l'eau et de le rendre disponible aux racines qui ne se développent pas assez en profondeur afin de chercher l'eau, contrairement à celui développé avec le labour conventionnel où le sol s'est bien ameublit lors de sa préparation.

Concernant la densité racinaire, les résultats obtenus par les deux techniques nous révèlent que, quelle que soit le stade végétatif, le développement racinaire connaît un bon accroissement dans les parcelles menées en travail conventionnel et semées avec la dose 1=25 kg/ha par rapport aux parcelles menées en semis direct semées avec la même dose.

Au stade épiaison, l'écart de la densité racinaire entre les techniques est notable, il est de l'ordre de 1.62 g/dm<sup>3</sup> et 0.64 g/dm<sup>3</sup> pour la dose 1 et 2 respectivement.

A noté aussi que, la densité racinaire du semis direct est meilleure au niveau des parcelles semées avec la dose 2=35 kg/ha par rapport aux celles semées avec la dose 1=25kg/ha.

**Nicou et Chopart, (1972)** ont pu montrer qu'il existait des corrélations positives entre le poids total de racines ou la densité racinaire par horizon (g/dm<sup>3</sup>) et les rendements en arachide, maïs, sorgho, riz pluvial. Pour augmenter les rendements il est nécessaire de favoriser la croissance racinaire en particulier dans l'horizon 0-30cm. Cela semble être une règle générale pour les sols sablo-argileux en surface et peut s'expliquer par le fait que dans ces sols la réserve en eau est faible et un enracinement profond est nécessaire pour assurer l'alimentation hydrique et minérale des cultures.

En conclusion, on peut dire que la croissance racinaire est favorisée par une bonne structure ; dans la technique conventionnelle, la structure du sol est principalement créée par les opérations de travail du sol tandis que dans le semis direct, la structure est principalement créée par l'action du climat et les processus biologiques.

L'analyse de la variance de l'effet des techniques culturales sur la longueur et diamètre de la racine principale, la densité racinaire du sorgho fourrager donne les résultats suivants :

**Tableau 21:** Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95% (longueur des racines-sorgho fourrager)

Stades	Longueur des racines	Probabilité	E.T	C.V%	Signification	PPDS	Groupe homogène
Levée	<b>F1 : Technique</b>	0,00069	0,211	2,06%	T.H.S	0,512	T1 : A T2 : B
	<b>F2 : Dose de semis</b>	0,00636	0,227	2,21%	H.S	0,365	D1 : A D2 : B
	<b>INTER F1*2</b>	0,41669	-	-	N.S	-	-
Tallage	<b>F1 : Technique</b>	0,00071	0,21	1,82%	T.H.S	0,509	T1 : A T2 : B
	<b>F2 : Dose de semis</b>	0,00124	0,133	1,15%	H.S	0,213	D1 : A D2 : B
	<b>INTER F1*2</b>	0,05159	-	-	N.S	-	-
Épiaison	<b>F1 : Technique</b>	0,00276	1,226	6,12%	H.S	2,968	T1 : A T2 : B
	<b>F2 : Dose de semis</b>	0,11153	1,082	5,40%	N.S	-	-
	<b>INTER F1*2</b>	0,03558	-	-	S	4,797	(T1D1 ; T1D2) : A (T2D2 ; T2D1) : B

L'analyse de la variance pour ce paramètre a montré un effet très hautement significatif entre les deux techniques culturales étudiées, le test de comparaison des moyennes montre que quel que soit la dose étudiée et le stade végétatif, c'est la technique conventionnelle qui permet la meilleure longueur des racines avec un écart moyen au stade épiaison de 12,68 cm et 8,763 cm pour la première dose et la deuxième dose respectivement.

Concernant l'effet de la dose, une différence hautement significative est mise en évidence sur ce paramètre. Les faibles doses (25 kg/ha) assurent les meilleures longueurs des racines, avec une moyenne de 25,73 au stade épiaison, soit un écart de 0,7cm par rapport à la dose de semis 35 kg/ha.

Par ailleurs l'effet interaction (technique x dose de semis) est significatif au stade épiaison pour ce paramètre. La technique conventionnelle semée à 25 kg/ha permet la meilleure longueur des racines comparativement à la technique de semis direct semée à la même densité avec un écart de 12,68 cm, le test de comparaison des moyennes a fait ressortir deux groupes homogènes :

A : la technique conventionnelle avec les deux doses de semis (T1D1 ; T1D2) ;

B : la technique de semis direct avec les deux doses de semis (T2D2 ; T2D1).

**Tableau 22:** Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95% (Diamètre des racines-sorgho fourrager)

Stades	Diamètre des racines	Probabilité	E.T	C.V%	Signification	PPDS	Groupe homogène
Levée	F1 : Technique	0,1233	0,122	12,70%	N.S	-	-
	F2 : Dose de semis	0,04085	0,042	4,37%	S	0,068	D1 : A D2 : B
	INTER F1*2	0,09894	-	-	N.S	-	-
Tallage	F1 : Technique	0,00098	0,089	3,46%	T.H.S	0,215	T1 : A T2 : B
	F2 : Dose de semis	0,00483	0,091	3,57%	H.S	0,147	D1 : A D2 : B
	INTER F1*2	0,01724	-	-	S	0,374	T1D1 : A T1D2 : B (T2D1,T2D2) : C
Épiaison	F1 : Technique	0,0028	0,151	5,90%	H.S	0,365	T1 : A T2 : B
	F2 : Dose de semis	0,015	0,122	4,79%	S	0,197	D1 : A D2 : B
	INTER F1*2	0,02313	-	-	S	0,57	(T1D1, T1D2) : A (T2D1, T2D2) : B

Au stade épiaison, l'analyse de la variance met en évidence une différence hautement significative entre la technique conventionnelle et le semis direct concernant le diamètre des racines. Une différence de diamètre de l'ordre de 1,57mm est enregistrée, et ce quelle que soit la dose de semis et le stade végétatif.

Pour l'effet de la dose de semis, l'analyse de la variance au stade épiaison a révélé une différence significative entre les différentes doses étudiées pour ce paramètre.

Le test de comparaison des moyennes montre que la dose D1=25 kg/ha permis le diamètre des racines le plus important avec une différence de 0.55mm pour la technique conventionnelle et de 0.03 mm pour la technique de semis direct par rapport à la dose de semis de D2=35 kg/ha

L'effet interaction entre technique et les doses de semis au stade épiaison a montré une différence significative où le test de comparaison des moyennes pour ces deux paramètres, a fait ressortir deux groupes homogènes : la technique conventionnelle, avec les deux doses de semis, est classée dans le groupe A et le semis direct avec les doses de semis au niveau du groupe B.

**Tableau 23:** Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95% (Densité racinaire-sorgho fourrager)

Stades	Densité racinaire	Probabilité	E.T	C.V%	Signification	PPDS	Groupe homogène
Levée	F1 : Technique	0,0006	0,005	3,63%	T.H.S	0,011	T1 : A T2 : B
	F2 : Dose de semis	0,00253	0,004	3,07%	H.S	0,006	D1 : A D2 : B
	INTER F1*2	0,58291	-	-	N.S	-	-
Tallage	F1 : Technique	0,00113	0,019	6,27%	H.S	0,045	T1 : A T2 : B
	F2 : Dose de semis	0,00163	0,016	5,55%	H.S	0,026	D1 : A D2 : B
	INTER F1*2	0,03974	-	-	S	0,073	T1D1 : A T1D2 : B (T2D2 ; T2D1) : C

Épiaison	F1 : Technique	0,01394	0,26	12,14%	S	0,631	T1 : A T2 : B
	F2 : Dose de semis	0,01446	0,2	9,31%	S	0,321	D1 : A D2 : B
	INTER F1*2	0,05262	-	-	N.S	-	-

Au stade tallage, l'analyse de la variance pour ce paramètre a montré un effet hautement significatif entre les deux techniques culturales étudiées, le test de comparaison des moyennes montre que quel que soit la dose étudiée et le stade végétatif, c'est la technique conventionnelle qui permet la meilleure densité racinaire avec un écart moyen de 0,33 g/dm<sup>3</sup> et 0,16 g/dm<sup>3</sup> pour la première dose et la deuxième dose respectivement.

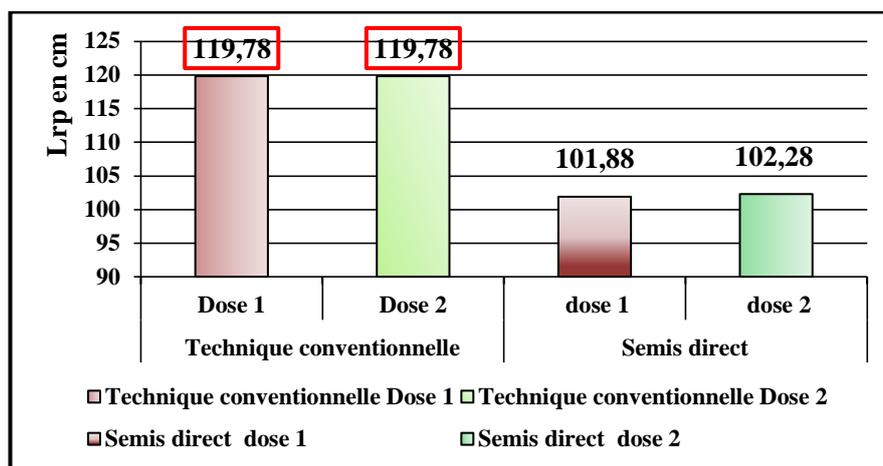
Concernant l'effet de la densité de semis, une différence significative est révélée au stade tallage pour la densité racinaire. Le test de comparaison des moyennes montre que c'est la dose de semis égale à 25 kg/ha qui a permis la densité racinaire la plus élevée de l'ordre de 0,47 g/dm<sup>3</sup> avec un écart de 0,2 g/dm<sup>3</sup> en moyennes.

Par ailleurs l'effet interaction entre la technique et la dose de semis est significatif au stade tallage pour ce paramètre. La technique conventionnelle semée à 25 kg/ha permet la meilleure densité racinaire comparativement à la technique de semis direct semée à la même densité, le test de comparaison des moyennes a fait ressortir trois groupes homogènes : la technique conventionnelle semée à la 1ère dose et à la 2ème dose sont classées dans le groupe A et B respectivement et le semis direct avec les doses de semis au niveau du groupe C.

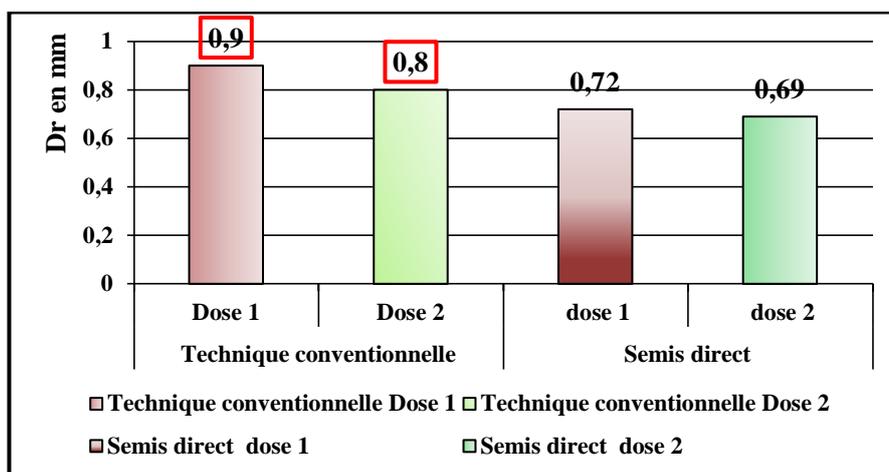
### 10.3.1.2. Cas de la culture du blé dur

Les valeurs détaillées obtenues pour les différentes techniques figurent dans le tableau F-2-2' en annexe

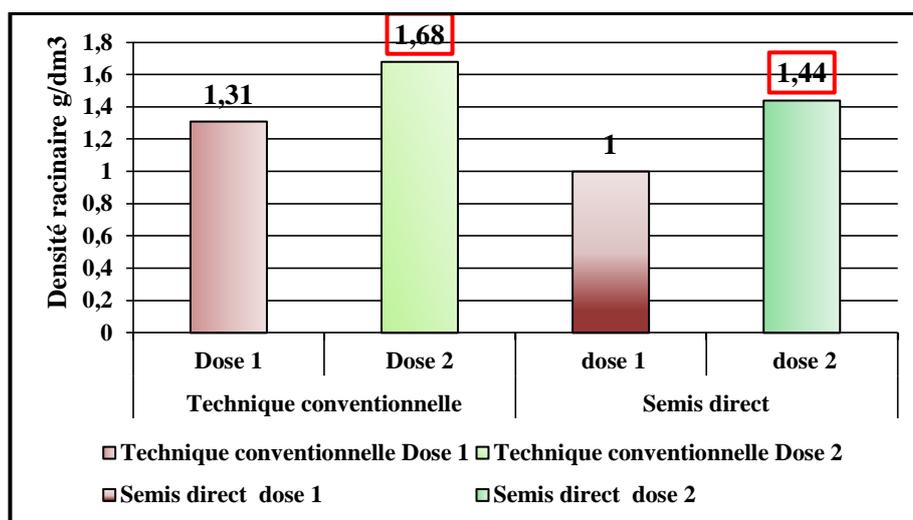
Les résultats de l'effet des techniques culturales sur la racine principale, densité racinaire pour les deux doses de semis étudiées sont représentées dans le tableau et la figure ci-dessous :



**Figure 79:** Evolution de la longueur de la racine principale du blé dur en fonction de la dose de semis et de la technique au stade épiaison.



**Figure 80:** Evolution de diamètre de la racine principale du blé dur en fonction de la dose de semis et la technique au stade épisaison.



**Figure 81:** Densité racinaire de la culture du blé dur en fonction de la dose de semis et de la technique au stade épisaison.

D’après les résultats obtenus dans le tableau et représentés graphiquement par les histogrammes ci-dessus, nous remarquons que le développement racinaire reste dépendant de la technique culturale et non pas à la dose de semis.

La technique conventionnelle a permis les meilleures conditions de développement des racines comparée au semis direct, et a obtenu en conséquence la longueur des racines la plus importante 119,78 cm et aussi le diamètre des racines la plus élevée avec 0,9 mm. Cela s’expliquerait par l’existence des conditions favorables au développement des racines citant l’humidité considérable du sol et la masse volumique importante, contrairement au semis direct, les racines limitent leur développement en trouvant l’eau à leur disposition particulièrement en surface.

Concernant la densité racinaire, les résultats obtenus nous révèlent que, quelque soit la dose de semis, le développement racinaire connaît un bon accroissement en travail conventionnel semé avec la dose 1=160 kg/ha

par rapport au semis direct semées avec la même dose. L'écart de la densité racinaire est de l'ordre de 0,31 g/dm<sup>3</sup> et 0,24 g/dm<sup>3</sup> pour la première et la deuxième dose respectivement.

L'un des rôles importants du travail du sol est de faciliter la croissance des racines dans un milieu contraignant, le travail du sol agit sur la structure du sol en diminuant la résistance du sol à la pénétration des racines. Il améliore aussi l'humidité et l'aération du sol en facilitant les échanges gazeux au niveau des racines.

Ces résultats sont au même ordre que ceux de **Amara et al., 2014**, qui ont montré que le système racinaire est très développé sur les parcelles labourées où la densité racinaire est de 1,101 g/dm<sup>3</sup>, ensuite c'est celui des parcelles travaillées avec le chisel où cette densité est de 0,805 g / dm<sup>3</sup>. Au niveau des parcelles du semis direct nous avons la valeur la plus faible de la densité des racines qui est de 0,638 g / dm<sup>3</sup>.

L'analyse de la variance de l'effet des techniques culturale sur la longueur et diamètre de la racine principale, la densité racinaire du blé dur donne les résultats suivants :

**Tableau 24:** Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95% (longueur et diamètre de la racine principale, la densité racinaire du blé dur)

Paramètres	Facteurs	Probabilité	E.T	C.V%	Signification	PPDS	Groupe homogène
Longueur de la racine principale	F1 : Technique	0,0000	0,212	0,19%	T.H.S	0,334	T1 : A T2 : B
	F2 : Dose de semis	0,70734	1,02	0,92%	N.S	-	-
	INTER F1*2	0,70773	-	-	N.S	-	-
Diamètre de la racine principale	F1 : Technique	0,00476	0,041	5,31%	H.S	0,065	T1 : A T2 : B
	F2 : Dose de semis	0,017	0,04	5,17%	S	0,049	D1 : A D2 : B
	INTER F1*2	0,14986	-	-	N.S	-	-
Densité racinaire	F1 : Technique	0,04942	0,186	3,70%	S	0,554	T1 : A T2 : B
	F2 : Dose de semis	0,0134	0,234	17,23%	S	0,285	D2 : A D1 : B
	INTER F1*2	0,75504	-	-	N.S	-	-

Pour la longueur des racines, l'analyse de la variance a révélé une différence très hautement significative pour les deux techniques culturales et non significative entre les doses de semis. Aucun effet d'interaction entre les techniques et les doses de semis n'a été observé.

Le test de comparaison de moyenne a fait ressortir deux groupes distincts : la technique conventionnelle est classée dans le groupe A et la technique du semis direct au niveau du groupe B.

Concernant le diamètre des racines, L'analyse de la variance montre une différence hautement significative entre les deux techniques culturales étudiées, et une différence significative entre les doses de semis. Aucune interaction entre les deux facteurs n'a été enregistrée.

Le test de comparaison des moyennes montre que quelque soit la dose de semis étudiée, c'est la technique conventionnelle qui permis le meilleur diamètre des racines avec un écart moyen de 0,18 mm.

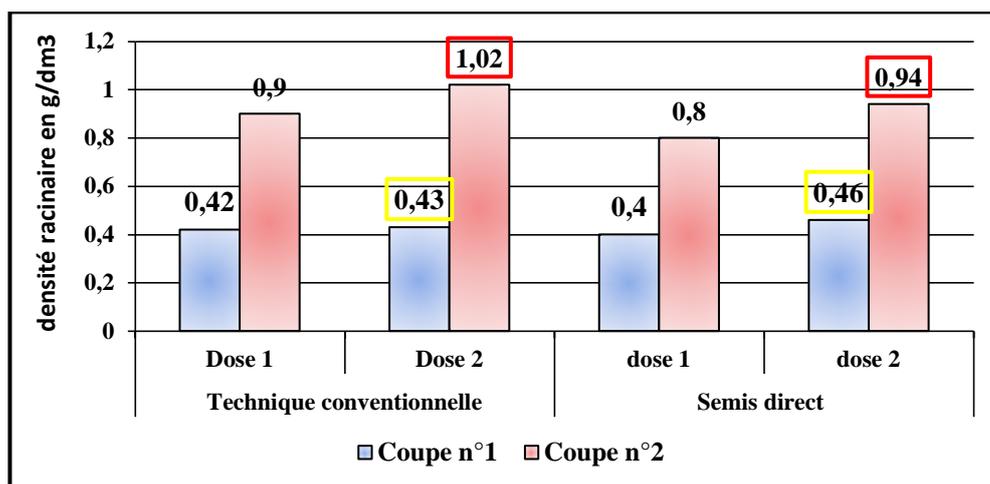
Par ailleurs, l'analyse de la variance pour la densité racinaire a révélé une différence significative pour les deux facteurs (technique et dose de semis), et non significative pour l'interaction entre les deux facteurs étudiés.

Le test de comparaison de moyenne a fait ressortir deux groupes distincts : la technique conventionnelle est classée dans le groupe A et la technique du semis direct au niveau du groupe B.

### 10.3.1.3. Cas de la culture du bersim

Les valeurs détaillées obtenues pour les différentes techniques figurent dans les tableaux F-3-3' en annexe

Les densités racinaires obtenues pour les deux coupes réalisées au niveau de la totalité de la parcelle sont présentées dans la figure suivante :



**Figure 82:** Densité racinaire de la culture de bersim en fonction de la dose de semis et de la technique.

D'après les résultats présentés ci-dessus, on peut dire que la technique culturale a un effet indirect sur la densité racinaire. Pour la première coupe, la densité racinaire est relativement la même pour les deux techniques et les deux doses de semis ceci peut se justifier par la disponibilité de l'eau et les éléments nutritifs autour de la plante qui a empêché la racine de se développer et de chercher plus profondément. Par contre, pour la deuxième coupe, nous remarquons que la densité des racines est supérieure au niveau de la technique conventionnelle semée à 25 kg/ha avec un écart de l'ordre de 0.08 g/dm<sup>3</sup> par rapport à la technique du semis direct semée à la même densité. Ces résultats sont dus à l'état du sol qui est plus poreux sur les parcelles travaillées conventionnellement.

Les résultats obtenus par **Chopart en 1980, 1983 et 1985** sur l'effet de labour à la charrue à socs et le non-labour sur le poids des racines (g/ dm<sup>3</sup>) des principales cultures annuelles du Sénégal ( sorgho, maïs ; mil ) ont montré clairement que le labour permet une densité racinaire plus importante par rapport le semis direct pour toutes les cultures.

Afin de synthétiser nos résultats, une analyse statistique a été réalisée et représentée sur le tableau suivant :

**Tableau 25:** Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95% ( densité racinaire-Bersim)

Densité racinaire	Facteurs	Probabilité	E.T	C.V%	Signification	PPDS	Groupe homogène
Coupe N°1	F1 : Technique	0,94369	0,123	28,45%	N.S	-	-
	F2 : Dose de semis	0,44356	0,075	17,33%	N.S	-	-
	INTER F1*2	0,56545	-	-	N.S	-	-
Coupe N°2	F1 : Technique	0,38615	0,174	18,93%	N.S	-	-
	F2 : Dose de semis	0,08249	0,128	13,88%	N.S	-	-
	INTER F1*2	0,95426	-	-	N.S	-	-

L'analyse de la variance n'a révélé aucune différence significative entre les deux techniques culturales étudiées pour la densité racinaire, même situation pour le facteur densité de semis et interaction technique x densité de semis. Néanmoins, il est à noter que la technique conventionnelle présente une densité racinaire plus élevée que la technique du semis direct avec une moyenne respectivement de 0.9 g/dm<sup>3</sup> et 0.8 g/dm<sup>3</sup> pour la dose 1= 15kg/ha et de 1.02 g/dm<sup>3</sup> et 0.94 g/dm<sup>3</sup> pour la dose 2=25kg/ha, donc le travail conventionnel permet toujours une bonne pénétration et un meilleur développement des racines.

#### 10.4.Effet des techniques sur le rendement de cultures

Le rendement est le paramètre le plus important et déterminant pour comprendre l'influence des facteurs étudiés sur la culture.

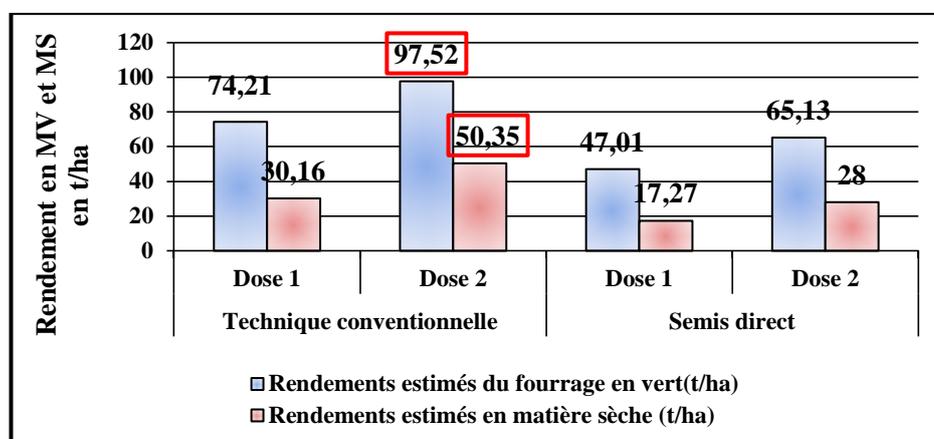
Dans cette partie, nous allons essayer de présenter et de discuter l'ensemble des résultats du rendement et ses composantes qui sont le but de chaque culture.

##### 10.4.1. Cas de la culture du sorgho fourrager

##### 10.4.1.1. Rendements en matière vert et matière sèche du sorgho fourrager en fonction de la dose de semis et de la technique culturale

Les valeurs détaillées obtenues pour les différentes techniques figurent dans les tableaux G-1-1' en annexe.

L'ensemble des résultats de l'effet des techniques culturales sur les rendements sont mentionnés dans la figure suivante :



**Figure 83:** Estimation des rendements en matière vert et sèche du sorgho fourrager en fonction de la dose de semis et de la technique culturale

D'après les résultats présentés ci-dessus, on remarque que le rendement en vert et en sec est nettement supérieur dans les parcelles travaillées ou on enregistre un rendement vert/sec atteignant en moyenne 97,52/50,35

t/ha dans les sols travaillés et semées à la dose de 35 kg/ha contre une moyenne de 65,13/28 t/ha pour le semis direct semées à la même dose, soit une différence de plus de 32,39/22,35 t/ha.

Pour ce qui est des parcelles semées à la dose de 25 kg/ha, le constat est le même puisque le rendement dans les parcelles travaillées est meilleur par rapport à celui des sols menés en semis direct avec une différence entre les deux techniques de plus de 27,2/12,89 t/ha pour les rendements en vert/sec respectivement.

Il existe de nombreux résultats, dont certains déjà très anciens, permettant d'évaluer l'action globale du labour à la charrue sur la production des céréales (**Charreau et Nicou, 1971 ; Nicou et al., 1993**). Si l'on se limite à l'examen des moyennes obtenues à différents endroits et sur plusieurs années, on aboutit à des effets positifs sur chaque culture.

L'analyse de la variance de l'effet des techniques culturale sur le rendement en matière vert et matière sèche du sorgho fourrager donne les résultats suivants :

**Tableau 26** : Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95% (Rendement en vert et sèche de sorgho fourrager)

Stades	Facteurs	Probabilité	E.T	C.V%	Signification	PPDS	Groupe homogène
Rendement en vert	F1 : Technique	0,00653	4,966	7,00%	H.S	12,029	T1 : A T2 : B
	F2 : Dose de semis	0,00052	2,443	3,44%	T.H.S	3,929	D2 : A D1 : B
	INTER F1*2	0,13928	-	-	N.S	-	-
Rendement en sèche	F1 : Technique	0,05098	7,351	23,37%	N.S	-	-
	F2 : Dose de semis	0,00272	3,605	11,46%	H.S	5,797	D2 : A D1 : B
	INTER F1*2	0,08528	-	-	N.S	-	-

Pour le rendement en vert, l'analyse de variance a révélé des différences hautement significatives entre les techniques culturales étudiées. Le test de comparaison montre que, quelque soit la dose de semis, le travail conventionnel est supérieur au semis direct, nous avons enregistré un écart moyen d'environ 30 t/ha.

Le test de comparaison de moyenne a fait ressortir pour l'effet dose de semis deux groupes distincts : la première dose et la deuxième dose sont classés dans le groupe A et B respectivement. Aucun effet d'interaction entre la technique et la dose de semis n'a été observé.

Par ailleurs, l'analyse de la variance de l'effet des doses de semis sur le rendement en matière sèche présent la même tendance que le rendement en vert.

#### 10.4.2. Cas de la culture du blé dur

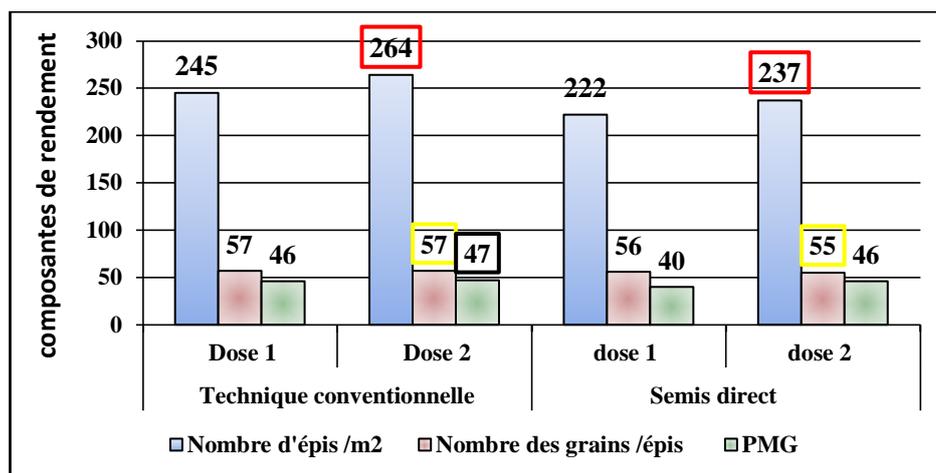
##### 10.4.2.1. Composantes de rendement et le rendement du blé dur en fonction de la technique et de la dose de semis

Nous avons essayé d'orienter notre travail sur quelques paramètres qui nous ont paru les plus importants à savoir :

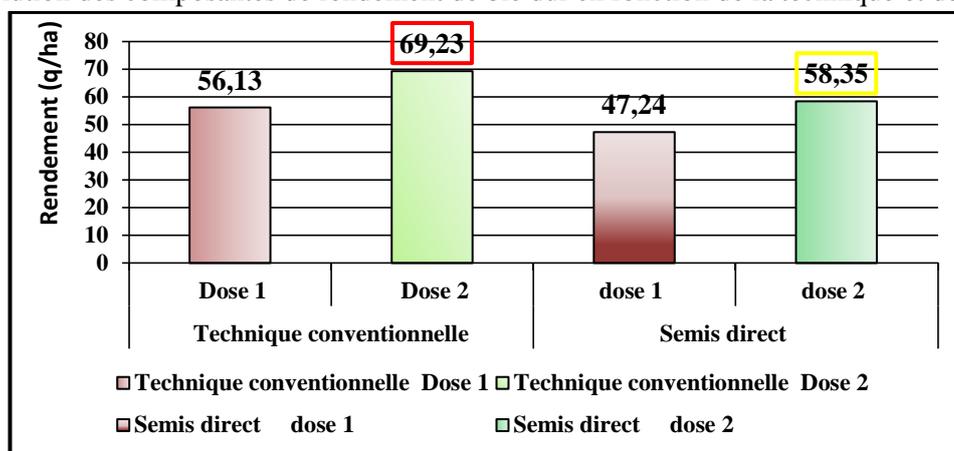
- Le peuplement épi ;
- Le nombre de grains par épi ;
- Le poids de mille grains ;
- Le rendement théorique par unité de surface.

Les valeurs détaillées obtenues pour les différentes techniques figurent dans les tableaux G-2-2' en annexe

Les résultats de l'effet des techniques culturales et les densités du semis sur le rendement et ses composantes sont représentés dans les figures ci-dessous :



**Figure 84:** Evolution des composantes de rendement de blé dur en fonction de la technique et de la dose de semis



**Figure 85:** Evolution de rendement théorique du blé dur en fonction de la technique et de la dose de semis.

D'après les résultats obtenus dans le tableau et représentés graphiquement par les histogrammes ci-dessus, nous remarquons que :

Le peuplement épis par unité de surface ne dépend pas uniquement du pouvoir de tallage, du taux de germination, et de la densité de semis, mais aussi de la technique culturale pratiquée. Le meilleur peuplement épis a été obtenu au niveau des parcelles travaillées et semées à la dose de 180 kg/ha avec une moyenne de 264 épis/m<sup>2</sup>, alors qu'on a enregistré une valeur plus basse pour les parcelles du semis direct semées à la même dose.

L'effet de la dose est évident, la deuxième dose permet un meilleur peuplement épis/m<sup>2</sup> et ce au niveau des deux techniques culturales étudiées.

La qualité de l'épi est distincte entre les différentes techniques. Quelle que soit la dose de semis, les parcelles menées par la technique conventionnelle représentent les meilleurs résultats (57 grains/épi) par rapport au semis direct (55 grains/épi). Cet écart se traduit par le bon état de la plante (porosité du sol, développement racinaire) dans les parcelles de travail du sol par rapport aux parcelles du semis direct.

L'écart de la densité racinaire a influencé le poids de mille grains. Les parcelles menées par la technique conventionnelle représentent les meilleurs résultats avec une moyenne de 47 g par rapport aux parcelles menées en semis direct et ce quelle que soit la dose de semis.

Tenant compte que cette composante de rendement le poids de mille grains qui rentre dans la formule de calcul du rendement, l'écart moyen enregistré qui est de 3,5 g entre le PMG de la technique conventionnelle et le semis direct ont des conséquences importantes sur la valeur théorique des rendements. Ces derniers seraient donc meilleurs au niveau des parcelles travaillées conventionnellement.

Cet écart peut s'expliquer par la bonne absorption de l'eau et des éléments minéraux chez les plantes situées aux parcelles de travail conventionnel par rapport aux celles de semis direct. La bonne absorption dans la technique conventionnelle se fait grâce à la partie racinaire qui est bien développée par rapport aux parties racinaires de la plante située dans les parcelles menées par le semis direct.

Il est à noter que au niveau des parcelles menées en semis direct, l'écart entre les deux doses de semis sont important il est de l'ordre de 6 g.

En effet le rendement estimé varie de 56,13 à 69,23 q/ha pour la technique conventionnelle et il est de 47,24 à 58,35q/ha pour la technique du semis direct. Ces résultats s'expliqueraient par l'effet des techniques culturales sur les propriétés physiques du sol et leurs effets sur le développement racinaire ; ce qui s'est probablement répercuté sur les rendements estimés obtenus.

Finalement, le meilleur rendement qui est de 69,23 q/ha est celui obtenu avec le travail conventionnel mais avec une dose de semis importante, c'est-à-dire de 180 kg /ha.

L'analyse de la variance de l'effet des techniques culturale sur le rendement du blé dur et ses composantes donne les résultats suivants :

**Tableau 27:** Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95% (rendement du blé dur et ses composantes)

Paramètres	Facteurs	Probabilité	E.T	C.V%	Signification	PPDS	Groupe homogène
Nombre d'épis /m2	F1 : Technique	0,06857	18,024	7,45%	N.S	-	-
	F2 : Dose de semis	0,00442	7,779	3,22%	H.S	9,466	D2 : A D1 : B
	INTER F1*2	0,68026	-	-	N.S	-	-
Nombre des grains /épis	F1 : Technique	0,55182	4,09	7,30%	N.S	-	-
	F2 : Dose de semis	0,62709	3,388	6,04%	N.S	-	-
	INTER F1*2	0,82583	-	-	N.S	-	-
PMG	F1 : Technique	0,11176	2,84	6,33%	N.S	-	-
	F2 : Dose de semis	0,01309	2,178	4,86%	S	2,65	D2 : A D1 : B
	INTER F1*2	0,08018	-	-	N.S	-	-
Rendement théorique	F1 : Technique	0,01117	6,476	11,22%	S	2,45	T1 : A T2 : B
	F2 : Dose de semis	0,01309	6,731	11,66%	S	8,191	D2 : A D1 : B
	INTER F1*2	0,08018	-	-	N.S	-	-

Les résultats statistiques ont montré une différence hautement significative entre les différentes doses de semis étudiés pour nombre d'épis par m<sup>2</sup>, le test de comparaison des moyennes montre que les peuplements épis les plus élevés sont obtenus avec la dose de semis égale à 180 kg/ha. Aucun effet d'interaction entre les deux facteurs n'a été observé.

Par contre, la différence est non significative entre les différents facteurs étudiés pour le nombre de grains par épi.

Comme nous avons noté aussi, la différence est non significative entre les différentes techniques étudiées pour le nombre de grains par épi ; ce qui est contraire pour le facteur densité de semis où le test de comparaison de moyenne a fait ressortir deux groupes distincts : A et B (la dose 160 kg/ha et 180 kg/ha respectivement).

En ce qui concerne le rendement en grain, l'analyse de la variance a révélé une différence significative pour les deux techniques culturales, les doses de semis, et non significative pour l'interaction entre les techniques et les doses de semis.

Le test de comparaison des moyennes montre que la technique conventionnelle semée à une dose de 180 kg/ha permis le meilleur rendement en grain que la technique du semis direct semée à la même densité avec un écart de l'ordre de 10,88

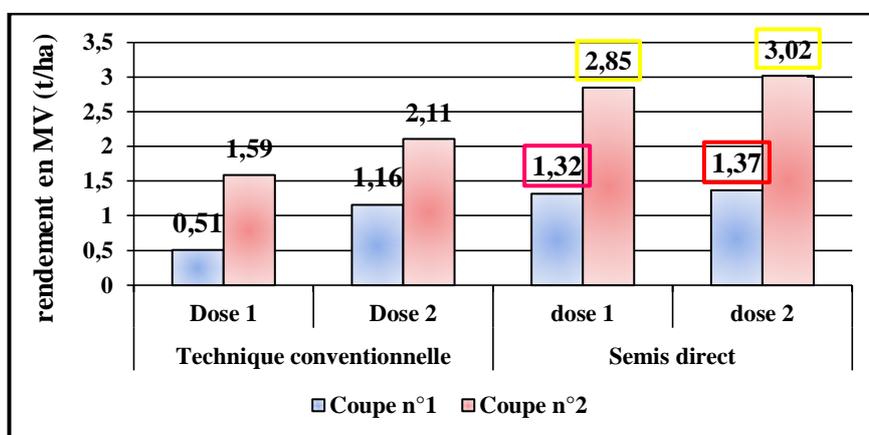
Quelle que soit la technique étudiée, c'est la dose de semis de 180 kg/ha qui a permis le rendement en grain les plus élevés, avec des écarts de 13.1 q/ha et 11.11 q/ha pour le travail conventionnel et le semis direct respectivement par rapport à une dose de semis de 160 kg/ha.

### 10.4.3. Cas de la culture du bersim

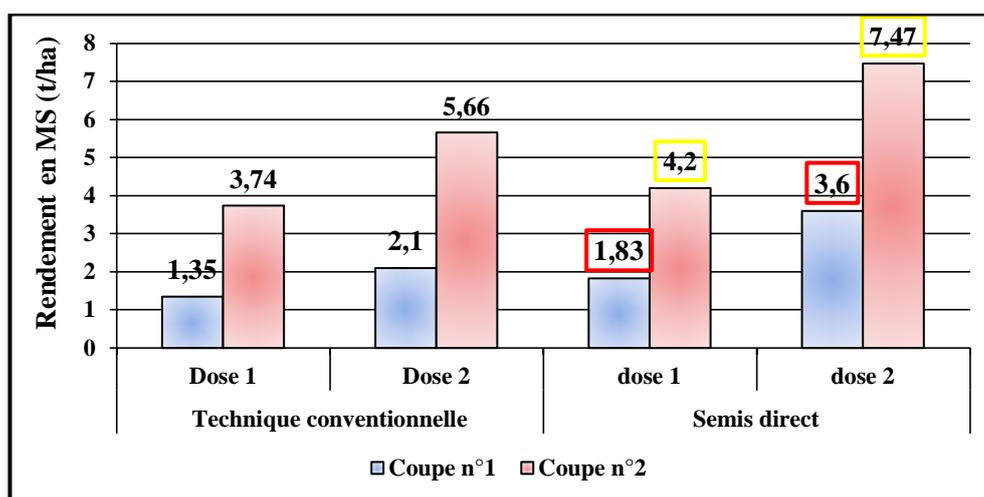
#### 10.4.3.1. Rendements en matière vert et matière sèche du bersim en fonction de la dose de semis et de la technique culturale

Les valeurs détaillées obtenues pour les différentes techniques figurent dans les tableaux G-3-3' en annexe

L'ensemble des résultats de l'effet des deux techniques culturales et deux doses de semis sur les rendements en matière verte et sèche du bersim sont mentionnés dans le tableau et les figures suivantes :



**Figure 86:** Rendement en matière verte du bersim en fonction de la technique culturale et la dose de semis



**Figure 87:** Rendement en matière sèche du bersim en fonction de la technique culturale et la dose de semis

A travers les résultats présentés précédemment, il apparaît clairement que le rendement en matière sèche est relativement le même au niveau des deux techniques pour la première coupe qui est considérée comme coupe de nettoyage. Cette dernière a pour but de diminuer au maximum les mauvaises herbes en perturbant leurs cycles végétatifs.

D'autre part, pour la deuxième coupe le rendement en matière sèche est relativement le même pour la dose 1=15 kg/ha quel que soit la technique, et il est plus important pour la dose 2=25 kg/ha au niveau de semis direct par rapport au travail conventionnel.

Donc, les meilleurs rendements sont enregistrés au niveau de la deuxième coupe avec la technique du semis direct et sont de 3.02 t/ha en MV et 7.47 t/ha en MS pour la dose 2 et 2.85 t/ha en MV et 4.2 t/ha en MS pour la dose 1. Au contraire, les plus faibles rendements sont enregistrés au niveau de la première coupe avec la technique du travail conventionnel et sont de 0.51 t/ha en MV et 1.35 t/ha en MS pour la dose 1 et 1.16 t/ha en MV et 2.1 t/ha en MS pour la dose 2.

L'ensemble des résultats de l'analyse statiques de l'effet des techniques culturales sur les rendements en matière verte et sèche de la culture du bersim sont représentés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 28:** Analyse de la variance à un niveau de confiance de 95% (rendement -Bersim)

Paramètres	Hauteur de la partie aérienne	Probabilité	E.T	C.V%	Signification	PPDS	Groupe homogène
Rendement en matière vert Coupe N°1	F1 : Technique	0,00045	0,149	6,21%	T.H.S	0,235	T2 : A T1 : B
	F2 : Dose de semis	0,01294	0,199	8,30%	S	0,242	D2 : A D1 : B
	INTER F1*2	0,13716	-	-	N.S	-	-
Rendement en matière vert Coupe N°2	F1 : Technique	0,00004	0,061	1,16%	T.H.S	0,096	T2 : A T1 : B
	F2 : Dose de semis	0	0,096	1,82%	T.H.S	0,117	D2 : A D1 : B

	<b>INTER F1*2</b>	0,00004	-	-	N.S	-	-
<b>Rendement en matière sèche Coupe N°1</b>	<b>F1 : Technique</b>	0,00045	0,07	6,39%	T.H.S	0,11	T2 : A T1 : B
	<b>F2 : Dose de semis</b>	0,00004	0,051	4,63%	T.H.S	0,062	D2 : A D1 : B
	<b>INTER F1*2</b>	0,00007	-	-	T.H.S	0,168	(T2D2 ; T2D1) : A (T2D1 ; T1D2) : B T1D1 : C
<b>Rendement en matière sèche Coupe N°2</b>	<b>F1 : Technique</b>	0,00017	0,099	4,43%	T.H.S	0,155	T2 : A T1 : B
	<b>F2 : Dose de semis</b>	0	0,061	2,73%	T.H.S	0,074	D2 : A D1 : B
	<b>INTER F1*2</b>	0,00002	-	-	T.H.S	0,225	T2D2 : A T1D2 : B T2D1 : C T1D1 : D

L'analyse de la variance a révélé une différence très hautement significative entre les différentes techniques étudiées pour le paramètre rendement en matière verte sur les deux coupes effectuées, le test de comparaison des moyennes montre que la technique du semis direct qui donne le meilleur rendement quel que soit la dose de semis, avec un écart de 0.43 t/ha et de 1.08 t/ha sont obtenus pour la première et la deuxième coupe respectivement par rapport à la technique conventionnelle.

Concernant l'effet dose de semis, une différence hautement significative est révélée entre les différentes doses de semis pour le rendement en verte, le test de comparaison des moyennes montre que la dose de semis  $d_2=25$  kg/ha permet le meilleure rendement en verte, avec un écart de 0.05 t/ha et de 0.91 t/ha sont obtenus pour la première et la deuxième coupe respectivement par rapport à la dose de semis  $d_1=15$  kg/ha.

Aucun effet d'interaction (technique x dose de semis) n'a été observé pour le rendement en verte.

Par ailleurs, l'analyse de la variance montre une différence très hautement significative entre les deux techniques culturales pour le rendement en matière sèche sur les deux coupes effectuées, Quel que soit la dose étudiée, c'est la technique du semis direct qui permis le meilleure rendement en matière sèche avec une différence de l'ordre de 1.13 t/ha et de 1t/ha pour la première et la deuxième coupe respectivement par rapport à technique conventionnelle.

Ainsi que, la dose de semis  $2= 25$ kg/ha est supérieure par rapport à la dose  $1=15$  kg/ha quelle que soit la technique culturale, car nous avons noté des écarts de 1.35 t/ha et de 1.02 t/ha pour la première et la deuxième coupe respectivement.

Concernant l'effet interaction (techniques x densités de semis) est très hautement significatif pour le rendement en matière sèche, le test de comparaison des moyennes montre que c'est la technique du semis direct semée à 25 kg/ha qui permet le meilleur rendement en matière sèche avec un écart de l'ordre de 1.81t/ha par rapport à la technique conventionnelle semée à la même densité.

**Conclusion :**

En conclusion de cette partie, le niveau de production d'une culture donnée est la résultante de la disponibilité des différents éléments nécessaires à la croissance de la plante ; cependant la technique utilisée pour la mise en place de la culture influe indirectement sur le potentiel productif de la plante.

D'après les résultats cités ci-dessus, les premières observations nous ont permis de faire un premier choix de la technique culturale et la dose de semis idéale pour la mise en place des cultures.

En effet, ces résultats ont montré que la technique culturale a un effet certain sur les propriétés du sol et par conséquent sur le développement de la culture. La dose de semis a également un effet sur l'enracinement et le développement de la culture.

D'autre part, il apparaît clairement que le bon développement des cultures est étroitement lié au développement racinaire qui est lui-même conditionné par plusieurs facteurs liés au sol, à son état et à ses propriétés physicomécaniques.

Cependant, d'après les résultats de la résistance pénétrométrique du sol et les paramètres liés à la croissance de la culture, qui mettent en évidence les effets positive du travail du sol sur la création d'une bonne structure favorable au développement de la culture, tout ça a conduit à l'obtention de bons rendements.

De façon générale, d'après nos résultats et les différentes analyses statistiques réalisées, nous avons montré l'importance des différents effets des techniques culturales utilisées sur les différents paramètres soit du sol (humidité du sol, porosité et résistance pénétrométrique du sol) ou des caractéristiques végétatives des cultures (levées, hauteur des tiges, leurs diamètres, longueur des racines ainsi que leurs diamètres et leurs densités dans le sol et enfin les rendements).

Il serait donc intéressant de quantifier ces différents effets, pour cela une analyse des relations entre les différents paramètres étudiés est nécessaire ; ce qui fera l'objectif du chapitre qui suit.

*Chapitre 11*  
*Analyse des corrélations entre*  
*les différents paramètres liés*  
*au sol et la culture*

## Chapitre 11 : Analyse des corrélations entre les différents paramètres liés au sol et la culture

### Introduction :

Après les premières observations, nous avons voulu mettre en évidence les différentes interactions entre les paramètres sol illustrés par la résistance pénétrométrique, l'humidité, la porosité et les paramètres liés à chaque culture, il nous a semblé utile de quantifier ces interactions.

La méthode utilisée à cet effet est la méthode statistique par l'analyse des corrélations simples et des régressions multiples lorsque l'intérêt est porté sur les effets combinés. Pour cela nous avons procédé comme suit :

- Analyse de l'interaction entre l'humidité, la porosité et la résistance pénétrométrique, pour chacune des techniques.
- Analyse de l'effet des techniques culturales sur les paramètres liés au sol
- Analyse de l'interaction entre la partie souterraine, la partie aérienne et le rendement.
- Analyse de l'effet des techniques culturales sur les paramètres liés à la culture
- Analyse de l'interaction entre les propriétés du sol, la densité racinaire et le rendement.
- Analyse de l'effet combiné de tous les paramètres sur le rendement pour chacune des techniques et de doses de semis.

### 11.1. Analyse de l'interaction entre l'humidité, la porosité et la résistance pénétrométrique

Au niveau de cette partie, l'intérêt est porté sur les corrélations entre l'humidité du sol, la porosité et la résistance pénétrométrique. Cela nous permettra de voir le degré des corrélations des effets de l'humidité et de la porosité sur la résistance pénétrométrique ; et cela pour chaque culture étudiée.

#### 11.1.1. Effet de l'humidité sur la résistance pénétrométrique

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable dépendante Rp (daN/cm<sup>2</sup>) avec la variable indépendante H(%), a donné les relations suivantes :

	<u>Technique conventionnelle :</u>	<u>Semis direct :</u>
<u>Sorgho</u>	$Rp (TC) = -2,591 - 1,606 * H (TC)$ <p>avec <math>r = -0,952</math> et <math>R^2 = 0,906</math></p>	$Rp (SD) = 7,294 - 0,892 * H(SD)$ <p>avec <math>r = -0,990</math> et <math>R^2 = 0,980</math></p>

<b><u>Blé</u></b>	$R_p (TC) = -2,801 - 1,161 * H(TC)$ avec $r = -0,917$ et $R^2 = 0,841$	$R_p (SD) = 4,385 - 0,863 * H(SD)$ avec $r = -0,965$ et $R^2 = 0,931$
<b><u>Bersim</u></b>	$R_p (TC) = -7,694 - 2,833 * H(TC)$ avec $r = -0,918$ et $R^2 = 0,842$	$R_p (SD) = 7,824 - 0,500 * H(SD)$ avec $r = -0,936$ et $R^2 = 0,876$

Sur l'ensemble des essais, les modèles établis montrent que la relation entre la résistance pénétrométrique ( $R_p$ ) et l'humidité du sol ( $H$ ) est fortement significatif à un niveau de confiance de 95%. Les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0,917 indiquant une relation relativement forte entre les variables (voir figures A 1-2-3 en annexes).

Dans les trois cas nous remarquons que l'augmentation de l'humidité du sol entraîne une réduction de la résistance pénétrométrique ce qui permet une bonne pénétration des racines.

Ces relations montrent aussi que l'effet de l'humidité sur la résistance pénétrométrique est important au niveau des parcelles de semis direct comparativement aux parcelles de travail conventionnel.

### 11.1.2. Effet de la porosité sur la résistance pénétrométrique

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable dépendante  $R_p$  (daN/cm<sup>2</sup>) avec la variable indépendante  $P$  (%), a donné les relations suivantes :

	<b><u>Technique conventionnelle :</u></b>	<b><u>Semis direct :</u></b>
<b><u>Sorgho</u></b>	$R_p(TC) = 3,856 - 0,515 * P(TC)$ avec $r = -0,836$ et $R^2 = 0,699$	$R_p(SD) = 5,628 - 0,408 * P(SD)$ avec $r = -0,970$ et $R^2 = 0,942$
<b><u>Blé</u></b>	$R_p(TC) = 2,077 - 1,163 * P(TC)$ avec $r = -0,934$ et $R^2 = 0,872$	$R_p(SD) = 6,216 - 0,780 * P(SD)$ avec $r = -0,868$ et $R^2 = 0,754$
<b><u>Bersim</u></b>	$R_p(TC) = 7,512 - 0,495 * P(TC)$ avec $r = -0,896$ et $R^2 = 0,802$	$R_p(SD) = 6,637 - 0,285 * P(SD)$ avec $r = -0,930$ et $R^2 = 0,865$

Pour l'ensemble des modèles, la relation entre  $R_p$  et  $P$  est fortement corrélée. Les coefficients de détermination  $R^2$  sont proches de 1, indiquent que les modèles sont fortement significatifs. Les coefficients de corrélation sont supérieurs à -0,836 indiquant que les variables sont fortement corrélés.

Ces relations montrent aussi que l'effet de la porosité du sol est inversement proportionnel à la résistance pénétrométrique (voir figures B 1-2-3 en annexes).

Tenant compte des coefficients de ces équations et comparativement à la technique conventionnelle, l'effet de l'humidité sur la résistance pénétrométrique est plus accentué au niveau des parcelles de semis direct.

De façon générale, l'augmentation de la porosité du sol entraîne une réduction de la résistance pénétrométrique.

Outre ces résultats indépendants les uns des autres, une analyse de l'effet combiné de l'humidité et de la porosité sur la résistance pénétrométrique est nécessaire pour avoir une idée sur le facteur le plus influent, la porosité ou l'humidité.

### 11.1.3. Effet combiné de l'humidité et la porosité sur la résistance pénétrométrique

L'analyse par régression multiple, mettant en relation la variable dépendante  $R_p$  avec les variables indépendantes  $H$  (%) et  $P$  (%), a donné les relations suivantes :

	<u>Technique conventionnelle :</u>	<u>Semis direct :</u>
<u>Sorgho</u>	$R_p(TC) = 15,44 - 1,36 * H(TC) - 0,47 * P(TC)$ avec $R^2 = 0,970$	$R_p(SD) = 13,32 - 0,35 * H(SD) - 0,34 * P(SD)$ avec $R^2 = 0,923$
<u>Blé</u>	$R_p(TC) = 46,51 - 1,75 * H(TC) - 1,11 * P(TC)$ avec $R^2 = 0,956$	$R_p(SD) = 14,85 - 0,45 * H(SD) - 0,41 * P(SD)$ avec $R^2 = 0,792$
<u>Bersim</u>	$R_p(TC) = 25,31 - 1,54 * H(TC) - 1,01 * P(TC)$ avec $R^2 = 0,982$	$R_p(SD) = 45,31 - 0,51 * H(SD) - 0,49 * P(SD)$ avec $R^2 = 0,988$

Pour un intervalle de confiance de 95 %, l'ensemble des modèles sont fortement significatif. Les coefficients de détermination sont proches de 1, indiquent que la résistance pénétrométrique est fortement influencée par l'humidité et la porosité du sol.

Ces relations montrent aussi que l'effet de l'humidité et de la porosité sur la résistance pénétrométrique est important au niveau des parcelles de travail conventionnel comparativement aux parcelles de semis direct.

Tenant compte des coefficients de ces équations et comparativement à la porosité, l'humidité du sol est plus influente sur la valeur de la résistance pénétrométrique et ce au niveau des parcelles menées en travail

conventionnel. Cependant, au niveau de semis direct, l'humidité et la porosité ont pratiquement le même effet sur la résistance pénétrométrique, car la stabilité structurale est plus importante et homogène.

Cette différence entre les deux techniques se traduit par le fait que le travail du sol provoque une perturbation dans la structure du sol donc une variation de la porosité dans le sol, ce qui n'est pas le cas pour le semis direct qui possède une structure stable (non travail de la bande de terre).

## 11.2. Analyse de l'effet des techniques culturales sur les paramètres liés au sol

### 11.2.1. La corrélation entre Rp (TC) et Rp (SD)

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable Rp (TC) avec la variable Rp (SD), a donné les relations suivantes :

<b><u>Sorgho</u></b>	$R_p (TC) = - 0,396 + 1,391 * R_p (SD)$ avec $r = 0,885$ et $R^2 = 0,783$
<b><u>Blé</u></b>	$R_p (TC) = -0,789 + 0,790 * R_p (SD)$ avec $r = 0,902$ et $R^2 = 0,813$
<b><u>Bersim</u></b>	$R_p (TC) = - 0,576 + 0,456 * R_p (SD)$ avec $r = 0,881$ et $R^2 = 0,776$

Ces modèles confirment clairement que la technique culturale a un effet certain sur la résistance pénétrométrique du sol. Nous constatons d'après ces formules et d'après l'étude faite précédemment, que la résistance pénétrométrique dans les sols menés en semis direct est supérieure à celle menés en travail conventionnel (voir figure C-1 en annexes).

Tenant compte de ces résultats, nous pouvons avoir une idée sur le développement des racines qui sera plus facile et rapide sur les parcelles labourées où le sol est bien structuré et possède des grands vides qui sont créés après les passages des outils aratoires ; contrairement au semis direct où la racine doit exercer une force plus élevée pour traverser les agrèges du sol.

Donc il est important de choisir correctement la technique culturale à mettre en place.

### 11.2.2. La corrélation entre H (TC) et H (SD)

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable H (TC) avec la variable H (SD), a donné les relations suivantes :

<b><u>Sorgho</u></b>	H (TC) = 0,188-0,677* H (SD) avec <b>r = 0,845</b> et <b>R<sup>2</sup>= 0,714</b>
<b><u>Blé</u></b>	H (TC)= -4,334+0,670* H (SD) avec <b>r = 0,947</b> et <b>R<sup>2</sup>= 0,847</b>
<b><u>Bersim</u></b>	H (TC)= -9,967+0,784* H (SD) avec <b>r = 0,666</b> et <b>R<sup>2</sup>= 0,443</b>

Ces modèles montrent que la technique a un effet certain sur la conservation de l'eau dans le sol. Dans notre cas, les parcelles travaillées avec la charrue à socs, présentent un faible taux d'humidité par rapport à celles non travaillées, cette différence entre les techniques culturales s'expliquerait par le fait qu'au niveau des sols labourés il y a une évaporation plus importante comparativement aux sols non travaillées, qui présente de résidus en surface qui réduisant l'évapotranspiration (voir figure C-2 en annexes)..

Autrement dit, le semis direct à une meilleure rétention pour l'eau par rapport aux techniques conventionnelles en période végétative, Cette particularité du semis direct offre à la culture un meilleur comportement en situation de déficit hydrique notamment au stade de formation du grain, qui contribue dans l'élaboration d'une composante importante du rendement (poids des grains).

Donc il est important de choisir correctement le moment d'intervention avec les pièces travaillantes.

### 11.2.3. La corrélation entre P (TC) et P (SD)

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable P (TC) avec la variable P (SD), a donné les relations suivantes :

<b><u>Sorgho</u></b>	P(TC)= 1,312+1,063* P (SD) avec <b>r = 0,989</b> et <b>R<sup>2</sup>=0,978</b> (1)
<b><u>Blé</u></b>	P(TC)= -13,639+0,671* P (SD) avec <b>r = 0,806</b> et <b>R<sup>2</sup>=0,650</b> (2)
<b><u>Bersim</u></b>	P(TC)= 4,777+1,146* P (SD) avec <b>r = 0,888</b> et <b>R<sup>2</sup>=0,788</b> (3)

Les trois modèles montrent clairement que, la technique culturale a un effet certain sur la porosité du sol.

Les équations (1) et (3) montrent que, la porosité est plus importante dans les sols labourés. En effet la charrue décompacte le sol jusqu'à une profondeur de 25 cm, elle provoque un remaniement et un retournement de

la terre, ce qui crée un nouvel arrangement des mottes de terre et par conséquent des vides qui augmentent la proportion des pores. Donc le travail du sol à un avantage très important pour un bon développement des racines (voir figure C-3 en annexes).

Ce qui n'est pas le cas pour la deuxième équation (2), les coefficients indiquant que, la porosité est plus importante au niveau du semis direct. Ces résultats sont probablement justifiées par le fait qu'après les labours, il y a eu forte chute de pluie qui a eu un effet sur la dégradation des mottes par érosion hydrique, ce qui fait que la terre fine descend et crée un milieu compact au niveau du travail conventionnel. Par contre au niveau des parcelles du semis direct, les racines de cultures précédentes permettent de créer une porosité biologique.

Ces résultats, signifient que les conditions climatiques et les techniques culturales ont un effet certain sur la variation de la porosité dans le sol.

### 11.3. Analyse de l'interaction entre la partie souterraine, la partie aérienne et le rendement.

Au niveau de cette partie, l'intérêt est porté sur les corrélations entre la partie souterraine, la partie aérienne et le rendement. Cela nous permettra de voir le degré des corrélations des effets de la partie aérienne sur la partie souterraine et le rendement; et cela pour chaque technique culturale et chaque dose de semis.

#### 11.3.1. Effet de la densité racinaire sur le nombre de plants/m<sup>2</sup>

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable Nbr plants/m<sup>2</sup> avec la variable Dr, a donné les relations suivantes :

	<u>Technique conventionnelle :</u>	<u>Semis direct :</u>
<u>Sorgho</u>	$\text{Nbr}_{\text{plants/m}^2} \text{ TCD1} = 237,21 + 21,31 * \text{D r TCD1(1)}$ <p style="text-align: center;"><b>avec r = 0,848 et R<sup>2</sup>=0,719</b></p> $\text{Nbr}_{\text{plants/m}^2} \text{ TCD2} = 103,21 + 20,71 * \text{D r TCD2(2)}$ <p style="text-align: center;"><b>avec r = 0,994 et R<sup>2</sup>=0,990</b></p>	$\text{Nbr}_{\text{plants/m}^2} \text{ SDD1} = 105,35 + 32,77 * \text{D r SDD1(3)}$ <p style="text-align: center;"><b>avec r = 0,979 et R<sup>2</sup>=0,958</b></p> $\text{Nbr}_{\text{plants/m}^2} \text{ SDD1} = 130,88 - 31,67 * \text{D r SDD1(4)}$ <p style="text-align: center;"><b>avec r = -0,992 et R<sup>2</sup>=0,985</b></p>
<u>Blé</u>	$\text{Nbr}_{\text{plants/m}^2} \text{ TCD1} = 229,46 + 120,87 * \text{D r TCD1 (1')}$ <p style="text-align: center;"><b>avec r= 0,723 et R<sup>2</sup>= 0,522</b></p> $\text{Nbr}_{\text{plants/m}^2} \text{ TCD2} = 338,28 + 90,40 * \text{D r TCD2 (2')}$ <p style="text-align: center;"><b>avec r= -0,806 et R<sup>2</sup>= 0,649</b></p>	$\text{Nbr}_{\text{plants/m}^2} \text{ SDD1} = 167,92 - 95,90 * \text{D r SDD1(3')}$ <p style="text-align: center;"><b>avec r= 0,861 et R<sup>2</sup>= 0,741</b></p> $\text{Nbr}_{\text{plants/m}^2} \text{ SDD2} = 121,86 - 81,49 * \text{D r SDD2 (4')}$ <p style="text-align: center;"><b>R= -0,984 et R<sup>2</sup>= 0,967</b></p>
<u>Bersim</u>	$\text{Nbr}_{\text{plants/m}^2} \text{ TCD1} = 41,77 + 22,00 * \text{D r TCD1(1'')}$	$\text{Nbr}_{\text{plants/m}^2} \text{ SDD1} = 204,40 + 54,97 * \text{D r SDD1(3'')}$

<p><b>avec r= 0,956 et R<sup>2</sup>=0,913</b></p> <p>Nbr plants/m<sup>2</sup> TCD2 = 43,39-24,83*DrTCD2(2'')</p> <p><b>avec r=-0,993 et R<sup>2</sup>=0,986</b></p>	<p><b>avec r =0,901 et R<sup>2</sup>=0,811</b></p> <p>Nbr plants/m<sup>2</sup> SDD2 = 230,48-50,00* DrSDD2(4'')</p> <p><b>avec r= -0,935 et R<sup>2</sup>=0,873</b></p>
--	---

Les modèles établis montrent que la relation entre Nbr plants/m<sup>2</sup> et Dr est statistiquement significative a un niveau de confiance de 95%. Les coefficients de détermination R<sup>2</sup> sont proche de 1, montre que les modèles sont significatifs. Les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0,806 indiquant que le paramètre nombre de pieds/m<sup>2</sup> est très lié à la densité racinaire, ce qui signifie que le nombre de peuplement par unité de surface est influencé par le développement du système racinaire (voir figures D 1-2-3 en annexes).

Les coefficients de ces équations montrent aussi que l'effet de la densité racinaire sur le nombre de plants/m<sup>2</sup> apparaitre plus clairement au niveau des parcelles semées avec la 2<sup>ème</sup> dose de semis.

A l'exception de (2), l'ensemble des équations nous indiquant que l'effet de la dose de semis sur la densité racinaire est négatif, lorsque la dose de semis augmente la densité racinaire diminue se qui répercute sur le nombre de plants /m<sup>2</sup>.

Nous concluons que le nombre de plants par unité de surface ne dépend pas uniquement du taux de germination et de la densité de semis, mais aussi du développement racinaire.

### 11.3.2. Effet de la densité racinaire sur la hauteur des tiges du sorgho

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable H tiges avec la variable Dr, a donné les relations suivantes :

<u>Technique conventionnelle :</u>	<u>Semis direct :</u>
<p>H tiges TCD1 = 90,20+8,49* D<sub>r</sub> TCD1(1)</p> <p><b>avec r =0,723 et R<sup>2</sup>=0,523</b></p>	<p>H tiges SDD1 = 22,07+5,34* D<sub>r</sub> SDD1(3)</p> <p><b>avec r =0,797et R<sup>2</sup>=0,636</b></p>
<p>H tiges TCD2 = 142,851+10,584* D<sub>r</sub> TCD2(2)</p> <p><b>avec r =0,890et R<sup>2</sup>=0,793</b></p>	<p>H tiges SDD2 = 43,81+7,64* D<sub>r</sub> SDD2 (4)</p> <p><b>avec r =-0,983et R<sup>2</sup>=0,955</b></p>

Les modèles établis montrent que la relation entre H tiges et Dr est significative à un niveau de confiance de 95%. Les coefficients de détermination R<sup>2</sup> sont proches de 1 montre que les modèles sont explicatifs. Les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0,723 indiquant une relation relativement forte entre les variables, l'augmentation de la hauteur des tiges est proportionnelle à l'augmentation de la densité racinaire. Ce qui nous amène à dire que la bonne croissance des plantes est le résultat d'un système racinaire bien développé.

Les coefficients de ces équations montrent aussi que l'effet de la densité racinaire sur la croissance des plants apparaît plus clairement au niveau des parcelles semées avec la 2<sup>ème</sup> dose de semis (voir la figure E-1 en annexes).

Nous remarquons que l'effet de la densité racinaire sur la croissance des plantes est important au niveau des parcelles de travail conventionnel comparativement aux parcelles de semis direct.

### 11.3.3. Effet de la densité racinaire sur le diamètre des tiges du sorgho

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable H tiges avec la variable Dr, a donné les relations suivantes :

#### Technique conventionnelle :

$$D_{\text{tiges TCD1}} = 1,207 + 0,685 * D_r \text{ TCD1}$$

**avec r =0,862 et R<sup>2</sup>=0,743**

$$D_{\text{tiges TCD2}} = 0,631 + 0,700 * D_r \text{ TCD2}$$

**avec r =0,889 et R<sup>2</sup>=0,790**

#### Semis direct :

$$D_{\text{tiges SDD1}} = 0,424 + 0,179 * D_r \text{ SDD1}$$

**avec r =0,980 et R<sup>2</sup>=0,960**

$$D_{\text{tiges SDD2}} = 0,299 + 0,184 * D_r \text{ SDD2}$$

**avec r =0,943 et R<sup>2</sup>=0,889**

Pour un intervalle de confiance de 95 %, les modèles établis sont statistiquement significatif. Les coefficients de corrélation sont positifs, indiquant que la densité racinaire a un effet positif sur le diamètre des tiges, c'est-à-dire que l'augmentation de diamètre des tiges est proportionnelle à l'augmentation de la densité des racines (Voir figure E-2 en annexes).

Les coefficients de ces équations montrent aussi que l'effet de la densité racinaire sur le diamètre des tiges du sorgho est important au niveau des parcelles de travail conventionnel comparativement aux parcelles de semis direct.

D'après ces résultats, nous ne concluons que le bon épaissement des tiges du sorgho fourrager provient d'un système racinaire bien développés

### 11.3.4. Effet de la densité racinaire sur le nombre d'épis/m<sup>2</sup> du blé dur

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable Nbr épis/m<sup>2</sup> avec la variable Dr, a donné les relations suivantes :

#### Technique conventionnelle :

$$\text{Nbr d'épis/m}^2 \text{ TCD1} = 302,615 - 44,159 * D_r \text{ TCD1 (1)}$$

#### Semis direct :

$$\text{Nbr d'épis/m}^2 \text{ SDD1} = 199,062 - 22,154 * D_r \text{ SDD1 (3)}$$

avec  $r = -0,714$  et  $R^2 = 0,510$

$$\text{Nbr d'épis/m}^2 \text{ TCD2} = 211,062 + 31,892 * D_r \text{ TCD2 (2)}$$

avec  $r = 0,834$  et  $R^2 = 0,696$

avec  $r = -0,735$  et  $R^2 = 0,540$

$$\text{Nbr d'épis/m}^2 \text{ SDD2} = 159,725 - 16,111 * D_r \text{ SDD2 (4)}$$

avec  $r = -0,751$  et  $R^2 = 0,564$

A l'exception de (2), l'ensemble des équations nous montre que la relation entre Nbr épis/m<sup>2</sup> et Dr n'est pas statistiquement significatif à un niveau de confiance de 95%. Les coefficients de corrélation sont faibles ce qui indique une relation relativement faible entre les variables.

Au niveau de l'équation (2), l'effet de la densité racinaire sur le nombre d'épis/m<sup>2</sup> est positif, l'augmentation de nombre d'épis/m<sup>2</sup> est proportionnelle à l'augmentation de la densité racinaire lorsque la densité racinaire augmente le nombre d'épis/m<sup>2</sup> augmente (Voir figure F-1 en annexes).

En d'autres termes, le bon développement du système racinaire entraîne un peuplement épis/m<sup>2</sup> élevée.

### 11.3.5. Effet de la densité racinaire sur le poids de mille grains du blé dur

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable PMG avec la variable Dr, a donné les relations suivantes :

#### Technique conventionnelle :

$$\text{PMG (TCD1)} = 22,741 + 13,225 * D_r \text{ TCD1}$$

avec  $r = 0,645$  et  $R^2 = 0,416$

$$\text{PMG (TCD2)} = 35,395 + 6,487 * D_r \text{ TCD2}$$

avec  $r = 0,558$  et  $R^2 = 0,312$

#### Semis direct :

$$\text{PMG (SDD1)} = 41,519 + 4,147 * D_r \text{ SDD1}$$

avec  $r = 0,636$  et  $R^2 = 0,405$

$$\text{PMG (SDD2)} = 68,957 + 15,104 * D_r \text{ SDD2}$$

avec  $r = 0,503$  et  $R^2 = 0,253$

Pour un intervalle de confiance de 95 %, les valeurs de R<sup>2</sup> sont faibles. Les coefficients de corrélation nous indiquant que les deux variables sont faiblement corrélés.

D'après les coefficients de ces équations, nous constatons que l'effet de la densité racinaire sur le poids de mille grains apparaît plus clairement au niveau des parcelles travaillées conventionnellement par rapport aux parcelles non travaillées. Ceci s'explique par la bonne absorption de l'eau et des éléments minéraux par la partie souterraine, qui a été bien développée chez les plantes situées aux parcelles de travail conventionnel par rapport aux celles de semis direct (Voir figure f-2 en annexes).

Donc nous constatons d'après ces résultats, que la racine a un effet indirect sur le poids de mille grains.

### 11.3.6. Effet de la densité racinaire sur la hauteur de la partie aérienne du bersim

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable H p.a avec la variable Dr, a donné les relations suivantes :

**Technique conventionnelle :****Coupe n°1**

$$H_{p.a}TCD1 = 1,564 + 1,786 * D_r TCD1$$

**avec r =0,739 et R<sup>2</sup>=0,546**

$$H_{p.a}TCD2 = 1,566 + 1,559 * D_r TCD2$$

**avec r =0,891 et R<sup>2</sup>=0,793**

**Coupe n°2**

$$H_{p.a}TCD1 = 16,440 - 6,948 * D_r TCD1$$

**avec r =-0,643 et R<sup>2</sup>=0,414**

$$H_{p.a}TCD2 = 12,347 + 7,353 * D_r TCD2$$

**avec r =0,704 et R<sup>2</sup>=0,497**

**Semis direct :****Coupe n°1**

$$H_{p.a}SDD1 = 5,085 - 3,179 * D_r SDD1$$

**avec r =-0,855 et R<sup>2</sup>=0,731**

$$H_{p.a}SDD1 = 5,078 - 3,154 * D_r SDD1$$

**avec r =-0,814 et R<sup>2</sup>=0,662**

**Coupe n°2**

$$H_{p.a}SDD1 = 14,939 - 4,481 * D_r SDD1$$

**avec r =-0,667 et R<sup>2</sup>=0,444**

$$H_{p.a}SDD2 = 11,886 + 4,059 * D_r SDD2$$

**avec r =0,613 et R<sup>2</sup>=0,375**

Au niveau de la 1<sup>ère</sup> coupe, Les équations établis montrent que, l'effet de la partie souterraine sur la partie aérienne du bersim apparait plus clairement sur les parcelles menées en semis direct avec des coefficients de corrélations supérieurs à 0,814 mais de façons négatives, c'est-à-dire, le mauvais développement des racines entraîne une réduction dans la croissance des plantes. Sur ces parcelles le système racinaire est moins développé et la racine exercée une force plus élevée pour traverser les agrégats du sol (voir figure G-1 en annexes).

Par contre au niveau des parcelles travaillées conventionnellement, la relation entre la partie souterraine et la partie aérienne est positif, l'augmentation de la densité racinaire est proportionnelle à l'augmentation de la hauteur de la partie aérienne. Autrement dit, les racines des plantes situées sur les parcelles labourées sont bien développées et qui sont répercutent positivement sur la croissance de la partie aérienne des plantes du bersim.

Pour la 2<sup>ème</sup> coupe, les équations établis montrent que la relation entre la densité racinaire et la hauteur de la partie aérienne du bersim n'est pas statistiquement significatif.

De façon générale, le bon développement du système racinaire entraîne une meilleure croissance des plantes du bersim.

### 11.3.7. Effet de nombre de plants/m<sup>2</sup> sur le rendement

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable RDT avec la variable Nbr plant/m<sup>2</sup>, a donné les relations suivantes :

	<u>Technique conventionnelle :</u>	<u>Semis direct :</u>
<b><u>Sorgho</u></b>	$RDT_{M,V}TCD1 = 119,334 + 0,798 * Nbr_{plants/m^2} TCD1$ <p style="text-align: center;"><b>avec r= 0,951 et R<sup>2</sup>=0,904</b></p> $RDT_{M,V}TCD2 = 154,302 - 0,811 * Nbr_{plants/m^2} TCD2$ <p style="text-align: center;"><b>avec r=-0,927 et R<sup>2</sup>=0,859</b></p>	$RDT_{M,V}SDD1 = 161,721 + 0,869 * Nbr_{plants/m^2} SDD1$ <p style="text-align: center;"><b>avec r= 0,907 et R<sup>2</sup>=0,822</b></p> $RDT_{M,V}SDD2 = 176,320 - 0,814 * Nbr_{plants/m^2} SDD2$ <p style="text-align: center;"><b>avec r = -0,915 et R<sup>2</sup>=0,836</b></p>
<b><u>Blé</u></b>	$RDT (q/ha) TCD1 = 94,627 + 0,128 * Nbr_{plants/m^2} TCD1$ <p style="text-align: center;"><b>avec r= 0,947 et R<sup>2</sup>=0,897</b></p> $RDT (q/ha) TCD2 = 93,780 - 0,131 * Nbr_{plants/m^2} TCD2$ <p style="text-align: center;"><b>avec r=-0,909 et R<sup>2</sup>=0,826</b></p>	$RDT(q/ha) SDD1 = 93,749 + 0,117 * Nbr_{plants/m^2} SDD1$ <p style="text-align: center;"><b>avec r= 0,952 et R<sup>2</sup>=0,906</b></p> $RDT(q/ha) SDD2 = 87,362 - 0,121 * Nbr_{plants/m^2} SDD2$ <p style="text-align: center;"><b>avec r = -0,946 et R<sup>2</sup>=0,895</b></p>
<b><u>Bersim</u></b>	<p style="text-align: center;"><b><u>Coupe n°1</u></b></p> $RDT_{M,V} TCD1 = 2,553 + 0,090 * Nbr_{plants/m^2} TCD1$ <p style="text-align: center;"><b>avec r= 0,625 et R<sup>2</sup>=0,391</b></p> $RDT_{M,V} TCD2 = 3,356 - 0,012 * Nbr_{plants/m^2} TCD2$ <p style="text-align: center;"><b>avec r=-0,938 et R<sup>2</sup>=0,880</b></p> <p style="text-align: center;"><b><u>Coupe n°2</u></b></p> $RDT_{M,V} TCD1 = 3,309 + 0,010 * Nbr_{plants/m^2} TCD1$ <p style="text-align: center;"><b>avec r= 0,848 et R<sup>2</sup>=0,719</b></p> $RDT_{M,V} TCD2 = 3,270 + 0,014 * Nbr_{plants/m^2} TCD2$ <p style="text-align: center;"><b>avec r= 0,818 et R<sup>2</sup>=0,669</b></p>	<p style="text-align: center;"><b><u>Coupe n°1</u></b></p> $RDT_{M,V} SDD1 = 3,117 - 0,011 * Nbr_{plants/m^2} SDD1$ <p style="text-align: center;"><b>avec r= -0,961 et R<sup>2</sup>=0,923</b></p> $RDT_{M,V} SDD2 = 3,064 - 0,014 * Nbr_{plants/m^2} SDD2$ <p style="text-align: center;"><b>avec r = -0,801 et R<sup>2</sup>=0,641</b></p> <p style="text-align: center;"><b><u>Coupe n°2</u></b></p> $RDT_{M,V} SDD1 = 4,754 - 0,023 * Nbr_{plants/m^2} SDD1$ <p style="text-align: center;"><b>avec r= -0,834 et R<sup>2</sup>=0,696</b></p> $RDT_{M,V} SDD2 = 3,116 - 0,022 * Nbr_{plants/m^2} SDD2$ <p style="text-align: center;"><b>avec r = -0,957 et R<sup>2</sup>=0,916</b></p>

Les résultats des essais de sorgho et blé dur, montrent que la relation entre le rendement et le nombre de plants/m<sup>2</sup> est fortement corrélée.

Au niveau de la 1ere dose de semis, les équations indiquant que l'augmentation de rendement est proportionnelle à l'augmentation de nombre du plants/m<sup>2</sup>, quand le nombre de plants/m<sup>2</sup> augment le rendement des cultures augment. Par contre au niveau des parcelles semées avec la 2eme dose, la relation est inversement proportionnelle, ceci s'explique par l'insuffisance d'espace entre les plantes et le mauvais développement du système racinaire (Voir figures H-1-2-3 en annexes).

Les résultats obtenus par l'essai du bersim, montrent que le mauvais développement des racines entraîne une diminution dans le nombre de plantes/m<sup>2</sup> et qui se répercute sur le rendement du bersim.

### 11.3.8. Effet de nombre d'épis/m<sup>2</sup> sur le rendement du blé

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable RDT avec la variable Nbr épis/m<sup>2</sup>, a donné les relations suivantes :

<u>Technique conventionnelle :</u>	<u>Semis direct :</u>
$RDT(TCD1) = 33,668 + 0,312 * \text{Nbr d'épis/m}^2 \text{ TCD1}$  <b>avec r =0,944 et R<sup>2</sup>=0,891</b>	$RDT(SDD1) = 11,719 + 0,200 * \text{Nbr d'épis/m}^2 \text{ SDD1}$  <b>avec r =0,947 et R<sup>2</sup>=0,897</b>
$RDT(TCD2) = 35,658 + 0,396 * \text{Nbr d'épis/m}^2 \text{ TCD2}$  <b>avec r =0,931 et R<sup>2</sup>=0,868</b>	$RDT(SDD2) = 10,788 + 0,219 * \text{Nbr d'épis/m}^2 \text{ SDD2}$  <b>avec r = 0,968 R<sup>2</sup>=0,936</b>

Pour l'ensemble des modèles, la relation entre RDT et Nbr épis/m<sup>2</sup> est fortement corrélée. Les coefficients de détermination R<sup>2</sup> sont proches de 1, indiquent que les modèles sont fortement significatifs. Les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0,931 indiquant que les variables sont fortement corrélés.

Les coefficients de ces équations montrent aussi que la relation de nombre d'épis /m<sup>2</sup> et le rendement du blé dur apparaitre plus clairement au niveau des parcelles semées avec la 2<sup>ème</sup> dose de semis. L'augmentation de rendement du blé est proportionnelle à l'augmentation de nombre d'épis par unité de surface (Voir figure I-1 en annexes).

### 11.3.9. Effet de nombre de grains/épi sur le rendement du blé

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable RDT avec la variable Nbr grains/épi a donné les relations suivantes :

<u>Technique conventionnelle :</u>	<u>Semis direct :</u>
$RDT(TCD1) = 132,955 + 1,562 * \text{Nbr grains/épi TCD1}$  <b>avec r =0,877 et R<sup>2</sup>=0,769</b>	$RDT(SDD1) = 175,915 + 2,297 * \text{Nbr grains/épi SDD1}$  <b>avec r =0,853 et R<sup>2</sup>=0,727</b>
$RDT(TCD2) = 219,034 + 2,668 * \text{Nbr grains/épi TCD2}$  <b>avec r =0,906 et R<sup>2</sup>=0,820</b>	$RDT(SDD2) = 154,736 + 2,065 * \text{Nbr grains/épi SDD2}$  <b>avec r =0,898 et R<sup>2</sup>=0,806</b>

D'après ces résultats, nous remarquons que, la relation entre RDT et Nbr épis/m<sup>2</sup> est fortement corrélée. Les coefficients de détermination R<sup>2</sup> sont proches de 1, indiquent que les modèles sont fortement significatifs. Les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0,853 indiquant que les variables sont fortement corrélés (Voir figure I-2 en annexes).

Les coefficients de ces équations montrent aussi que la relation entre de nombre de grains/épi et le rendement du blé dur apparaitre plus clairement au niveau des parcelles semées avec la 2<sup>ème</sup> dose de semis. Lorsque le nombre de gains/épi est élevé le rendement du blé dur est meilleur.

### 11.3.10. Effet de poids de mille grains sur le rendement du blé

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable RDT avec la variable PMG, a donné les relations suivantes :

<u>Technique conventionnelle :</u>	<u>Semis direct :</u>
RDT(TCD1) = 16,930+1,974* PMG (g) TCD1 <b>avec r =0,803 et R<sup>2</sup>=0,644</b>	RDT (SDD1) = 17,077+1,408* PMG (g) SDD1 <b>avec r =0,674 et R<sup>2</sup>=0,454</b>
RDT(TCD2) = 14,584+1,815* PMG (g) TCD2 <b>avec r =0,802 et R<sup>2</sup>=0,644</b>	RDT(SDD2) =14,83+1,268* PMG (g) SDD2 <b>avec r =0,770 et R<sup>2</sup>=0,592</b>

Pour un intervalle de confiance de 95 %, l'ensemble des modèles sont statistiquement significatifs. Les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0,674, indiquent que le rendement de blé dur est fortement influencé par le poids de mille grains (Voir figure I-3 en annexes).

Tenant compte des coefficients de ces équations et comparativement au technique semis direct, la relation entre le poids de mille grains et le rendement est plus accentué au niveau des parcelles travaillées conventionnellement.

### 11.3.11.Effet de la densité racinaire sur le rendement

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable RDT avec la variable Dr, a donné les relations suivantes :

	<u>Technique conventionnelle :</u>	<u>Semis direct :</u>
<u>Sorgho</u>	RDT <sub>M.V</sub> TCD1 = 51,942+23,588*D <sub>r</sub> TCD1 <b>avec r = 0,930 et R<sup>2</sup>=0,864</b>	RDT <sub>M.V</sub> SDD1 = 42,291+18,277* D <sub>r</sub> SDD1 <b>avec r =0,974 et R<sup>2</sup>=0,948</b>
	RDT <sub>M.V</sub> TCD2 = 89,935+26,043* D <sub>r</sub> TCD2 <b>avec r =0,904 et R<sup>2</sup>=0,817</b>	RDT <sub>M.V</sub> SDD2 = 58,509+10,528* D <sub>r</sub> SDD2 <b>avec r =0,935 et R<sup>2</sup>=0,874</b>

<b><u>Blé</u></b>	$\text{RDT}(\text{TCD1}) = 47,662 + 6,451 * D_r \text{ TCD1}$ <p style="text-align: center;"><b>avec <math>r = 0,764</math> et <math>R^2 = 0,929</math></b></p> $\text{RDT}(\text{TCD2}) = 42,597 + 15,842 * D_r \text{ TCD2}$ <p style="text-align: center;"><b>avec <math>r = 0,774</math> et <math>R^2 = 0,949</math></b></p>	$\text{RDT}(\text{SDD1}) = 47,022 + 15,548 * D_r \text{ SDD1}$ <p style="text-align: center;"><b>avec <math>r = 0,614</math> et <math>R^2 = 0,835</math></b></p> $\text{RDT}(\text{SDD2}) = 68,642 - 14,304 * D_r \text{ SDD2}$ <p style="text-align: center;"><b>avec <math>r = -0,743</math> et <math>R^2 = 0,889</math></b></p>
<b><u>Bersim</u></b>	<p style="text-align: center;"><b><u>Coupe n°1</u></b></p> $\text{RDT}_{\text{M.V}} \text{ TCD1} = 3,241 + 0,330 * D_r \text{ TCD1}$ <p style="text-align: center;"><b>avec <math>r = 0,743</math> et <math>R^2 = 0,583</math></b></p> $\text{RDT}_{\text{M.V}} \text{ TCD2} = 3,356 - 0,120 * D_r \text{ TCD2}$ <p style="text-align: center;"><b>avec <math>r = -0,738</math> et <math>R^2 = 0,744</math></b></p> <p style="text-align: center;"><b><u>Coupe n°2</u></b></p> $\text{RDT}_{\text{M.V}} \text{ TCD1} = 13,707 + 0,101 * D_r \text{ TCD1}$ <p style="text-align: center;"><b>avec <math>r = 0,705</math> et <math>R^2 = 0,497</math></b></p> $\text{RDT}_{\text{M.V}} \text{ TCD2} = 15,628 + 0,360 * D_r \text{ TCD2}$ <p style="text-align: center;"><b>avec <math>r = 0,784</math> et <math>R^2 = 0,641</math></b></p>	<p style="text-align: center;"><b><u>Coupe n°1</u></b></p> $\text{RDT}_{\text{M.V}} \text{ SDD1} = 2,859 - 0,220 * D_r \text{ SDD1}$ <p style="text-align: center;"><b>avec <math>r = -0,711</math> et <math>R^2 = 0,505</math></b></p> $\text{RDT}_{\text{M.V}} \text{ SDD2} = 2,953 - 0,620 * D_r \text{ SDD2}$ <p style="text-align: center;"><b>avec <math>r = -0,882</math> et <math>R^2 = 0,778</math></b></p> <p style="text-align: center;"><b><u>Coupe n°2</u></b></p> $\text{RDT}_{\text{M.V}} \text{ SDD1} = 13,999 + 0,490 * D_r \text{ SDD1}$ <p style="text-align: center;"><b>avec <math>r = 0,625</math> et <math>R^2 = 0,390</math></b></p> $\text{RDT}_{\text{M.V}} \text{ SDD2} = 10,108 - 0,120 * D_r \text{ SDD2}$ <p style="text-align: center;"><b>avec <math>r = -0,757</math> et <math>R^2 = 0,573</math></b></p>

Les résultats des essais menés sur des sols limoneux, montrent que la relation entre RDT M.V et  $D_r$  est fortement corrélée. Les coefficients de détermination  $R^2$  sont proches de 1, indiquent que les modèles sont fortement significatifs. Ceci signifie que les racines influence positivement sur la quantité et la qualité de rendement du sorgho. Dans ce cas, La force exercée par les racines pour traverser les particules du sol est supérieure à la résistance mécanique du sol, cette force permet aux racines de se développer plus facilement dans le sol (Voir figures J-1-2-3 en annexes).

Pour le reste des équations, nous remarquons que les coefficients de corrélation sont faibles, indiquent que la relation entre la densité racinaire et le rendement est faiblement corrélée. Cela peut être expliqué par la texture du sol qui est de classe argileux, qui est caractérisée par une résistance mécanique plus élevée. Cette dernière influence négativement sur la croissance et le développement des racines et qui se répercute sur le rendement des cultures, autrement dit, Un faible développement racinaire entraîne une mauvaise absorption des éléments nutritifs du sol nécessaires aux plantes. Des carences peuvent alors s'observer au niveau des rendements obtenus.

Globalement, un système racinaire bien développé est le résultat d'une bonne structure du sol ce qui est essentiel pour un rendement élevé.

### 11.3.12. Effet combiné de la partie souterraine, la partie aérienne sur le rendement

L'analyse par régression multiple, mettant en relation la variable dépendante RDT avec les variables indépendantes (les parties souterraine et aérienne), a donné les relations suivantes :

#### a. Sorgho

##### Technique conventionnelle

$$\text{RDT}_{\text{M.V}}(\text{TCD1}) = 131,06 + 0,703 * \text{Nbr}_{\text{plants/m}^2} \text{TCD1} + 1,234 * H_{\text{tiges}} \text{TCD1} + 2,477 * D_{\text{tige}} \text{TCD1} + 3,962 * D_r \text{TCD1}$$

**avec  $R^2 = 0,900$**

$$RDT_{M.V}(TCD2)=211+0,822*Nbr_{plants/m^2} TCD2 -1,536*H_{tiges} TCD2-1,128*D_{tige} TCD2+2,357*D_r TCD2$$

avec  $R^2=0,980$

#### Semis direct

$$RDT_{M.V}(SDD1)= 185,44 +1,26* Nbr_{plants/m^2} SDD1+1,349* H_{tiges} SDD1+2,07*D_{tiges} SDD1+3,80*D_r SDD1$$

avec  $R^2=0,962$

$$RDT_{M.V}(SDD2)=160,22+0,422*Nbr_{plants/m^2} SDD2-2,463*H_{tiges} SDD2-2,577*D_{tiges} SDD2+3,061*D_r SDD2$$

avec  $R^2=0,930$

Les modèles établis montrent que la relation entre les variables est fortement significative à un niveau de confiance de 95%. Les coefficients de détermination  $R^2$  sont proches de 1, indiquant que les variables indépendantes ont un effet certain sur le rendement en matière vert du sorgho.

Tenant compte des coefficients de ces équations et comparativement à la hauteur des tiges, diamètre des tiges et le nombre de pieds /m<sup>2</sup>, la densité racinaire est plus influente sur la quantité et la qualité du rendement en matière vert et ce au niveau des deux techniques (TC et SD).

Nous constatons aussi que l'augmentation de la dose de semis influence négativement sur la croissance des plantes.

Cela nous amènés à dire que le bon développement du système racinaire conduit certainement à une bonne croissance des plantes et donc à un meilleur rendement du sorgho.

### Blé dur

#### Technique conventionnelle

$$RDT(TCD1)= 111,03+0,124*Nbr_{plants/m^2} TCD1+0,266*Nbr_{épis/m^2} TCD1+0,567*Nbr_{grains/épi} TCD1+1,415*PMG TCD1+4,686*D_r TCD1$$

avec  $R^2= 0,986$

$$RDT(TCD2)=55,01+0,003* Nbr_{plants/m^2} TCD2+0,299*Nbr_{épis/m^2} TCD2+0,501* Nbr_{grains/épi} TCD2+0,971*PMG TCD2+ 3,998*D_r TCD2$$

avec  $R^2=0,995$

#### Semis direct

$$RDT(SDD1)= 99,76+0,432*Nbr_{plants/m^2} SDD1+0,635*Nbr_{épis/m^2} SDD1 +0,709*Nbr_{grains/épi} SDD1+1,000*PMG SDD1+7,286*D_r SDD1$$

avec  $R^2= 0,997$

$$RDT(SDD2)= 43,31+0,132*Nbr_{plants/m^2} SDD2+0,196*Nbr_{épis/m^2} SDD2- 0,571*Nbr_{grains/épi} SDD2+0,959*PMG SDD2+7,049*D_r SDD2$$

avec  $R^2= 0,959$

Pour un intervalle de confiance de 95 %, l'ensemble des modèles sont fortement significatifs. Les coefficients de détermination sont proches à 1, indiquent que le rendement du blé dur est fortement influencé par la partie aérienne et souterraine des plantes.

Tenant compte des coefficients de ces équations, l'ordre d'importance des effets est le poids de mille grains (PMG), le nombre de grains/épi (Nbr g/épi), le nombre d'épis/m<sup>2</sup> (Nbr épis/m<sup>2</sup>) et enfin le nombre de plants par unité de surface. Cependant nous constatons que, le rendement du blé dur est fortement influencé par la densité racinaire et le poids de mille grains et ce au niveau des deux techniques.

## b. Bersim

### Technique conventionnelle

#### Coupe n°1

$$RDT_{M.V}(TCD1)=2,177+0,002*Nbr_{plants/m^2}TCD1-0,587*H_{p.a}TCD1+1,844*D_rTCD1 \text{ avec } R^2= 0,974$$

$$RDT_{M.V}(TCD2)= 2,927-0,002* Nbr_{plants/m^2} TCD2 -0,063* H_{p.a}TCD2 -1,557*D_rTCD2 \text{ avec } R^2=0,991$$

#### Coupe n°2

$$RDT_{M.V}(TCD1)=5,414+0,006* Nbr_{plants/m^2} TCD1 -0,069*H_{p.a}TCD1-1,066*D_rTCD1 \text{ avec } R^2= 0,991$$

$$RDT_{M.V}(TCD2)= 5,502+0,003*Nbr_{plants/m^2} TCD2+0,021*H_{p.a}TCD2-1,090*D_rTCD2 \text{ avec } R^2= 0,995$$

### Semis direct

#### Coupe n°1

$$RDT_{M.V}(SDD1)=3,894+0,017*Nbr_{plants/m^2} SDD1-1,188*H_{p.a}SDD1 +1,232*D_rSDD1 \text{ avec } R^2=0,961$$

$$RDT_{M.V}(SDD2)=4,175-0,002*Nbr_{plants/m^2} SDD2-0,335*H_{p.a}SDD2+1,170*D_rSDD2 \text{ avec } R^2= 0,988$$

#### Coupe n°2

$$RDT_{M.V}(SDD1)= 5,892+0,048*Nbr_{plants/m^2} SDD1+0,255*H_{p.a}SDD1 +1,045*D_rSDD1 \text{ avec } R^2= 0,989$$

$$RDT_{M.V}(SDD2)= 11,287-0,015*Nbr_{plants/m^2} SDD2-0,320*H_{p.a}SDD2-1,059*D_rSDD2 \text{ avec } R^2=0,993$$

Pour un intervalle de confiance de 95 %, les modèles sont fortement significatifs. Les coefficients de détermination sont proches à 1, indiquant que les variables nombre de plants /m<sup>2</sup>, hauteur de la partie aérienne et densité racinaire ont un effet certain sur le rendement du bersim.

D'après ces modèles, nous constatons que l'effet de la densité racinaire est plus important que celle de la hauteur de la partie aérienne qui est elle-même plus important que l'effet de nombre de plants /m<sup>2</sup> sur le rendement du bersim.

Ces relations montrent aussi que l'effet de la densité racinaire sur le rendement du bersim est important au niveau des parcelles de travail conventionnel comparativement aux parcelles de semis direct et ce au niveau de deux coupes effectuées.

#### 11.4. Analyse de l'effet des techniques culturales sur les paramètres liés à la culture

##### 11.4.1. La corrélation entre Nbr plants/m<sup>2</sup> (TC) et Nbr plants/m<sup>2</sup> (SD)

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable Nbr pieds/m<sup>2</sup> (TC) avec la variable Nbr pieds/m<sup>2</sup> (SD), a donné les relations suivantes :

<b><u>Sorgho</u></b>	Nbr plants/m <sup>2</sup> TCD1 = 117,198-1,789* Nbr plants/m <sup>2</sup> SDD1 avec r =0,885 et R <sup>2</sup> =0,783
	Nbr plants/m <sup>2</sup> TCD2 = -146,570+2,605* Nbr plants/m <sup>2</sup> SDD2 avec r = 0,985 et R <sup>2</sup> =0,971
<b><u>Blé</u></b>	Nbr plants/m <sup>2</sup> TCD1 = 152,821-1,574* Nbr plants/m <sup>2</sup> SDD1 avec r = 0,720 et R <sup>2</sup> =0,519
	Nbr plants/m <sup>2</sup> TCD1 = -96,518+2,549* Nbr plants/m <sup>2</sup> SDD1 avec r =0,946 et R <sup>2</sup> =0,896
<b><u>Bersim</u></b>	Nbr plants/m <sup>2</sup> TCD1 = -23,110+0,125* Nbr plants/m <sup>2</sup> SDD1 avec r =0,885et R <sup>2</sup> =0,783
	Nbr plants/m <sup>2</sup> TCD1 = -26,570+0,105* Nbr plants/m <sup>2</sup> SDD1 avec r = 0,927et R <sup>2</sup> =0,859

L'ensemble de ces équations, montrent que la relation entre Nbr plants/m<sup>2</sup> (TC) et Nbr plants/m<sup>2</sup> (SD) est fortement significative à un niveau de confiance de 95%. Les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0,720, indiquant une forte relation entre les variables. Donc, il est important de choisir correctement la technique culturale à mettre en place (voir figures K-1-2-3 en annexes).

Ces relations montrent clairement que la technique culturale a un effet certain sur le nombre de plants par m<sup>2</sup>. Nous constatons d'après ces équations que le nombre de plants/m<sup>2</sup> est meilleur sur les parcelles menées en semis direct par rapport à celles de travail conventionnel, cela peut être due à la non perturbation du sol, le semis est localisé, il permet donc un bon contact sol-graine, ajouter à cela l'humidité du sol qui est plus élevée et qui favorise la levée des plants. Contrairement au semis conventionnel qui possède une structure non stable, Cette dernière faciliterait l'évaporation d'une importante quantité d'eau qui est nécessaire pour la germination des graines.

Tenant compte des coefficients de ces relations, l'effet de la technique culturale sur le nombre de plants/m<sup>2</sup> est important au niveau des parcelles semées avec la deuxième dose 2 comparativement à celle semées avec la première dose.

### 11.4.2. La corrélation entre H tiges (TC) et H tiges (SD) du sorgho

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable H tiges (TC) avec la variable H tiges (SD), a donné les relations suivantes :

$$H_{\text{tiges}} \text{TCD1} = 354,557 - 1,393 * H_{\text{tiges}} \text{SDD1} \text{ avec } r = 0,881 \text{ et } R^2 = 0,777$$

$$H_{\text{tiges}} \text{TCD2} = 280,205 - 0,190 * H_{\text{tiges}} \text{SDD2} \text{ avec } r = 0,750 \text{ et } R^2 = 0,562$$

Ces modèles permettent de dire que la relation H tiges des différentes techniques culturales est statistiquement significative à un niveau de confiance de 95%. Les coefficients de corrélation indiquant que les deux variables sont corrélées.

D'après ces formules, nous constatons que la hauteur des tiges dans les sols menés en semis conventionnel est supérieure à celle de la technique directe et cela quelque soit la dose de semis étudiée. Donc la croissance des tiges est modifiée par le travail du sol.

Les coefficients de corrélation montrent que la hauteur des tiges est importante au niveau des parcelles semées avec la dose 1, un coefficient de corrélation de **0,881** qui est supérieur comparativement aux parcelles semées avec la dose 2 où il est de **0,750** (voir figure L-1 en annexes).

La différence dans la croissance entre les deux techniques culturales étudiées peut s'expliquer par le mauvais développement du système racinaire dans les sols non travaillés qui a conduit à une mauvaise absorption des éléments nutritifs du sol nécessaires aux plantes.

Ces résultats confirment que le travail du sol améliore la structure du sol en créant un état du sol caractérisé par une porosité moyenne qui favorise l'infiltration et la circulation de l'eau et des éléments nutritifs pour le bon développement des cultures.

### 11.4.3. La corrélation entre D tige (TC) et D tige (SD) du sorgho

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable D tiges (TC) avec la variable D tiges (SD), a donné les relations suivantes :

$$D_{\text{tiges}} \text{TCD1} = 0,825 + 0,799 * D_{\text{tiges}} \text{SDD1} \text{ avec } r = 0,923 \text{ et } R^2 = 0,851$$

$$D_{\text{tiges}} \text{TCD2} = 0,605 + 0,790 * D_{\text{tiges}} \text{SDD2} \text{ avec } r = 0,903 \text{ et } R^2 = 0,816$$

La relation entre D tiges (TC) et D tiges (SD) est fortement significative à un niveau de confiance de 95%. Les coefficients de corrélation indiquant que les variables sont fortement corrélées.

Ces relations montrent que le diamètre des tiges est important au niveau des parcelles semées avec la dose 1, un coefficient de corrélation de **0,923** qui est supérieur comparativement aux parcelles semées avec la dose 2 où il est de **0,903** (voir figure L-2 en annexes).

Ces formules indiquent aussi que l'épaississement des tiges dans les parcelles travaillées est meilleur par rapport à celui des sols menés en semis direct et cela quelque soit la dose de semis étudiée. Ceci s'explique par la bonne absorption de l'eau et des éléments nutritifs qui se fait grâce à les racines qui est bien développée dans les parcelles semées conventionnellement par rapport à les racines des plantes situées dans les parcelles non labourées. Donc le choix de la technique culturale mise en place est important pour l'obtention d'une bonne croissance des plantes.

#### 11.4.4. La corrélation entre H p.a (TC) et H p.a (SD) du bersim

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable H p.a (TC) avec la variable H p.a (SD), a donné les relations suivantes :

##### Coupe n°1

$$H_{p.a}TCD1 = 1,646 - 0,188 * H_{p.a}SDD1 \text{ avec } r = 0,771 \text{ et } R^2 = 0,594$$

$$H_{p.a}TCD2 = -1,455 + 0,193 * H_{p.a}SDD2 \text{ avec } r = 0,760 \text{ et } R^2 = 0,577$$

##### Coupe n°2

$$H_{p.a}TCD1 = -4,616 - 1,088 * H_{p.a}SDD1 \text{ avec } r = 0,778 \text{ et } R^2 = 0,605$$

$$H_{p.a}TCD2 = -3,344 + 1,108 * H_{p.a}SDD2 \text{ avec } r = 0,897 \text{ et } R^2 = 0,805$$

Les coefficients de détermination montrent que la technique culturale a un effet certain sur la croissance des plants.

Ces équations sont clairement montrées que l'évolution des hauteurs au niveau du semis direct est beaucoup plus importante que dans le travail conventionnel et cela pour les deux coupes et quelque soit la dose de semis.

Tenant compte des coefficients de ces équations et comparativement à la 1ère coupe, l'effet de la technique culturale sur hauteur de la partie aérienne apparaît plus clairement au niveau de la 2ème coupe avec des coefficients supérieurs à 1,088 (voir figure M-1 en annexes).

Cet écart entre les deux coupes s'explique par l'absence de pluie durant la phase d'installation du bersim et la concurrence exercée par les mauvaises herbes. Ce qui indique que la pluviométrie est un facteur primordial dans la croissance du bersim, plus particulièrement lors de la phase de son installation.

D'autre part, la différence dans la croissance des plants entre les deux techniques culturales étudiées peut être due au non perturbation du sol en semis direct, qui permet donc un bon contact sol-graine, ajouter à cela l'humidité du sol qui est plus élevée et qui favorise la croissance des plants. Ces résultats affirment que le semis direct a pour principal avantage la conservation de l'eau dans le sol.

D'après ces résultats, on peut dire que les techniques culturales et les conditions de mise en place ont un effet sur la hauteur de la partie aérienne du bersim. Donc le choix de la technique à mettre en place est très important.

#### 11.4.5. La corrélation entre Nbr épis/m<sup>2</sup> (TC) et Nbr épis/m<sup>2</sup> (SD) du blé

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable Nbr épis/m<sup>2</sup>(TC) avec la variable Nbr épis/m<sup>2</sup>(SD), a donné les relations suivantes :

$$\text{Nbr épis/m}^2\text{TCD1} = 280,431 + 1,890 * \text{Nbr épis/m}^2\text{SDD1} \text{ avec } r = 0,887 \text{ et } R^2=0,786$$

$$\text{Nbr épis/m}^2\text{TCD2} = 110,915 + 2,595 * \text{Nbr épis/m}^2\text{SDD2} \text{ avec } r = 0,907 \text{ et } R^2=0,822$$

Tenant compte de la valeur de p inférieure à 0,05, les modèles établis montrent que la relation entre Nbr épis/m<sup>2</sup> (TC) et Nbr épis/m<sup>2</sup> (SD) est fortement significative à un niveau de confiance de 95%. Les coefficients de détermination sont proches de 1. Les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0,887 indiquant une relation relativement forte entre les variables. Nous en concluons donc que le nombre de d'épis par m<sup>2</sup> est fortement influencé par la technique culturale (voir figure N-1 en annexes).

Ces équations sont clairement montrées que le nombre d'épis/m<sup>2</sup> au niveau du travail conventionnel est beaucoup plus élevé que dans le semis direct et cela quelques soit la dose de semis.

La comparaison entre les coefficients de ces deux équations montre que, l'effet de la dose est évident, la deuxième dose permet un meilleur peuplement épis/m<sup>2</sup>.

Ces résultats permettent de dire que la structure du sol est un facteur déterminant du peuplement épis/m<sup>2</sup>. Les parcelles qui présentent le meilleur développement racinaire, donc la meilleure porosité et résistance pénétrométrique favorable sont celles qui donnent un nombre d'épis par unité de surface important.

D'une manière générale, le peuplement épis par unité de surface ne dépend pas uniquement du pouvoir de tallage et de la densité de semis, mais aussi de développement du système racinaire et du type de la technique culturale appliquée.

#### 11.4.6. La corrélation entre Nbr grains/épi (TC) et Nbr grains/épi (SD) du blé

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable Nbr grains/épi(TC) avec la variable Nbr grains/épi (SD), a donné les relations suivantes :

$$\text{Nbr}_{\text{grains/épi}}\text{TCD1} = 8,724 + 0,862 * \text{Nbr}_{\text{grains/épi}}\text{SDD1} \text{ avec } r = 0,929 \text{ et } R^2 = 0,864$$

$$\text{Nbr}_{\text{grains/épi}}\text{TCD1} = 53,298 + 0,584 * \text{Nbr}_{\text{grains/épi}}\text{SDD1} \text{ avec } r = 0,907 \text{ et } R^2 = 0,822$$

Les coefficients de détermination  $R^2$  sont proches de 1, montrent que la relation entre Nbr gr/épi (TC) et Nbr gr/épi (SD) est fortement significative à un niveau de confiance de 95%. Les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0,907 indiquant une relation relativement forte entre les variables. Nous en concluons donc que le nombre de grains par épi est fortement influencé par la technique culturale (voir figure N-2 en annexes).

D'après ces équations nous remarquons que les parcelles travaillées avec la charrue à socs, présentent un plus grand nombre de grains par épi par rapport à celles non travaillées et quelques soit la dose de semis. Cet écart se traduit par le bon état de la plante dans les parcelles de travail du sol (porosité du sol idéal, meilleur développement racinaire). D'où l'importance de choisir correctement la technique à mettre en place et les différentes formes des pièces travaillantes.

Ces résultats affirment les études menées par (Abellaoui et al., 2010) précédemment, qui conclut 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.

#### 11.4.7. La corrélation entre PMG (TC) et PMG (SD) du blé

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable PMG (TC) avec la variable PMG (SD), a donné les relations suivantes :

$$\text{PMGTCD1} = 68,867 + 0,627 * \text{PMGSDD1} \text{ avec } r = -0,418 \text{ et } R^2 = 0,175$$

$$\text{PMGTCD2} = 54,912 - 0,182 * \text{PMG SDD2} \text{ avec } r = 0,918 \text{ et } R^2 = 0,842$$

Pour la première dose de semis et tenant compte de la valeur de  $p$  supérieure à 0,05, le modèle établi n'est pas statistiquement significatif.

Par contre, au niveau de la deuxième dose, le modèle établi montre que la relation entre PMG (TCD2) et PMG (SDD2) est fortement significative à un niveau de confiance de 95%. Le coefficient de détermination  $R^2 = 0,842$  montre que le modèle est expliqué à 84,2 %. Le coefficient de corrélation est égal à 0,918 indiquant une relation relativement forte entre les variables. Nous en concluons donc que le poids de mille grains est fortement influencé par la technique culturale (voir figure N-3 en annexes).

D'après cette équation, il apparaît que le poids de mille grains est meilleur pour les parcelles travaillées par rapport à celles non travaillées, cet écart peut s'expliquer par la bonne absorption de l'eau et des éléments

minéraux chez les plantes situées aux parcelles de travail conventionnel par rapport aux celles de semis direct. La bonne absorption dans la technique conventionnelle se fait grâce à la partie racinaire qui est bien développée par rapport aux parties racinaires de la plante située dans les parcelles menées en le semis direct.

Le poids de mille grains est un composant de rendement, il rentre dans la formule de calcul du rendement. Donc, l'écart enregistré entre la technique conventionnelle et le semis direct entraîne des conséquences importantes sur la valeur théorique des rendements. Ces derniers seraient donc meilleurs au niveau des parcelles travaillées conventionnellement.

#### 11.4.8. La corrélation entre $D_r$ (TC) et $D_r$ (SD)

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable  $D_r$  (TC) avec la variable  $D_r$  (SD), a donné les relations suivantes :

<b><u>Sorgho</u></b>	$D_r$ TC D1 = 1,161+1,480* $D_r$ SD D1 avec $r = 0,922$ et $R^2=0,850$
	$D_r$ TC D2 = 1,576+1,327* $D_r$ SD D2 avec $r = 0,822$ et $R^2=0,675$
<b><u>Blé</u></b>	$D_r$ TC D1 = 0,827+0,835* $D_r$ SD D1 avec $r = 0,839$ et $R^2=0,703$
	$D_r$ TC D2 = 0,990+0,850* $D_r$ SD D2 avec $r = 0,840$ et $R^2=0,705$
	<b><u>Coupe n°1</u></b>
	$D_r$ TCD1 = 0,578-0,373* $D_r$ SDD1 avec $r = -0,409$ et $R^2=0,167$
	$D_r$ TCD2 = 0,376+0,125* $D_r$ SDD2 avec $r = 0,430$ et $R^2=0,185$
	<b><u>Coupe n°2</u></b>
<b><u>Bersim</u></b>	$D_r$ TCD1 = 0,704+0,242* $D_r$ SDD1 avec $r = 0,548$ et $R^2=0,300$
	$D_r$ TCD2 = 0,705+0,290* $D_r$ SDD2 avec $r = -0,523$ et $R^2=0,273$

Pour la culture de sorgho, les coefficients de détermination montrent que la technique culturale a un effet certain sur le développement des racines. Nous constatons d'après cette formule et d'après l'étude faite précédemment, que le développement racinaire connaît un bon accroissement dans les parcelles menées en travail conventionnel par rapport aux parcelles menées en semis direct. Cela s'expliquerait par l'existence des conditions favorables au développement des racines citant la résistance pénétrométrique favorable et la porosité importante, contrairement au semis direct, les racines limitent leur développement en trouvant l'eau à leur disposition particulièrement en surface.

Ces relations montrent aussi que l'effet de la technique culturale sur la densité racinaire apparait plus clairement au niveau des parcelles semées à la dose 1, un coefficient de corrélation de **0,922** qui est supérieur comparativement aux parcelles semées à la dose 2 où il est de **0,822**. (voir figures O-1-2-3 en annexes).

Au niveau des parcelles de blé, le constat est le même, les coefficients de détermination montrent que la technique culturale a un effet certain sur le développement des racines. Les modèles établis sont relativement les mêmes pour les deux doses de semis, ceci peut se justifier par la disponibilité de l'eau et les éléments nutritifs autour de la plante et l'espacement entre les plantes

D'après ces équations, nous constatons aussi que la densité des racines est supérieure au niveau de la technique conventionnelle par rapport à la technique du semis direct.

Par contre, au niveau des parcelles de bersim, l'analyse de la variance n'a révélé aucune différence significative entre les deux techniques culturales étudiées. Donc, les modèles établis ne sont pas explicatifs. D'après les résultats des deux sites, on peut constater que la croissance des racines était meilleure dans les sols à texture limoneuse par rapport aux sols argileux, avec les mêmes techniques de préparation du sol.

#### 11.4.9. La corrélation entre RDT (TC) et RDT (SD)

L'analyse par régression linéaire, mettant en relation la variable RDT (TC) avec la variable RDT (SD), a donné les relations suivantes :

<b><u>Sorgho</u></b>	<p>RDT<sub>M.V</sub> TCD1 = 59,624+5,199* RDT<sub>M.V</sub> SDD1 avec r = <b>0,930</b> et R<sup>2</sup>=<b>0,864</b></p> <p>RDT<sub>M.V</sub> TCD2 = 75,437+4,292* RDT<sub>M.V</sub> SDD2 avec r = <b>0,948</b> et R<sup>2</sup>=<b>0,898</b></p>
<b><u>Blé</u></b>	<p>RDT<sub>M.V</sub> TCD1 = 97,077+0,866* RDT<sub>M.V</sub> SDD1 avec r = <b>0,994</b> et R<sup>2</sup>=<b>0,989</b></p> <p>RDT<sub>M.V</sub> TCD2 = 95,407+0,262* RDT<sub>M.V</sub> SDD2 avec r = <b>0,900</b> et R<sup>2</sup>=<b>0,810</b></p>
<b><u>Bersim</u></b>	<p><b><u>Coupe n°1</u></b></p> <p>RDT<sub>M.V</sub> TCD1 = 3,029+0,002* RDT<sub>M.V</sub> SDD1 avec r = <b>0,723</b> et R<sup>2</sup>=<b>0,522</b></p> <p>RDT<sub>M.V</sub> TCD2 = 3,427+0,001* RDT<sub>M.V</sub> SDD2 avec r = <b>0,710</b> et R<sup>2</sup>=<b>0,504</b></p> <p><b><u>Coupe n°2</u></b></p> <p>RDT<sub>M.V</sub> TCD1 = -9,604+0,399* RDT<sub>M.V</sub> SDD1 avec r = <b>0,908</b> et R<sup>2</sup>=<b>0,824</b></p> <p>RDT<sub>M.V</sub> TCD2 = -5,436+0,391* RDT<sub>M.V</sub> SDD2 avec r = <b>0,900</b> et R<sup>2</sup>=<b>0,864</b></p>

D'après ces résultats de corrélation, il apparaît clairement que la technique culturale a un effet certain sur le rendement des cultures.

Sur les parcelles de sorgho et blé, les modèles établis confirment clairement les résultats obtenus précédemment. Les parcelles labourées présentent un rendement supérieur par rapport au semis direct et cela quelle que soit la dose de semis (voir figures P-1-2-3 en annexes).

Cette différence peut s'expliquer par la bonne absorption de l'eau et des éléments minéraux chez les plantes situées aux parcelles menées par la technique conventionnelle, la bonne absorption se fait grâce à la partie racinaire qui est bien développée au niveau des parcelles de travail conventionnel par rapport aux parties racinaires des plantes situées dans les parcelles de semis direct d'une part et la disponibilité de l'eau et des éléments minéraux autour des plantes et la bonne porosité et résistance pénétrométrique d'autre part.

Ces relations montrent aussi que l'effet de la technique culturale sur le rendement apparaît plus clairement au niveau des parcelles semées à la dose 2, avec des coefficients de corrélation supérieurs aux coefficients des parcelles semées avec la dose 1.

Cependant, au niveau de bersim, les modèles établis indiquent que l'effet de la technique culturale sur le rendement apparaît au niveau de la 2<sup>ème</sup> coupe, car les modèles obtenus au niveau de la 1<sup>ère</sup> coupe ne sont pas explicatifs et elle est considérée comme coupe de nettoyage.

D'après les résultats obtenus précédemment et les équations de la 2<sup>ème</sup> coupe, nous concluons que les meilleurs rendements sont enregistrés au niveau des parcelles de la technique du semis direct, cela peut être dû à l'humidité du sol qui est plus élevée et qui favorise la croissance des plants surtout au stade critique. Donc le choix de la technique à mettre en place est très important.

Ces résultats s'expliqueraient donc par l'effet des techniques culturales sur les propriétés physiques du sol et leurs effets sur le développement racinaire ; ce qui s'est probablement répercuté sur les rendements obtenus.

## 11.5. Analyse de l'interaction entre les propriétés du sol, la densité racinaire et le rendement.

### 11.5.1. Effet combiné de la résistance pénétrométrique, l'humidité et la porosité sur la densité racinaire

L'analyse par régression multiple, mettant en relation la variable dépendante  $D_r$  avec les variables indépendantes  $H$  (%),  $P$  (%) et  $R_p$  (daN/cm<sup>2</sup>), a donné les relations suivantes :

- **Sorgho**

#### Technique conventionnelle

---


$$D_r \text{TCD1} = 32,80 - 3,812 * H \text{ (TC)} + 1,686 * P \text{ (TC)} - 4,161 * R_p \text{ (TC)} \text{ avec } R^2 = 0,879$$

$$D_r \text{TCD2} = 38,72 - 3,000 * H \text{ (TC)} + 1,165 * P \text{ (TC)} - 5,306 * R_p \text{ (TC)} \text{ avec } R^2 = 0,970$$


---

---

### Semis direct

---

$$D_r SDD1 = 87,77 - 1,680 * H (SD) + 1,628 * P (SD) - 5,861 * R_p (SD) \text{ avec } R^2 = 0,915$$

$$D_r SDD2 = 89,70 - 1,022 * H (SD) + 1,000 * P (SD) - 3,151 * R_p (SD) \text{ avec } R^2 = 0,813$$


---

Ces modèles permettent de dire que l'effet de la résistance pénétrométrique est plus important que celui de l'humidité du sol qui est lui-même plus important que l'effet de la porosité du sol sur la densité racinaire.

Les coefficients de corrélations nous indiquent que le paramètre densité racinaire est très lié à l'état du sol, le nombre et l'épaississement des racines du sorgho sont proportionnels à l'augmentation de la porosité et inversement proportionnels à l'augmentation du taux d'humidité et de la résistance pénétrométrique.

A noté aussi que, au niveau de la technique de semis direct, l'humidité et la porosité ont pratiquement le même effet sur la densité racinaire.

D'après ces relations, nous pourra déduire que la résistance pénétrométrique est un paramètre déterminant de la densité racinaire, il agit sur la capacité de pénétration des racines dans le sol.

- **Blé dur**

### Technique conventionnelle

---


$$D_r TC D1 = -1,241 + 0,111 * H (TC) - 1,020 * P (TC) + 3,023 * R_p (TC) \text{ avec } R^2 = 0,994$$

$$D_r TC D2 = -3,394 + 0,424 * H (TC) - 1,009 * P (TC) + 4,148 * R_p (TC) \text{ avec } R^2 = 0,966$$


---

### Semis direct

---


$$D_r SD D1 = 3,149 - 0,041 * H (SD) + 1,931 * P (SD) - 4,649 * R_p (SD) \text{ avec } R^2 = 0,994$$

$$D_r SD D2 = 4,259 - 0,046 * H (SD) + 1,966 * P (SD) - 5,517 * R_p (SD) \text{ avec } R^2 = 0,882$$


---

Les coefficients de corrélations nous indiquent que le paramètre densité racinaire est très lié à l'état du sol. L'effet de la résistance pénétrométrique est plus important que celui de la porosité du sol et de l'humidité du sol sur la densité racinaire.

Au niveau de la technique conventionnelle, le nombre et l'épaississement des racines sont proportionnels à l'augmentation de la résistance pénétrométrique et à l'humidité et inversement proportionnel à l'augmentation de la porosité du sol.

Par contre, au niveau de semis direct, la densité racinaire est proportionnels à l'augmentation de la porosité du sol et inversement proportionnel à l'augmentation de la résistance pénétrométrique et à l'humidité.

En effet, ces résultats ont montré que la technique culturale a un effet certain sur les propriétés du sol et par conséquent sur le développement du système racinaire.

- **Bersim**

---

**Technique conventionnelle**

---

**Coupe n°1**

$$D_r \text{ TC D1} = 2,768 - 0,051 * H \text{ (TC)} + 1,823 * P \text{ (TC)} - 1,026 * R_p \text{ (TC)} \text{ avec } R^2 = 0,865$$

$$D_r \text{ TC D2} = 2,212 - 0,056 * H \text{ (TC)} + 1,818 * P \text{ (TC)} - 1,008 * R_p \text{ (TC)} \text{ avec } R^2 = 0,958$$

**Coupe n°2**

$$D_r \text{ TC D1} = 1,901 - 0,023 * H \text{ (TC)} + 1,587 * P \text{ (TC)} - 1,922 * R_p \text{ (TC)} \text{ avec } R^2 = 0,943$$

$$D_r \text{ TC D2} = 1,996 - 0,029 * H \text{ (TC)} + 1,082 * P \text{ (TC)} - 1,720 * R_p \text{ (TC)} \text{ avec } R^2 = 0,910$$

---

**Semis direct**

---

**Coupe n°1**

$$D_r \text{ SD D1} = 3,873 + 0,015 * H \text{ (SD)} - 2,005 * P \text{ (SD)} + 1,901 * R_p \text{ (SD)} \text{ avec } R^2 = 0,981$$

$$D_r \text{ SD D2} = 3,491 + 0,019 * H \text{ (SD)} - 2,064 * P \text{ (SD)} + 1,899 * R_p \text{ (SD)} \text{ avec } R^2 = 0,909$$

**Coupe n°2**

$$D_r \text{ SD D1} = 6,237 - 0,313 * H \text{ (SD)} + 0,984 * P \text{ (SD)} - 1,524 * R_p \text{ (SD)} \text{ avec } R^2 = 0,916$$

$$D_r \text{ SD D2} = 9,348 - 0,544 * H \text{ (SD)} + 0,716 * P \text{ (SD)} - 1,352 * R_p \text{ (SD)} \text{ avec } R^2 = 0,997$$

L'ensemble des modèles indiquent que le paramètre densité racinaire est très lié à l'état du sol.

Pour la 1<sup>ère</sup> coupe, L'effet de la porosité du sol est plus important que celui de la résistance pénétrométrique qui est lui-même plus important que l'effet de l'humidité du sol sur la densité racinaire et ce au niveau des deux techniques et deux doses de semis.

Les coefficients de corrélations nous indiquent que la densité racinaire des parcelles travaillées conventionnellement est proportionnels à l'augmentation de la porosité et inversement proportionnels à l'augmentation du taux d'humidité et de la résistance pénétrométrique. Mais le constat est inversé pour le semis direct, la densité racinaire est inversement proportionnel à l'augmentation de la porosité et proportionnels à l'augmentation du taux d'humidité et de la résistance pénétrométrique.

Par contre, au niveau de la 2<sup>ème</sup> coupe, L'effet de la résistance pénétrométrique est plus important que celui de la porosité du sol qui est lui-même plus important que l'effet de l'humidité du sol sur la densité racinaire et ce au niveau des deux techniques et deux doses de semis.

Concernant les coefficients de corrélations, le constat est le même que la 1<sup>ère</sup> coupe. Donc, nous concluons que, la technique culturale a un effet certain sur les propriétés du sol et par conséquent sur le développement du système racinaire.

L'étude menée par **Harrad (2003)**, concernant la modélisation du développement racinaire montre que de tous les facteurs étudiés ; la résistance à la pénétration est le facteur le plus influant de la propagation des racines dans le sol.

### 11.5.2. Effet combiné de l'humidité, la porosité et la résistance pénétrométrique sur le rendement

L'analyse par régression multiple, mettant en relation la variable dépendante RDT avec les variables indépendantes H (%), P (%) et Rp (daN/cm<sup>2</sup>), a donné les relations suivantes :

- **Sorgho**

#### Technique conventionnelle

---


$$RDT_{M.V}(TCD1) = 38,72 - 1,828 * H(TC) + 2,166 * P(TC) - 2,306 * Rp(TC) \text{ avec } R^2 = 0,907$$

$$RDT_{M.V}(TCD2) = 38,25 - 1,713 * H(TC) + 2,713 * P(TC) - 3,716 * Rp(TC) \text{ avec } R^2 = 0,943$$

---

#### Semis direct

---


$$RDT_{M.V}(SDD1) = -15,99 + 3,770 * H(SD) - 4,412 * P(SD) + 8,639 * Rp(SD) \text{ avec } R^2 = 0,937$$

$$RDT_{M.V}(SDD2) = -17,713 + 3,713 * H(SD) - 4,518 * P(SD) + 8,608 * Rp(SD) \text{ avec } R^2 = 0,972$$


---

Pour un intervalle de confiance de 95 %, l'ensemble des modèles sont fortement significatif. Les coefficients de détermination sont proches de 1, indiquent que le rendement est fortement influencé par l'humidité la porosité du sol et la résistance pénétrométrique.

Ces modèles permettent de dire que l'effet de la résistance pénétrométrique est plus important que celui de la porosité du sol qui est lui-même plus important que l'effet de l'humidité du sol sur le rendement en matière vert.

Les coefficients de ces trois paramètres nous indiquent que le rendement en matière vert est très lié à l'état du sol, au niveau de la technique conventionnelle, le rendement est proportionnel à l'augmentation de la porosité et inversement proportionnels à l'augmentation du taux d'humidité et de la résistance pénétrométrique.

Par contre, au semis direct, le rendement est inversement proportionnel à l'augmentation de la porosité et proportionnels à l'augmentation du taux d'humidité et de la résistance pénétrométrique.

- **Blé dur**

#### **Technique conventionnelle**

---


$$\text{RDT (TCD1)} = 68,410 - 4,419 * H(\text{TC}) + 1,183 * P(\text{TC}) - 7,389 * R_p(\text{TC}) \text{ avec } R^2 = 0,930$$

$$\text{RDT (TCD2)} = -23,953 - 5,001 * H(\text{TC}) + 1,448 * P(\text{TC}) - 9,388 * R_p(\text{TC}) \text{ avec } R^2 = 0,998$$

---

#### **Semis direct**

---


$$\text{RDT (SDD1)} = 76,909 + 4,492 * H(\text{SD}) - 8,001 * P(\text{SD}) + 12,880 * R_p(\text{SD}) \text{ avec } R^2 = 0,898$$

$$\text{RDT (SDD2)} = 55,396 + 4,001 * H(\text{SD}) - 8,358 * P(\text{SD}) + 11,981 * R_p(\text{SD}) \text{ avec } R^2 = 0,947$$


---

Pour un intervalle de confiance de 95 %, l'ensemble des modèles sont fortement significatif. Les coefficients de détermination sont proches de 1, indiquent que le rendement est fortement influencé par l'humidité la porosité du sol et la résistance pénétrométrique.

Les coefficients de ces trois paramètres nous indiquent que le rendement est très lié à l'état du sol, au niveau de la technique conventionnelle, l'effet de la résistance pénétrométrique est plus important que celui de l'humidité du sol qui est lui-même plus important que l'effet de la porosité du sol. Ainsi que, le rendement est proportionnel à l'augmentation de la porosité et inversement proportionnels à l'augmentation du taux d'humidité et de la résistance pénétrométrique.

Par contre, au semis direct, l'effet de la résistance pénétrométrique est plus important que celui de la porosité du sol qui est lui-même plus important que l'effet de l'humidité du sol sur le rendement.

- **Bersim**

---

**Technique conventionnelle**


---

**Coupe n°1**

$$RDT_{M.V}(TCD1) = 2,20 - 1,258 * H(TC) + 0,013 * P(TC) - 0,960 * Rp(TC) \text{ avec } R^2 = 0,991$$

$$RDT_{M.V}(TCD2) = 1,48 - 1,129 * H(TC) + 0,032 * P(TC) - 0,954 * Rp(TC) \text{ avec } R^2 = 0,982$$

**Coupe n°2**

$$RDT_{M.V}(TCD1) = 2,42 - 2,002 * H(TC) + 1,024 * P(TC) - 2,145 * Rp(TC) \text{ avec } R^2 = 0,984$$

$$RDT_{M.V}(TCD2) = 4,00 - 2,029 * H(TC) + 1,073 * P(TC) - 2,158 * Rp(TC) \text{ avec } R^2 = 0,910$$


---

**Semis direct****Coupe n°1**

$$RDT_{M.V}(SDD1) = 1,19 + 0,605 * H(SD) - 1,044 * P(SD) + 2,256 * Rp(SD) \text{ avec } R^2 = 0,846$$

$$RDT_{M.V}(SDD2) = 3,71 + 0,523 * H(SD) - 1,513 * P(SD) + 1,934 * Rp(SD) \text{ avec } R^2 = 0,843$$

**Coupe n°2**

$$RDT_{M.V}(SDD1) = 4,57 + 2,041 * H(SD) - 2,152 * P(SD) + 5,201 * Rp(SD) \text{ avec } R^2 = 0,913$$

$$RDT_{M.V}(SDD2) = 5,07 + 3,305 * H(SD) - 3,045 * P(SD) + 8,214 * Rp(SD) \text{ avec } R^2 = 0,992$$

Pour un intervalle de confiance de 95 %, l'ensemble des modèles sont fortement significatif. Les coefficients de détermination sont proches de 1, indiquent que le rendement est fortement influencé par l'humidité la porosité du sol et la résistance pénétrométrique.

Pour la 1<sup>ère</sup> coupe et au niveau des parcelles travaillées, l'effet de l'humidité du sol est plus important que celui de la résistance pénétrométrique qui est lui-même plus important que l'effet de la porosité du sol sur le rendement.

En revanche, au niveau des parcelles non travaillées, l'effet de la résistance pénétrométrique est plus important que celui de l'humidité du sol qui est lui-même plus important que l'effet de la porosité du sol sur le rendement. Ainsi que, le rendement est inversement proportionnel à l'augmentation de la porosité et proportionnels à l'augmentation du taux d'humidité et de la résistance pénétrométrique.

Pour la 2<sup>ème</sup> coupe, l'effet de la résistance pénétrométrique est plus important que celui de l'humidité du sol qui est lui-même plus important que l'effet de la porosité du sol sur le rendement et ce au niveau des parcelles de la technique conventionnelle. L'augmentation de rendement est proportionnel à l'augmentation de la porosité et inversement proportionnels à l'augmentation du taux d'humidité et de la résistance pénétrométrique.

Au niveau des parcelles de semis direct, l'humidité et la porosité ont pratiquement le même effet sur le rendement.

## 11.6. Analyse de l'effet combiné de tous les paramètres sur le rendement

L'analyse par régression multiple, mettant en relation la variable RDT avec les variables (Rp, H, P, partie aérienne, partie souterraine); a donné les relations suivantes :

- **Sorgho**

### Technique conventionnelle

$$RDT_{M,V}(TCD1)=43,29-2,876*H( TC)+1,362*P( TC)-5,508*Rp( TC)+10,638*Dr(TCD1)+0,568*Nbr_{plants/m^2}( TCD1) +0,988* H_{tiges}(TCD1)+0,514* D_{tiges}(TCD1) \text{ avec } R^2= 0,950$$

$$RDT_{M,V}(TCD2)=30,56-4,669*H( TC)+1,153*P( TC)-8,717*Rp( TC)+13,35*Dr(TCD2)+0,530*Nbr_{plants/m^2}(TCD2)-0,898*H_{tiges}(TCD2)-1,889*D_{tige}(TCD2) \text{ avec } R^2= 0,996$$

### Semis direct

$$RDT_{M,V}(SDD2)=31,88+4,674*H( SD)-3,970*P( SD)+7,928*Rp(SD)+20,503*Dr(SDD1)-0,656*Nbr_{plants/m^2}(SDD1)-0,788*H_{tiges}(SDD1)-1,856 *D_{tige}(SDD1) \text{ avec } R^2= 0,973$$

$$RDT_{M,V}(SDD2)=23,95+8,890*H(SD)-6,362*P(SD)+15,451*Rp(SD)+28,543*Dr(SDD2)-0,007*Nbr_{plants/m^2}(SDD2) -1,497*H_{tiges}(SDD2) -1,415 D_{tige}(SDD2) \text{ avec } R^2= 0,993$$

Pour un intervalle de confiance de 95 %, l'ensemble des modèles sont fortement significatif. Les coefficients de détermination sont proches de 1, indiquent que le rendement est fortement influencé par l'ensemble des paramètres étudiés.

Au niveau de la technique conventionnelle, nous remarquons que le rendement en matière vert est très liés à l'état du sol et au développement des racines, l'augmentation du rendement en matière vert est proportionnel à l'augmentation de la porosité ; Nbr plants/m<sup>2</sup> ; et densité racinaire et inversement proportionnel à l'humidité ; résistance pénétrométrique, Hauteur et diamètre des tiges.

Pour le semis direct, l'augmentation du rendement en matière vert est proportionnel à l'augmentation du taux d'humidité; résistance pénétrométrique; et densité racinaire et inversement proportionnel à la porosité; Nbr plants/m<sup>2</sup>, Hauteur et diamètre des tiges.

Tenant compte des coefficients de ces équations et comparativement à la porosité, humidité ; résistance pénétrométrique ; hauteur des tiges ; diamètre des tiges et le nombre de pieds /m<sup>2</sup>, la densité racinaire est plus influente sur la quantité et la qualité du rendement en matière vert et ce au niveau des deux techniques (TC et SD).

La comparaison entre les deux modèles montre que l'effet combiné de l'ensemble des paramètres sur le rendement en matière vert est plus important au niveau des parcelles semée à la deuxième dose comparativement aux parcelles semée avec la première dose.

Ces résultats nous permettent de dire que l'augmentation du rendement de sorgho fourrager n'exige pas l'augmentation ou la diminution de la valeur ou le taux de certains paramètres liés au sol ou à la culture, mais exige des intervalles précis favorables au bon développement des deux parties de la plante qui seront aussi développées en équilibre quantitatif et qualitatif.

- **Blé dur**

#### Technique conventionnelle

---


$$\text{RDT(TCD1)} = 111,07 - 1,110 * \text{H(TC)} + 0,054 * \text{P(TC)} - 4,170 * \text{Rp(TC)} + 6,771 * \text{Dr(TCD1)} + 1,024 * \text{Nbr}_{\text{plants/m}^2}(\text{TCD1}) + 10,185 * \text{Nbr}_{\text{épis/m}^2}(\text{TCD1}) + 12,196 * \text{Nbr}_{\text{grains/épi}}(\text{TCD1}) + 18,458 * \text{PMG(TCD1)} \text{ avec } \mathbf{R^2 = 0,986}$$

$$\text{RDT(TCD2)} = 55,59 - 4,149 * \text{H(TC)} + 0,187 * \text{P(TC)} - 6,188 * \text{Rp(TC)} + 9,203 * \text{Dr(TCD2)} + 2,015 * \text{Nbr}_{\text{plants/m}^2}(\text{TCD2}) + 13,010 * \text{Nbr}_{\text{épis/m}^2}(\text{TCD2}) + 14,155 * \text{Nbr}_{\text{grains/épi}}(\text{TCD2}) + 20,511 * \text{PMG(TCD2)}$$

**avec  $R^2 = 0,991$**

---

#### Semis direct

---


$$\text{RDT(SDD1)} = 127,69 + 1,956 * \text{H(TC)} - 3,440 * \text{P(TC)} + 4,207 * \text{Rp(TC)} - 9,325 * \text{Dr(SDD1)} + 2,010 * \text{Nbr}_{\text{plants/m}^2}(\text{SDD1}) + 10,552 * \text{Nbr}_{\text{épis/m}^2}(\text{SDD1}) + 10,352 * \text{Nbr}_{\text{grains/épi}}(\text{SDD1}) + 11,771 * \text{PMG(SDD1)}$$

**avec  $R^2 = 0,995$**

$$\text{RDT(SDD2)} = 48,007 + 1,493 * \text{H(TC)} - 4,023 * \text{P(TC)} + 6,687 * \text{Rp(TC)} - 10,636 * \text{Dr(SDD2)} + 2,040 * \text{Nbr}_{\text{plants/m}^2}(\text{SDD2}) + 11,221 * \text{Nbr}_{\text{épis/m}^2}(\text{SDD2}) + 11,155 * \text{Nbr}_{\text{grains/épi}}(\text{SDD2}) + 15,824 * \text{PMG(SDD2)}$$

**avec  $R^2 = 0,998$**

---

Pour un intervalle de confiance de 95 %, l'ensemble des modèles sont fortement significatif. Les coefficients de détermination sont proches de 1, indiquent que le rendement est fortement influencé par l'ensemble des paramètres étudiés.

Tenant compte des coefficients de ces équations et comparativement à la porosité, humidité ; résistance pénétrométrique ; Nbr épis/m<sup>2</sup> ; Nbr grains/épi ; et le nombre de plants /m<sup>2</sup>, le poids de mille grains est plus influente sur la quantité et la qualité de rendement et ce au niveau des deux techniques (TC et SD).

La comparaison entre les deux doses, montre que l'effet combiné de l'ensemble des paramètres sur le rendement est plus important au niveau des parcelles semée à la deuxième dose.

A l'exception des composantes de rendement, la comparaison entre les paramètres montre que l'effet de la densité racinaire est plus important que celui de la résistance pénétrométrique qui est lui-même plus important que l'effet des autres paramètres (Porosité et humidité du sol ; Nbr plants/m<sup>2</sup>)

- **Bersim**

#### Technique conventionnelle

**Coupe n°1**

$$RDT_{M,V}(TCD1)=2,20-2,258*H(TC) +0,006*P(TC)-0,944*Rp (TC)+1,036*D_r (TCD1)-0,004*$$

$$Nbr_{plants/m^2} (TCD1) +0,538*H_{p.a}(TCD1) \text{ avec } R^2= \mathbf{0,994}$$

$$RDT_{M,V}(TCD2)= 2,68-3,353*H(TC)+0,002*P(TC)-1,189*Rp (TC)+1,413*D_r (TCD2)-0,005*$$

$$Nbr_{plants/m^2} (TCD2)+0,884*H_{p.a}(TCD2) \text{ avec } R^2= \mathbf{0,989}$$

**Coupe n°2**

$$RDT_{M,V}(TCD1)= 5,41-2,128*H(TC)+0,125*P(TC) -1,202*Rp (TC)+3,003*D_r (TCD1)-0,906*Nbr$$

$$plants/m^2(TCD1) +5,275*H_{p.a}(TCD1) \text{ avec } R^2= \mathbf{0,991}$$

$$RDT_{M,V}(TCD2)=5,50-3,107*H(TC)+0,150*P(TC)-2,201*Rp(TC)+5,023*D_r(TCD2)-1,912*Nbr$$

$$plants/m^2 TCD2 +8,564*H_{p.a}(TCD2) \text{ avec } R^2=\mathbf{0,998}$$

**Semis direct****Coupe n°1**

$$RDT_{M,V}(SDD1)= 3,20+0,101*H(SD) -0,929*P(SD) +1,154*Rp(SD) -3,133*D_r(SDD1)-0,701* Nbr$$

$$plants/m^2 (SDD1)+5,340*H_{p.a}(SDD1) \text{ avec } R^2= \mathbf{0,995}$$

$$RDT_{M,V}(SDD2)= 4,17+0,130*H(SD) -0,984*P(SD) +1,883*Rp (SD)-4,234*D_r(SDD2)-0,903* Nbr$$

$$plants/m^2 (SDD2)+6,335*H_{p.a}(SDD2) \text{ avec } R^2=\mathbf{0,985}$$

**Coupe n°2**

$$RDT_{M,V}(SDD1)= 4,62-2,122*H(SD) +2,104*P(SD) -1,302*Rp(SD) +8,274*D_r(SDD1)-0,320* Nbr$$

$$plants/m^2 (SDD1) +7,510*H_{p.a}(SDD1) \text{ avec } R^2= \mathbf{0,891}$$

$$RDT_{M,V}(SDD2)= 9,99-2,153*H(SD) +2,130*P(SD)-1,304*Rp (SD) +10,224*D_r(SDD2)-0,512*$$

$$Nbr_{plants/m^2} (SDD2) +9,505*H_{p.a}(SDD2) \text{ avec } R^2= \mathbf{0,995}$$

Pour un intervalle de confiance de 95 %, l'ensemble des modèles sont fortement significatif. Les coefficients de détermination sont proches de 1, indiquent que le rendement est fortement influencé par l'ensemble des paramètres étudiés.

Pour la 1 ère coupe et au niveau des parcelles travaillées, l'effet de l'humidité du sol est plus important que celui de la densité racinaire qui est lui-même plus important que l'effet des autres paramètres sur le rendement et ce au niveau de deux doses de semis.

Au niveau des parcelles non travaillées, l'effet de la hauteur de la partie aérienne est plus important que celui de la densité racinaire qui est lui-même plus important que l'effet des autres paramètres sur le rendement. Ainsi que, le rendement est inversement proportionnel à l'augmentation de la porosité ; la densité racinaire et le nombre de plants/m<sup>2</sup> et proportionnels à l'augmentation du taux d'humidité et de la résistance pénétrométrique et de la hauteur de la partie aérienne.

Pour la 2<sup>ème</sup> coupe, l'effet de la hauteur de la partie aérienne est plus important que celui de la densité racinaire qui est lui-même plus important que l'effet des autres paramètres sur le rendement et ce au niveau des parcelles de la technique conventionnelle. L'augmentation de rendement est proportionnel à l'augmentation de la porosité ; la densité racinaire et la hauteur de la partie aérienne et inversement proportionnels à l'augmentation du taux d'humidité et de la résistance pénétrométrique et le nombre de plants/m<sup>2</sup>.

Au niveau des parcelles de semis direct, l'effet de la densité racinaire est plus important que celui de la hauteur de la partie aérienne qui est lui-même plus important que l'effet des autres paramètres sur le rendement. Ainsi que, l'humidité et la porosité ont pratiquement le même effet sur le rendement.

A noté aussi que l'effet de ces variables sur le rendement apparaitre plus clairement au niveau des parcelles semées avec la deuxième dose de semis.

## Conclusion

Dans les conditions de nos essais et d'après les analyses de corrélation, nous concluons que :

- Les modèles proposés sont représentatifs et permettent de prévoir la valeur d'un paramètre avec une technique en connaissant celle de l'autre technique.
- Les résultats de trois essais (sorgho fourragère ; blé dur et bersim) confirment clairement que la technique culturale à un effet certain sur les propriétés du sol, le développement du système racinaire et le rendement des cultures.
- Les parcelles menées en travail conventionnel présentent un milieu favorable pour le bon développement des plantes (une bonne structure du sol ; une meilleur porosité ; une résistance pénétrométrique favorable et un meilleur développement racinaire).
- L'effet des variables sur le rendement apparaitre plus clairement au niveau des parcelles semées avec la deuxième dose de semis. Donc le choix de la dose de semis est très important pour l'obtention d'un bon rendement.
- Les racines se développent mieux dans un sol labouré. Donc, les choix en matière de travail du sol, au niveau de l'exploitation, doivent entre autre, tenir compte de l'effet qu'aura ou non le travail sur les racines, grâce auxquelles se fera l'alimentation en eau et en éléments minéraux durant tout le cycle de développement de la plante.
- Le rendement des cultures est étroitement lié aux conditions climatiques de la campagne, au type de sol et son état structural, aux techniques culturales appliquées, qui ont une influence profonde et certaine sur les propriétés physicomécaniques du sol et par conséquent sur la forme et le développement des racines.
- La résistance pénétrométrique du sol ; la densité racinaire et la hauteur de la partie aérienne ont un effet certain sur les rendements de deux cultures fourragères, le sorgho et le bersim.
- A l'exception des composantes de rendement, la résistance pénétrométrique du sol et la densité racinaire ont un effet certain sur le rendement de la culture du blé dur.

*Chapitre 12*  
*Modélisation du*  
*rendement des cultures*

## Chapitre 12 : Modélisation du rendement des cultures

### Introduction

Dans cette partie, il s'agit de proposer des modèles mathématiques pour chacune des techniques culturales appliquées pour le but de quantifier le rendement des cultures en relation avec la dose de semis, la densité racinaire, la résistance pénétrométrique et les facteurs liés à chaque culture étudiée.

Dans notre cas, et d'après la régression multiple faite précédemment ; les paramètres introduits dans les modèles sont comme suit :

- Pour les cultures fourragères : la résistance pénétrométrique du sol ( $R_p$ ) ; la densité racinaire ( $D_r$ ) ; la dose de semis ( $D_s$ ) et la hauteur de la partie aérienne ( $H$ ).
- Pour la culture du blé dur : la résistance pénétrométrique du sol ( $R_p$ ) ; la densité racinaire ( $D_r$ ) ; la dose de semis ( $D_s$ ) ; nombre de grains/m<sup>2</sup> ( $G_r$ ) et poids de mille grains ( $PMG$ ).

Pour déterminer ces modèles, la méthode utilisée comporte les étapes suivantes :

- ✓ Mise en équation des différents paramètres introduits dans le modèle.
- ✓ Etablissement d'un tableau des caractéristiques (liste des paramètres, notation, unités, et dimensions).
- ✓ Déterminer le nombre de **p** termes (ces des termes sont sans dimensions)
- ✓ Application de la loi de **Kusewsky** qui dit :
  - « Toute variable dépendante peut-être quantifiée par le produit des puissances des variables indépendantes qui influent la variable dépendante ».
- ✓ Enfin une vérification des modèles est nécessaire.

### 12.1. Modélisation du rendement des cultures:

Les modèles mathématiques seront présentés comme suit :

- Pour les deux cultures fourragères, le sorgho et le bersim :

$$RDT = f(R_p; H; D_r; D_s)$$

- Pour la culture du blé dur :

$$RDT = f(R_p; PMG; G_r; D_r; D_s)$$

### 12.1.1. Caractéristique des modèles:

**Tableau 29** : Les différents paramètres utilisés pour établir les modèles

Paramètres	Notations	Unité (SI)	Dimension
Rendement	<b>RDT</b>	kg/m <sup>2</sup>	<b>ML<sup>-2</sup></b>
Résistance pénétrométrique	<b>Rp</b>	N/m <sup>2</sup>	<b>ML<sup>-1</sup>T<sup>-2</sup></b>
Densité des racines	<b>D<sub>r</sub></b>	kg/m <sup>3</sup>	<b>ML<sup>-3</sup></b>
Hauteur de la partie aérienne	<b>H</b>	m	<b>L</b>
Poids de mille grains	<b>PMG</b>	kg	<b>M</b>
Nombre de grains/m <sup>2</sup>	<b>G<sub>r</sub></b>	m <sup>-2</sup>	<b>L<sup>-2</sup></b>
Dose de semis	<b>D<sub>s</sub></b>	kg/m <sup>2</sup>	<b>ML<sup>-2</sup></b>
Accélération terrestre	<b>g</b>	m/s <sup>2</sup>	<b>LT<sup>-2</sup></b>

### 12.1.2. Nombre de p termes (théorème de Buckingham) :

L'utilisation du théorème de Buckingham illustrée par la relation ci-dessous permet de déterminer le nombre de Pi Termes :

$$i=n-m$$

Avec :

- n : nombre des grandeurs physiques.
- m : nombre des dimensions fondamentales.
- i : nombre de groupe adimensionnels nécessaires.

**Tableau 30**: Nombre de p termes pour chaque culture

Cultures	n	m	i
Sorgho et Bersim	5	3	2
Blé dur	6	3	3

- **Pour le Sorgho et Bersim**

- Premier Pi terme  $\pi_1$

$$\pi_1 = \frac{RDT}{D_s}$$

L'analyse dimensionnelle de ce Pi terme 1 est :

$$\pi_1 = \frac{[ML^{-2}]}{[ML^{-2}]} = 1$$

- Deuxième Pi terme  $\pi_2$

$$\pi_2 = \frac{Rp}{Dr * H * g}$$

L'analyse dimensionnelle de ce Pi terme 2 est :

$$\pi_2 = \frac{[ML^{-1}T^{-2}]}{[ML^{-3}] * [L] * [LT^{-2}]}$$

Ce qui donne :

$$\pi_2 = \frac{[ML^{-1}T^{-2}]}{[ML^{-1}T^{-2}]} = 1$$

Analyse dimensionnelle des Pi termes :

$$\pi_1 = \pi_2$$

Donc:

$$\frac{RDT}{Ds} = \frac{Rp}{Dr * H * g}$$

Nous pouvons donc écrire que le rendement en matière vert est déterminé par le modèle ci-dessous:

$$RDT = \frac{Rp * Ds}{Dr * H * g}$$

### 12.1.3. Vérification du modèle :

Pour vérifier la validité de modèles établis, nous réalisons une comparaison des valeurs obtenus à partir de l'équation trouvée et les valeurs obtenues expérimentalement, Les résultats sont représentés dans les tableaux ci-dessous :

**Tableau 31:** Tableau comparatif entre le rendement mesuré et le rendement calculé en fonction de la technique culturale pour la culture de sorgho (Voir les tableaux H-1-2 en annexes)

Technique conventionnelle			Semis direct		
rendement en MV mesuré (kg/m <sup>2</sup> )	rendement en MV calculé (kg/m <sup>2</sup> )	Rdt calculé / Rdt mesuré	rendement en MV mesuré (kg/m <sup>2</sup> )	rendement en MV calculé (kg/m <sup>2</sup> )	Rdt calculé / Rdt mesuré
6,99	269,81	<b>38,60</b>	4,93	532,10	<b>108,04</b>
7,45	260,56	<b>34,97</b>	5,20	543,78	<b>104,57</b>
6,71	233,58	<b>34,81</b>	4,03	516,51	<b>128,32</b>
7,71	233,69	<b>30,31</b>	4,24	725,37	<b>171,08</b>
7,43	262,03	<b>35,29</b>	4,80	635,40	<b>132,38</b>
7,03	219,52	<b>31,25</b>	4,75	524,44	<b>110,53</b>
7,59	305,67	<b>40,30</b>	4,53	515,45	<b>113,91</b>
7,84	251,64	<b>32,10</b>	5,00	530,36	<b>106,07</b>
8,06	213,46	<b>26,48</b>	4,85	813,07	<b>167,64</b>
9,59	280,86	<b>29,29</b>	6,16	628,06	<b>101,96</b>
8,51	240,80	<b>28,30</b>	6,68	732,07	<b>109,59</b>
9,32	290,63	<b>31,18</b>	6,58	632,04	<b>96,05</b>
10,56	288,10	<b>27,28</b>	7,10	713,18	<b>100,42</b>
9,56	317,41	<b>33,20</b>	6,52	778,73	<b>119,44</b>
9,76	310,62	<b>31,83</b>	6,95	744,71	<b>107,15</b>
9,48	299,14	<b>31,55</b>	6,43	683,46	<b>106,29</b>
10,89	254,21	<b>23,34</b>	6,11	927,20	<b>151,75</b>
10,10	220,50	<b>21,83</b>	6,09	828,43	<b>136,03</b>

**Tableau 32:** Tableau comparatif entre le rendement mesuré et le rendement calculé en fonction de la technique culturale pour la culture de bersim (Voir les tableaux H-3-4 en annexes)

Technique conventionnelle			Semis direct		
rendement en MV mesuré (kg/m <sup>2</sup> )	rendement en MV calculé (kg/m <sup>2</sup> )	Rdt calculé / Rdt mesuré	rendement en MV mesuré (kg/m <sup>2</sup> )	rendement en MV calculé (kg/m <sup>2</sup> )	Rdt calculé / Rdt mesuré
0,382	9578,58	<b>25095,83</b>	0,413	14141,24	<b>34243,62</b>
0,393	8206,47	<b>20902,87</b>	0,433	7716,37	<b>17828,96</b>
0,373	10576,74	<b>28368,05</b>	0,439	14766,63	<b>33664,58</b>
0,380	5340,53	<b>14061,43</b>	0,406	9557,38	<b>23561,23</b>
0,379	6743,66	<b>17812,11</b>	0,438	7352,91	<b>16799,74</b>
0,359	10221,77	<b>28457,04</b>	0,413	12029,67	<b>29099,34</b>
0,344	6904,75	<b>20043,98</b>	0,400	20649,12	<b>51566,08</b>
0,380	7008,82	<b>18428,75</b>	0,418	9014,35	<b>21557,19</b>
0,395	12006,50	<b>30417,76</b>	0,404	7057,35	<b>17472,16</b>
0,373	5324,49	<b>14261,00</b>	0,426	8004,51	<b>18802,30</b>
0,362	10924,12	<b>30157,13</b>	0,424	5991,25	<b>14138,30</b>
0,377	17878,60	<b>47438,45</b>	0,428	6590,48	<b>15391,13</b>
0,560	15105,37	<b>26950,77</b>	0,760	11699,07	<b>15384,61</b>
0,569	14928,35	<b>26252,72</b>	0,685	20318,73	<b>29667,57</b>
0,565	14649,60	<b>25919,32</b>	0,757	24333,72	<b>32139,85</b>

0,579	7638,01	<b>13200,85</b>	0,720	9491,09	<b>13189,40</b>
0,557	5317,56	<b>9553,65</b>	0,759	19956,22	<b>26302,49</b>
0,551	13401,73	<b>24320,79</b>	0,789	12193,67	<b>15447,54</b>
0,567	7001,25	<b>12348,75</b>	0,732	10149,03	<b>13869,34</b>
0,593	8312,99	<b>14010,97</b>	0,753	6267,79	<b>8325,53</b>
0,553	13317,22	<b>24093,97</b>	0,775	22482,84	<b>29001,13</b>
0,570	10531,18	<b>18475,75</b>	0,746	7674,71	<b>10281,75</b>
0,560	9557,24	<b>17067,72</b>	0,769	13333,99	<b>17342,99</b>
0,576	13041,98	<b>22651,76</b>	0,723	12340,99	<b>17076,70</b>

En comparant ces résultats ; en remarque un écart important entre les valeurs obtenues expérimentalement et les valeurs calculées à partir de l'équation. Donc on est loin de la réalité et on doit faire une correction. En effet, La détermination des coefficients de correction sont nécessaire.

#### 12.1.4. Correction des modèles

- **Pour le sorgho et le bersim**

Le coefficient de correction( $\alpha$ ) est la valeur moyenne des rapports des valeurs mesurées sur les valeurs calculées. Dans notre cas, nous avons inversé le coefficient de corrélation ( $\alpha$ ) pour avoir un modèle plus représentatif.

$$RDT = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{Rp \cdot Ds}{Dr \cdot H \cdot g}$$

En remplaçant g par 10 :

$$RDT = \frac{1 \cdot Rp \cdot Ds}{\alpha \cdot Dr \cdot H \cdot 10}$$

Nous pouvons donc écrire que le rendement est déterminé par le modèle ci-dessous :

$$RDT = \frac{Rp \cdot Ds}{10 \cdot \alpha \cdot Dr \cdot H}$$

Avec :

Cultures	Technique conventionnelle	Semis direct
Sorgho fourrager	$\alpha_{S(TC)} : 31,22$	$\alpha_{S(SD)} : 120,62$
Bersim	$\alpha_{B(TC)} : 22095,48$	$\alpha_{B(SD)} : 21756,40$

Dans les conditions de nos essais et d'après le modèle établi, nous remarquons que le rendement de cultures fourragères est très influencé par la dose de semis ; la résistance pénétrométrique ; la densité racinaire et la hauteur de la partie aérienne.

Nous remarquons aussi que les valeurs du coefficient confirment l'effet de la technique sur le rendement.

- **Pour le blé dur**

- **Premier Pi terme  $\pi_1$**

$$\pi_1 = \frac{RDT}{Ds}$$

L'analyse dimensionnelle de ce Pi terme 1 est :

$$\pi_1 = \frac{[ML^{-2}]}{[M \cdot L^{-2}]} = 1$$

- **Deuxième Pi terme  $\pi_2$**

$$\pi_2 = \frac{Rp}{Gr \cdot PMG \cdot g}$$

L'analyse dimensionnelle de ce Pi terme 2 est :

$$\pi_2 = \frac{[ML^{-1}T^{-2}]}{[L^{-2}] \cdot [M] \cdot [LT^{-2}]}$$

Ce qui donne :

$$\pi_2 = \frac{[ML^{-1}T^{-2}]}{[ML^{-1}T^{-2}]} = 1$$

- **Troisième Pi terme  $\pi_3$**

$$\pi_3 = \frac{PMG \cdot Dr^2}{Ds^3}$$

L'analyse dimensionnelle de ce Pi terme 3 est :

$$\pi_3 = \frac{[M] \cdot [ML^{-3}]^2}{[ML^{-2}]^3} = 1$$

Ce qui donne :

$$\pi_3 = \frac{[M^3L^{-6}]}{[M^3L^{-6}]} = 1$$

Le principe fondamental de la modélisation se base sur la loi de Kusewski qui est : Tout paramètre (variable dépendante) peut être quantifié par le produit des puissances des paramètres (variables indépendantes) qui y influent, ce qui donne :

$$\pi_1 = (\pi_2)^a \times (\pi_3)^b$$

Donc :

$$\frac{RDT}{Ds} = \left[ \frac{Rp}{Gr.PMG.g} \right]^a \times \left[ \frac{PMG.Dr^2}{Ds^3} \right]^b \times K$$

Le problème revient donc à déterminer les valeurs des exposants (puissance) a et b. Pour cela nous introduisons les logarithmes.

$$\ln \left[ \frac{RDT}{Ds} \right] = \ln \left[ \frac{Rp}{Gr.PMG.g} \right]^a \times \left[ \frac{PMG.Dr^2}{Ds^3} \right]^b \times K$$

Ce qui donne :

$$\ln \left[ \frac{RDT}{Ds} \right] = a. \ln \left[ \frac{Rp}{Gr.PMG.g} \right] + b. \ln \left[ \frac{PMG.Dr^2}{Ds^3} \right] + K \dots (1)$$

L'analyse par régression multiple, mettant en relation la variable  $\ln(\pi_1)$  avec les variables ( $\ln(\pi_2); \ln(\pi_3)$ ); a donné les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \text{TC} : \ln(\pi_1) &= 5,37 - 0,42.\ln(\pi_2) + 0,06.\ln(\pi_3) \\ \text{SD} : \ln(\pi_1) &= 5,35 - 0,36.\ln(\pi_2) + 0,02.\ln(\pi_3) \end{aligned}$$

Donc, les valeurs des exposants (puissance) a, b et Cste sont :

$a_{TC} = -0,42$  ;  $b_{TC} = 0,06$  et constante de régression  $Cste_{TC} = 5,37$  pour la technique conventionnelle.

$a_{SD} = -0,36$  ;  $b_{SD} = 0,02$  et constante de régression  $Cste_{SD} = 5,35$  pour le semis direct.

En remplaçant a, b et Cste dans le modèle (1) :

- Pour la technique conventionnelle :

$$\ln \left[ \frac{RDT_{TC}}{Ds} \right] = -0,42. \ln \left[ \frac{Rp}{Gr.PMG.g} \right] + 0,06. \ln \left[ \frac{PMG.Dr^2}{Ds^3} \right] + 5,37$$

Nous utilisons la fonction exponentielle pour enlever ln des deux cotés, ce qui donne :

$$RDT_{TC} = e^{5,37} \cdot Ds \cdot \left[ \frac{Rp}{Gr.PMG.g} \right]^{-0,42} \cdot \left[ \frac{PMG.Dr^2}{Ds^3} \right]^{0,06}$$

En simplifiant nous avons :

$$RDT_{TC} = e^{5,37} \cdot Ds \cdot \left[ \frac{Rp^{-0,42}}{(Gr.PMG.g)^{-0,42}} \right] \cdot \left[ \frac{(PMG.Dr^2)^{0,06}}{(Ds^3)^{0,06}} \right]$$

$$RDT_{TC} = \frac{e^{5,37} \cdot Ds \cdot Rp^{-0,42} \cdot PMG^{0,06} \cdot Dr^{0,12}}{Gr^{-0,42} \cdot PMG^{-0,42} \cdot g^{-0,42} \cdot Ds^{0,18}}$$

$$RDT_{TC} = \frac{e^{5,37} \cdot Rp^{-0,42} \cdot Dr^{0,12} \cdot PMG^{0,48} \cdot Ds^{0,82}}{Gr^{-0,42} \cdot g^{-0,42}}$$

$$RDT_{TC} = \frac{e^{5,37}}{g^{-0,42}} \cdot Rp^{-0,42} \cdot Dr^{0,12} \cdot PMG^{0,48} \cdot Ds^{0,82} \cdot Gr^{-0,42}$$

En remplaçant e par 2,71 et g par 10 :

$$RDT_{TC} = \frac{2,71^{5,37}}{10^{-0,42}} \cdot Rp^{-0,42} \cdot Dr^{0,12} \cdot PMG^{0,48} \cdot Ds^{0,82} \cdot Gr^{-0,42}$$

Nous pouvons donc écrire que le rendement du blé dur pour le travail conventionnel est déterminé par le modèle ci-dessous :

$$RDT_{TC} = 565,42 \cdot Rp^{-0,42} \cdot Dr^{0,12} \cdot PMG^{0,48} \cdot Ds^{0,82} \cdot Gr^{0,42}$$

- Pour le semis direct

$$\ln \left[ \frac{RDT_{SD}}{Ds} \right] = -0,36 \cdot \ln \left[ \frac{Rp}{Gr \cdot PMG \cdot g} \right] + 0,02 \cdot \ln \left[ \frac{PMG \cdot Dr^2}{Ds^3} \right] + 5,35$$

En simplifiant nous avons :

$$RDT_{SD} = e^{5,35} \cdot Ds \cdot \left[ \frac{Rp^{-0,36}}{(Gr \cdot PMG \cdot g)^{-0,36}} \right] \cdot \left[ \frac{(PMG \cdot Dr^2)^{0,02}}{(Ds^3)^{0,02}} \right]$$

$$RDT_{SD} = \frac{e^{5,35} \cdot Ds^{0,94} \cdot Rp^{-0,36} \cdot PMG^{0,38} \cdot Dr^{0,04}}{Gr^{-0,36} \cdot g^{-0,36}}$$

$$RDT_{SD} = \frac{e^{5,35}}{g^{-0,36}} \cdot Rp^{-0,36} \cdot Dr^{0,04} \cdot PMG^{0,38} \cdot Ds^{0,94} \cdot Gr^{0,36}$$

Nous pouvons donc écrire que le rendement du blé dur pour le semis direct est déterminé par le modèle ci-dessous :

$$RDT_{SD} = 482,47 \cdot Rp^{-0,36} \cdot Dr^{0,04} \cdot PMG^{0,38} \cdot Ds^{0,94} \cdot Gr^{0,36}$$

Les modèles établis indiquent que le rendement du blé dur est fortement influencé par les variables indépendantes.

Tenant compte des puissances de ces modèles, l'effet de la dose de semis est plus important que celui de la résistance pénétrométrique qui est lui-même plus important que l'effet de la densité racinaire sur le rendement.

Sachant que, le rendement est inversement proportionnel à l'augmentation de la résistance pénétrométrique, c'est-à-dire, l'augmentation de la résistance pénétrométrique du sol influence négativement sur le rendement.

Ces modèles montrent aussi que l'effet de variables indépendantes sur le rendement du blé dur est important au niveau des parcelles de travail conventionnel par rapport aux parcelles de semis direct.

Nous rappelons que ces modèles restent valables dans les conditions de nos essais. Dans d'autres conditions, les valeurs du coefficient de correction seront modifiées.

**Tableau 33:** Tableau comparatif entre le rendement mesuré et le rendement calculé en fonction de la technique culturale pour la culture du blé (Voir les tableaux H-5-6 en annexes)

Technique conventionnelle			Semis direct		
rendement en MV mesuré (kg/m <sup>2</sup> )	rendement en MV calculé (kg/m <sup>2</sup> )	Rdt mesuré / Rdt calculé	rendement en MV mesuré (kg/m <sup>2</sup> )	rendement en MV calculé (kg/m <sup>2</sup> )	Rdt mesuré / Rdt calculé
0,475	0,487	<b>0,98</b>	0,547	0,456	<b>1,20</b>
0,534	0,543	<b>0,98</b>	0,530	0,459	<b>1,15</b>
0,516	0,514	<b>1,00</b>	0,525	0,449	<b>1,17</b>
0,609	0,540	<b>1,13</b>	0,512	0,469	<b>1,09</b>
0,579	0,529	<b>1,09</b>	0,422	0,442	<b>0,96</b>
0,565	0,531	<b>1,06</b>	0,420	0,443	<b>0,95</b>
0,588	0,547	<b>1,07</b>	0,402	0,454	<b>0,88</b>
0,547	0,534	<b>1,03</b>	0,466	0,491	<b>0,95</b>
0,620	0,584	<b>1,06</b>	0,463	0,478	<b>0,97</b>
0,529	0,525	<b>1,01</b>	0,443	0,467	<b>0,95</b>
0,556	0,546	<b>1,02</b>	0,467	0,491	<b>0,95</b>
0,617	0,570	<b>1,08</b>	0,472	0,528	<b>0,89</b>
0,722	0,678	<b>1,07</b>	0,497	0,500	<b>0,99</b>
0,654	0,676	<b>0,97</b>	0,562	0,523	<b>1,07</b>
0,718	0,675	<b>1,06</b>	0,494	0,496	<b>1,00</b>
0,644	0,617	<b>1,04</b>	0,590	0,525	<b>1,12</b>
0,743	0,661	<b>1,12</b>	0,647	0,554	<b>1,17</b>
0,618	0,604	<b>1,02</b>	0,524	0,511	<b>1,02</b>
0,670	0,707	<b>0,95</b>	0,542	0,535	<b>1,01</b>
0,776	0,751	<b>1,03</b>	0,614	0,568	<b>1,08</b>
0,782	0,743	<b>1,05</b>	0,645	0,581	<b>1,11</b>
0,579	0,611	<b>0,95</b>	0,611	0,605	<b>1,01</b>
0,713	0,679	<b>1,05</b>	0,610	0,587	<b>1,04</b>
0,687	0,677	<b>1,02</b>	0,665	0,584	<b>1,14</b>

En comparant ces résultats ; on remarque que les valeurs obtenues expérimentalement et les valeurs calculées sont proches, et les coefficients de correction sont  $\leq 1$ , c'est-à-dire que les modèles établis pour les deux techniques culturales sont justes dans les conditions de nos essais.

## Conclusion

Afin de modéliser les observations faites précédemment, une analyse dimensionnelle a été effectuée pour quantifier les rendements de cultures en relation avec les différents paramètres étudiés. Cette analyse a permis d'établir les modèles suivantes :

- Pour les cultures fourragères (sorgho et bersim) :

$$RDT = \frac{Rp \cdot Ds}{10 \cdot \alpha \cdot Dr \cdot H}$$

Avec :

Cultures	Technique conventionnelle	Semis direct
Sorgho fourrager	$\alpha_{S(TC)} : 31,22$	$\alpha_{S(SD)} : 120,62$
Bersim	$\alpha_{B(TC)} : 22095,48$	$\alpha_{B(SD)} : 21756,40$

- Pour la culture du blé dur :

### ➤ Technique conventionnelle

$$RDT_{TC} = 565,42 \cdot Rp^{-0,42} \cdot Dr^{0,12} \cdot PMG^{0,48} \cdot Ds^{0,82} \cdot Gr^{0,42}$$

### ➤ Semis direct

$$RDT_{SD} = 482,47 \cdot Rp^{-0,36} \cdot Dr^{0,04} \cdot PMG^{0,38} \cdot Ds^{0,94} \cdot Gr^{0,36}$$

Les modèles proposés sont représentatifs et permettent de prévoir l'estimation du rendement en connaissant les valeurs de différents paramètres suivants : la dose de semis, la résistance pénétrométrique et la densité racinaire.

D'après les résultats trouvés précédemment, nous constatons que, pour estimer un rendement d'une culture, on doit tenir compte des conditions climatiques de la campagne, de la technique culturale appliquée, des caractéristiques physiques du sol plus particulièrement la résistance pénétrométrique du sol, de la densité de semis et en fin de la densité de la partie souterraine de la plante.

De façon générale ces modèles mettent en évidence, l'effet des deux techniques culturales sur l'état du sol et par conséquent sur le développement des racines et le rendement de cultures.

Nous devons cependant rappeler que ces modèles sont applicables dans les conditions propres à nos essais ; conditions sol-climat-plante.

# Analyse du comportement du sorgho fourrager hybride Sudan x Sorgho sous l'action de quatre techniques culturales

D. Bentahar<sup>1</sup>, M. Amara<sup>2</sup>, M. Bakel<sup>2</sup>

Comme le climat, les techniques de travail du sol évoluent sous l'effet du changement climatique. Quelle est la succession d'outils aratoires qui répond le mieux aux exigences de mise en place et au développement du sorgho fourrager dans la plaine de la Mitidja (Algérie) ?

## RÉSUMÉ

L'expérimentation a comparé 4 techniques de travail du sol (la technique conventionnelle et une technique simplifiée avec travail du sol à 30 cm de profondeur, le travail minimum et le semis direct) ; chaque fois, 2 densités de semis ont été appliquées (d1 : 25 kg/ha et d2 : 35 kg/ha). La résistance pénétrométrique du sol est plus faible avec les 2 premières techniques qui semblent également plus aptes à stocker l'eau. Le semis direct assure le meilleur taux de levée (85%), le plus faible étant réalisé avec le travail simplifié (67%). Les rendements sont significativement plus élevés en travail conventionnel, labouré (36,6 et 33,8 t MS/ha pour d1 et d2) et plus faibles avec le semis direct (respectivement 11,2 et 10,7 t MS/ha pour d1 et d2).

## SUMMARY

### Response of hybrid forage sorghum-sudangrass to four different cropping techniques

Which soil preparation technique allows for the best establishment and development of forage sorghum-sudangrass on the Mitidja Plain (Algeria)? Four soil preparation techniques were compared: the conventional technique (ploughing), a simplified technique where the soil was worked to a depth of 30 cm, minimal soil preparation, and direct seeding. In each case, two seed densities were used: 25 kg/ha (d1) and 35 kg/ha (d2). The penetration resistance of the soil was lower following the application of the first two techniques, which also appeared to increase water storage. Direct seeding led to the highest rate of seedling emergence (85%), while the lowest rate of seedling emergence was associated with the simplified technique. Significantly higher yields were obtained with the conventional technique (36.6 and 33.8 t DM/ha for d1 and d2, respectively). The lowest yields were associated with direct seeding (11.2 and 10.7 for d1 and d2, respectively).

La rareté et la diminution des ressources hydriques, suite à la sécheresse et à l'irrégularité des précipitations, constituent le problème majeur qui menace l'agriculture algérienne. Ce problème est accentué par l'utilisation par les agriculteurs de pratiques culturales inappropriées, notamment celles liées au travail du sol, à la gestion des résidus de récolte et des mauvaises herbes.

Avec le progrès des techniques agricoles, nous assistons actuellement à une importante évolution des techniques de travail du sol pour la mise en place des grandes cultures : le labour conventionnel est remplacé par une technique dite Travail Minimum ou Travail Sans

Labour (TSL) et, à la limite, par la technique du Semis Direct (SD). Ces techniques sont perçues comme des alternatives capables de réduire la dégradation du sol et la consommation d'énergie. Les résultats obtenus en région semi-aride par BEKKOUCHE (2012) et FERRAH (2014), ont montré que :

- la simplification du travail du sol réduit le rendement du blé par rapport à la méthode classique ;
- le taux d'enracinement est lié directement à la structure du sol et à ses propriétés physico-mécaniques, notamment l'humidité, la porosité et la résistance péné-

## AUTEURS

1 : Institut Technique des Grandes Cultures, El-Harrach

2 : Département de Génie Rural, ENSA - El-Harrach ; m.amara@ensa.dz

**MOTS CLÉS** : Algérie, dose de semis, eau du sol, production fourragère, semis direct, sorgho fourrager, sudangrass, technique culturale, travail du sol.

**KEY-WORDS** : Algeria, cultivation techniques, direct seeding, forage production, forage sorghum, seeding dose, soil tillering, soil water, sudangrass.

**RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE** : Bentahar D., Amara M., Bakel M. (2018) : «Analyse du comportement du sorgho fourrager hybride Sudan x Sorgho sous l'action de quatre techniques culturales», *Fourrages*, 236, 249-253.

métrique, elles-mêmes fonction de la technique culturale utilisée.

Sur le même site expérimental que BEKKOUCHE, ADLI et FEDDAL (2008) puis HAMANI (2013) ont étudié les différents paramètres du sol (humidité, porosité, résistance pénétrométrique) ; ils ont montré que les différents passages des outils aratoires, par leur action et par leur profondeur de travail, permettent une meilleure conservation de l'humidité et une augmentation de la porosité du sol comparativement au semis direct. La résistance pénétrométrique est inversement proportionnelle à la teneur en eau dans le sol et elle est plus importante avec le semis direct que sur les parcelles labourées. Divers travaux (BARTHELEMY *et al.*, 1989 ; IBEKWE *et al.*, 2002 ; BAKEL, 1999 ; AMARA, 2007) ont porté sur les effets des techniques culturales sur les rendements des céréales ; ils n'ont pas pris en compte les caractéristiques physico-mécaniques du sol et le développement de la culture pendant son cycle végétatif et n'ont pas mis en évidence un effet des techniques culturales.

Le rendement en fourrage d'une culture, dans un milieu donné, dépend pour une large part du nombre de pieds installés (MANICHON, 1977), c'est-à-dire des taux de germination et de levée par rapport à la densité de semis. Tous ces paramètres dépendent de l'état structural du sol et plus particulièrement de l'affinement du lit de semence et de son aération. En effet, la petite taille des graines nécessite un travail du sol soigné afin de préparer un lit de semence fin et bien émiétté. C'est pourquoi, un sol peu profond peut limiter le développement du sorgho.

L'expérience algérienne dans ces techniques de travail du sol est toute récente et concerne plus particulièrement le blé. Nos essais ont porté sur une culture fourragère importante pour l'Algérie, le sorgho, et étudié les effets de quatre techniques culturales : **quelle est la succession d'outils aratoires et la densité de semis qui répondent le mieux aux exigences du sorgho fourrager** pour l'obtention des meilleurs rendements ?

## 1. Matériel et méthodes

### ■ Localisation

L'étude a été réalisée durant la campagne agricole 2012/2013, sur la **station expérimentale de l'École Nationale Supérieure Agronomique (ENSA) d'El-Harrach** (Alger, 3°08' de longitude Est, 36°43' de latitude Nord). La station se trouve sur le plateau d'El-Harrach appartenant à la plaine de la Mitidja. Le climat est de type méditerranéen, étage bioclimatique subhumide, à hiver doux et humide, avec une pluviométrie moyenne de 600 mm, des gelées rares, l'alternance d'une saison sèche et d'une saison chaude et des risques de sirocco réduits. Le sol est argilo-limoneux, avec 46,5 % d'argile, 25,3 % de limon et 26,8 % de sable. L'état initial de la parcelle avant travail du sol se caractérise par une teneur pondérale en eau de 13 %, une teneur en matière organique faible (1,45 %) sur les dix premiers centimètres de profondeur et un pH alcalin (8,38).

### ■ Dispositif expérimental

Le sorgho fourrager est un **hybride F1 Sudan x Sorgho (*Sorghum sudanense*)**, d'origine du Pakistan, caractérisé par un pouvoir germinatif de 82,60 % et un poids de mille grains de 30,26 g (Laboratoire de génie rural de l'ENSA, 2013).

Le dispositif expérimental est de type bloc factoriel (split-plot) à deux facteurs étudiés qui sont randomisés. La totalité de la surface a été divisée en trois blocs, lesquels sont subdivisés en huit micro-parcelles de surfaces égales ; les quatre techniques culturales et les deux doses de semis sont pratiquées dans chaque bloc.

**Premier facteur : la technique de travail du sol**, à quatre niveaux :

- technique simplifiée (TS) : travail du sol à 15 cm de profondeur, à l'aide d'un cover-crop, suivi par un vibroculteur ;

- technique minimum (TM) : travail du sol à 30 cm de profondeur, sans retournement, à l'aide d'un cultivateur à dents rigides et socs de scarifiage (chisel), suivi par un vibroculteur (7 dents) ;

- technique conventionnelle (TC) : travail du sol avec retournement, à 30 cm de profondeur, à l'aide d'une charrue bisocs et d'un cover-crop (14 disques) ;

- semis direct (SD), après désherbage total (Roundup - glyphosate).

**Le deuxième facteur est la densité de semis** à deux niveaux : d1 (25 kg/ha) et d2 (35 kg/ha).

Pour TS, TM et TC, les opérations de travail du sol ont été exécutées fin mars 2013, dans des conditions d'humidité moyennes (13%). Pour les 4 techniques culturales, 70 kg/ha de N-P-K (15-15-15) ont été apportés comme engrais de fonds avant le semis et 21 unités d'engrais azoté (urée 46N) fractionnées en 2 apports (1/3 au semis et 2/3 au stade tallage). L'opération de semis a été effectuée le 4 avril 2013 à l'aide d'un semoir en ligne de type Agric PSM 30 pour TS, TM et TC, et avec un semoir Semeato de type SHM 11/13 pour le semis direct SD.

La lutte contre les adventices a été réalisée en deux temps : en pré-semis pour le semis direct, avec l'application de glyphosate à une concentration de 1 l/100 l d'eau ; le deuxième désherbage a été appliqué au stade début tallage par utilisation d'un herbicide sélectif (Damine) à la dose de 1 l/ha. Une seule coupe a été réalisée au stade fin épiaison, le 2 juillet 2013.

### ■ Paramètres et méthodes de mesure

Le sol est décrit par son **pH**, sa **granulométrie** (méthode à la pipette de Robinson) et son **taux de matière organique** (méthode Anne).

L'évolution de l'**humidité du sol**, réalisée sur toutes les micro-parcelles, est évaluée selon la méthode gravimétrique : les échantillons sont prélevés dans trois points de chaque micro-parcelle à l'aide d'une tarière sur une profondeur de

30 cm puis passés à l'étuve (105°C) pendant 24 heures. La teneur en eau du sol est obtenue à partir du rapport de variation des échantillons humides et secs selon la formule décrite par DUCHAUFFOUR (1997) :  $H\% = 100 (PF - PS) / PS$ . Les prélèvements ont été effectués au semis, aux stades montaison et épiaison de la culture.

L'effet indirect du travail du sol sur la racine de la culture est évalué par la **résistance à la pénétration** ( $R_p$ , en  $daN/cm^2$ ), qui est déterminée par un pénétromètre conçu par le Cemagref. Deux mesures ont été effectuées, aux stades montaison (mi-mai) et début épiaison (juin).

Les mesures effectuées sur la culture ont concerné :

- le **taux de levée** (%), déterminé par comptage du nombre de pieds levés par  $m^2$  à l'aide d'un cadre en bois mesurant 1 m de chaque côté ;

- le **nombre de talles par  $m^2$**  au stade fin montaison ; il sert à calculer le **coefficient de tallage** (K), qui est le rapport entre le nombre de talles/ $m^2$  et le nombre de pieds levés/ $m^2$  ;

- la **hauteur des tiges** (cm) au stade épiaison (à l'aide d'une règle plate) et leur **diamètre** (cm) au même stade (avec un pied à coulisse numérique) ;

- le **rendement en matière verte** (MV, en  $q/ha$ ) est évalué à partir de prélèvements de  $1m^2$  au stade épiaison (3 placettes par micro-parcelle soit 18 répétitions pour chaque technique culturale) ;

- le **rendement en matière sèche** (MS, en  $t/ha$ ) et les taux de matière sèche ont été déterminés après séchage de ces échantillons de  $1m^2$  de fourrage vert à l'étuve à 95°C pendant 3 jours.

L'analyse de la variance est effectuée en utilisant le logiciel StatBox 6.40. Les groupes homogènes ont été établis à l'aide du test de Bonferroni au seuil de signification de 5%.

## ■ Données climatiques de la campagne d'étude

Le cumul pluviométrique enregistré durant la période de l'essai (de novembre 2012 à juin 2013) était de 598 mm soit une moyenne mensuelle de 75 mm ; les mois de mars, avril et mai ont été les plus arrosés avec un maximum enregistré en avril 2013 (148 mm). Lors de la période de la mise

Stade de prélèvement	Technique de travail du sol			
	TS	TM	TC	SD
Avant le semis (3 avril 2013)	13,86 <sup>ns</sup>	12,55 <sup>ns</sup>	14,04 <sup>ns</sup>	14,06 <sup>ns</sup>
Stade montaison (5 mai 2013)	11,32 <sup>ns</sup>	12,08 <sup>ns</sup>	13,79 <sup>ns</sup>	12,08 <sup>ns</sup>
Stade épiaison (juin 2013)	9,07 <sup>ns</sup>	9,73 <sup>ns</sup>	10,46 <sup>ns</sup>	8,86 <sup>ns</sup>

ns : effet non significatif

TABLEAU 1 : Évolution du taux d'humidité (%) dans le sol cultivé avec du sorgho fourrager en fonction du travail du sol.

TABLE 1 : Effects of soil preparation technique on the humidity (%) of soils planted with forage sorghum-sudangrass based on soil preparation technique.

en place du sorgho (avril), les précipitations étaient suffisantes pour le bon développement végétatif de la culture. Quant à la somme des températures moyennes, elle a été de 122,8°C, le mois le plus chaud étant juin 2013 (22,9°C) (Station météorologique de l'ENSA).

## 2. Résultats et discussions

### ■ Effet des techniques sur l'état structural du sol

#### • Effet sur l'humidité du sol

L'analyse de variance n'a montré aucune différence significative entre les quatre modes de conduite pour les 3 dates de prélèvements effectués (tableau 1). Cela est probablement dû aux fortes précipitations enregistrées durant la période de prélèvement des échantillons et à la relative hétérogénéité du sol de la parcelle expérimentale (bien que le dispositif adopté ait été choisi pour maîtriser d'éventuelles sources de variation).

Selon DERPSCH (2005), en l'absence d'un couvert végétal, le semis direct aboutit à des résultats négatifs. Nos résultats montrent qu'au stade montaison, la technique conventionnelle permet une meilleure conservation de l'eau : le taux de l'humidité est de 13,79%. Pour les autres techniques, la valeur est légèrement inférieure et varie de 11,32 à 12,08%. Le même constat est observé au stade épiaison : le labour (TC) a emmagasiné plus d'eau, suivi par le travail minimum (TM), le travail simplifié (TS) et enfin le semis direct qui semble offrir les conditions d'humidité les plus défavorables. A ce sujet, MOREL (1989) et GRAS (1988), cités par BEN HASSINE *et al.* (2003), concluent que l'humidité du sol varie selon la texture et le taux de matière organique du sol.

#### • Effet sur la résistance pénétrométrique du sol

La résistance mécanique à la pénétration est l'une des propriétés les plus déterminantes de la croissance racinaire de la plante et de la résistance du sol aux outils de travail du sol (ADLI et FEDDAL, 2008). Nos résultats sont illustrés par la figure 1.

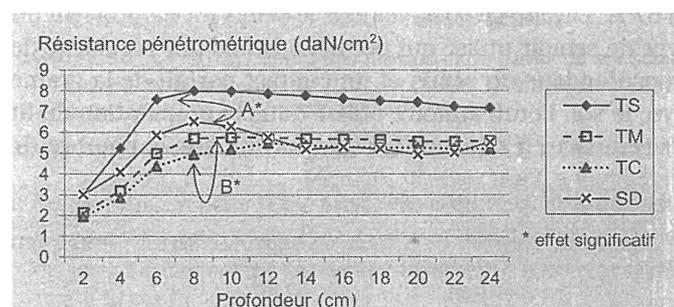


FIGURE 1 : Évolution de la résistance pénétrométrique avec la profondeur du sol au stade montaison du sorgho fourrager en fonction du travail du sol.

FIGURE 1 : Relationship between penetration resistance and soil depth during the growth of forage sorghum-sudangrass seedlings based on soil preparation technique.

Au stade montaison, la résistance mécanique à la pénétration du sol est en moyenne de 4,92 daN/cm<sup>2</sup> ; dans les parcelles travaillées TC et TM, elle est inférieure à la résistance enregistrée au niveau des parcelles réservées au semis direct et travail superficiel (cover-crop). L'analyse de variance a révélé une différence significative ( $p = 0,02$ ) entre les quatre techniques culturales avec deux groupes homogènes distincts : groupe A (TS, SD) et groupe B (TC, TM). Cette **diminution de la résistance des parcelles TC et TM** est due au travail profond de la charrue et du chisel, c'est-à-dire à l'effet de soulèvement de la terre pendant le travail du sol.

Ces résultats concordent avec plusieurs études comparant les résistances à la pénétration sur semis direct vs sol labouré (AFZALINIA et ZABIHI, 2014 ; TASER et METINOGLU, 2005). On peut en conclure que les racines se développent mieux dans les parcelles menées avec un travail conventionnel.

En revanche, nous n'avons pas noté d'effet significatif au stade épisaison, peut être en raison des fortes précipitations enregistrées fin mai - début juin (64 mm).

## ■ Effets des techniques sur les caractéristiques de la culture

**L'effet des techniques de travail du sol est très hautement significatif pour le nombre de plants levés** par unité de surface **et le rendement** en vert, hautement significatif pour le rendement en matière sèche et non significatif pour le nombre de talles par m<sup>2</sup>, la hauteur et le diamètre des tiges. L'effet de la dose de semis est très hautement significatif uniquement pour le nombre de plants levés/m<sup>2</sup>. **L'interaction technique culturale x dose de semis a un effet significatif pour le rendement** en vert et en matière sèche.

### • Taux de levée

Lors de l'installation du sorgho fourrager, les quatre techniques ont un effet très hautement significatif ( $p = 0,0001$ ) pour le nombre de plantes compté à la levée. L'étude révèle l'existence de **trois groupes homogènes** : i) avec le semis direct (SD), ii) avec le travail minimum et le système conventionnel et iii) avec les techniques culturales simplifiées (TS) ; les taux sont respectivement de 85, 75, 72 et 67%. L'avantage observé pour le semis direct provient du type de semoir utilisé qui permet à la fois une régularité de la profondeur du semis et un contact parfait de la graine avec le sol. L'outil aratoire utilisé dans la préparation du lit de semences a donc un effet important sur le nombre de

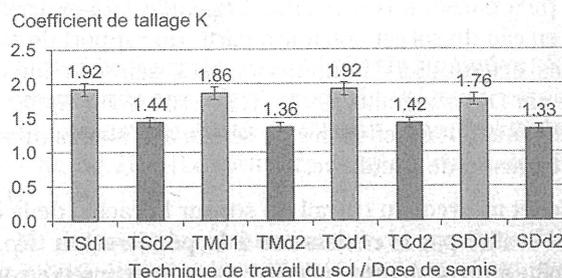


FIGURE 2 : Coefficient de tallage du sorgho fourrager selon le travail du sol et la dose de semis.

FIGURE 2 : Tiller ratio of forage sorghum-sudangrass based on soil preparation technique and seed density.

plantes/m<sup>2</sup>. Ces résultats sont confirmés par HANNACHI et FELLAHI (2010).

Le test de comparaison des moyennes montre que, quelle que soit la technique étudiée, c'est la dose de semis de 35 kg/ha (d2) qui a permis le meilleur peuplement à la levée. L'interaction technique culturale x dose de semis n'a dévoilé aucune différence pour cette variable.

### • Capacité de tallage

L'analyse de variance pour le nombre de talles par m<sup>2</sup> n'a montré aucune différence significative pour les facteurs étudiés (technique culturale et dose de semis) ainsi que leur interaction. Néanmoins, on observe figure 2 que le coefficient K est inversement proportionnel à la densité de peuplement. En effet, l'espacement supérieur entre les plants favorise le tallage ; TS présente un taux de levée assez faible, mais une bonne capacité de tallage contrairement au semis direct (SD). En 1999, BAKEL a relié le potentiel de tallage de l'hybride F1 Sudan x Sorgho (*Sorghum sudanense*) à l'augmentation du coefficient de tallage.

### • Hauteur et diamètre des tiges

Aucune différence significative n'est observée pour les facteurs étudiés (technique culturale, dose de semis et leur interaction) pour le diamètre et la hauteur des tiges au stade épisaison (tableau 2). Les meilleurs résultats sont obtenus avec les techniques TC et TM, vraisemblablement favorisées par une bonne exploitation de l'eau et des éléments nutritifs provenant d'un enracinement profond, contrairement aux techniques TS et SD qui présentent un état plus compact du sol.

Traitement	TSd1	TSd2	TMd1	TMd2	TCd1	TCd2	SDd1	SDd2
Hauteur des tiges (cm)	91,5 <sup>ns</sup>	80,4 <sup>ns</sup>	115,4 <sup>ns</sup>	110,3 <sup>ns</sup>	131,8 <sup>ns</sup>	136,2 <sup>ns</sup>	67,9 <sup>ns</sup>	62,9 <sup>ns</sup>
Diamètre des tiges (cm)	0,66 <sup>ns</sup>	0,62 <sup>ns</sup>	0,77 <sup>ns</sup>	0,70 <sup>ns</sup>	0,80 <sup>ns</sup>	0,81 <sup>ns</sup>	0,57 <sup>ns</sup>	0,55 <sup>ns</sup>

ns : effet non significatif

TABLEAU 2 : Hauteur des plantes et diamètre des tiges au stade épisaison du sorgho fourrager selon le travail du sol et la dose de semis.

TABLE 2 : Plant height and stem diameter at the heading stage based on soil preparation technique and seed density.

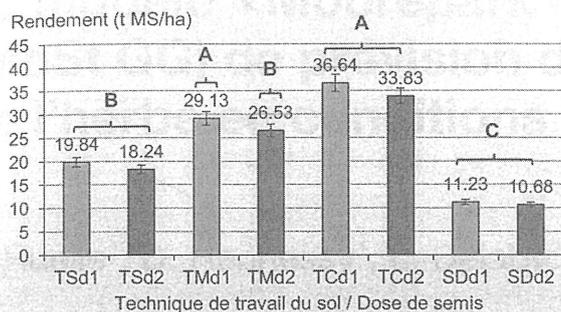


FIGURE 3 : Rendement en matière sèche du sorgho fourrager selon le travail du sol et la dose de semis.

FIGURE 3 : Dry matter yield of the forage sorghum-sudangrass based on soil preparation technique and seed density.

### • Estimation du rendement de la culture

Analyse de la variance du rendement en vert et en sec montre des différences très hautement significatives ( $p=0,0002$ ) entre les différentes techniques de culture employées et identifie trois groupes distincts (figure 3). La dose de semis n'a pratiquement pas d'effet pour ces variables.

L'interaction entre la technique et la dose de semis a un effet significatif ( $p=0,03$ ) (figure 3). En effet, **le traitement TCd1 a exprimé les plus hauts rendements** en vert et en sec (90,11 t/ha et 36,64 t MS/ha), **sui**vi de **TCd2** (87,22 t/ha et 33,83 t MS/ha) ; le traitement SDd2 a les plus faibles rendements avec seulement 39,0 t/ha en vert et 10,68 t MS/ha en sec. Cet écart **peut s'expliquer par la bonne absorption de l'eau et des éléments minéraux chez les plantes avec un travail conventionnel** par rapport à celles en semis direct. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus en Tunisie par M'HEDHBI (1995) et BOUHEJBA (1997). De même, une recherche réalisée en Suisse a montré qu'une culture de blé a subi une perte de rendement de 14% en travail réduit comparativement au travail conventionnel (BERNER *et al.*, 2008).

### Conclusion

Les résultats obtenus montrent que la technique culturale pour la mise en place d'une culture de sorgho a un effet sur les principaux paramètres physico-mécaniques du sol et par conséquent sur le développement de la culture. Nos travaux permettent de conclure que :

- la technique conventionnelle permet une meilleure conservation de l'eau par rapport aux autres techniques ;

- la résistance pénétrométrique est plus importante sur les parcelles en semis direct et en travail simplifié que sur les parcelles labourées ;

- en matière de levée du peuplement et indépendamment de la dose de semis, les taux de levée obtenus sont directement liés à la technique utilisée : le semis direct semble offrir le meilleur taux de levée par rapport aux autres techniques ;

- les meilleurs rendements sont enregistrés quand le sol est labouré.

Accepté pour publication,  
le 25 novembre 2018

### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADLI N., FEDDAL M.A. (2008) : *Analyse du comportement du sol sous l'action de différentes formes des pièces travaillantes des outils aratoires*, thèse Ing. ENSA, El Harrach-Alger.
- AFZALINIA S., ZABIHI J. (2014) : «Soil compaction variation during corn growing season under conservation tillage», *Soil and Tillage Research*, 137, 1-6.
- AMARA M. (2007) : *Contribution à la modélisation interface outils aratoires - sol. Optimisation de la forme et de l'effort de résistance à la traction des corps de charrue à socs et des outils à dents*, thèse de doctorat et d'état, I.N.A. El-Harrach.
- BAKEL M. (1999) : *Etude comparative de l'action des outils aratoires sur l'état structural d'un sol travaillé en vue de la mise en place de la culture du sorgho*, thèse. Ing. Agro. I.N.A., El-Harrach.
- BARTHELEMY P., BOISGONTIER D., LAJOUX P. (1989) : *Choisir les outils de semis*, éd. ITCF. (France).
- BEKKOUCHE O. (2012) : *Analyse de la résistance pénétrométrique du sol sous l'action de trois techniques de travail du sol*, thèse Ing. ENSA, El-Harrach - Alger.
- BEN HASSINE H., BEN SALEM M., BONIN G., BRAUDEAU E., ZIDI C. (2003) : «Réserve utile des sols du nord ouest tunisien - Evolution sous culture», *Etude et gestion des sols*, 10 (1), 19-34.
- BERNER A., HILDERMANN I., FLIESSBACH A., PFIFFNER L., NIGGLI U., MÄDER P. (2008) : «Crop yield and soil fertility response to reduced tillage under organique mangement», *Soil Tillage Res.*, 101, 1-2, 89-96.
- BOUHEJBA A. (1997) : *Etudes comparatives des effets des différents modes de travail du sol sous des conditions semi arides sur l'élaboration du rendement du blé tendre*, mémoire de fin d'étude du cycle spécialisation, INA Tunisie.
- DERPSCH R. (2005) : «The extent of the conservation agriculture worldwide. Implications and impacts», *Proc. 3<sup>rd</sup> World congress on conservation agriculture*, Nairobi (Kenya).
- DUCHAUFFOUR P.H. (1997) : *Abrégé de pédologie. Sol, végétation, environnement*, Masson, Paris, 921 p.
- FERRAH A.G. (2014) : *Effet de trois techniques culturales sur le développement de blé en zone semi-aride*, thèse Ing. de l'université Mouhamed Boudiaf, M'sila.
- HAMMANI A. (2013) : *Effet de trois techniques de mise en place d'une culture sur le développement des racines et conséquences sur le rendement*, thèse Ing. ENSA, El-harrach-Alger.
- HANNACHI, FELLAHI (2010) : *Effets des résidus et du travail du sol sur le comportement du blé dur (Triticum durum, Desf.) en zone semi-aride*, mémoire d'ing. UFAS, 58 p.
- IBEKWE A.M., KENNEDY A.C., FROHNE P.S., PAPIERNIK S.K., YANG C.H., CROWLEY D.E. (2002) : «Microbial diversity along a transect of agronomic zones», *FEMS Microbiology Ecology*, 39, 3, 183-191.
- MANICHON H. (1977) : *Structure du sol et profil cultural : répercussions sur le rendement des cultures, modifications sous l'action du climat et des outils*, I.N.A. Paris.
- M'HEDHBI K. (1995) : «Effet des outils de travail du sol et de semis sur le rendement des céréales cultivés en sec», *Actes 27<sup>e</sup> Journées nationales sur les acquis de la recherche agronomique, halieutique et vétérinaire en Tunisie*, vol. 1, 36-45.
- TASER O.F., METINOGLU F. (2005) : «Physical and mechanical properties of a clayey soil as affected by tillage systems for wheat growth», *Acta Agriculturae Scandinavica, B - Soil & Plant Science*, 55, 3, 186-191.

*Conclusion  
Générale*

## Conclusion générale

Les travaux expérimentaux, menés tout au long de notre travail, ont enrichi les connaissances scientifiques et techniques sur le fonctionnement, en climat méditerranéen, des nouvelles techniques culturales à savoir le semis direct. L'objectif de notre travail était d'analyser les effets du travail du sol et du semis direct sur l'évolution de l'état structural du sol, et conséquences sur le développement racinaire et le rendement de cultures. Et d'établir un modèle mathématique qui permet de quantifier le rendement des cultures en relation avec les paramètres physico-mécanique du sol et les différents facteurs liés aux cultures.

Ce travail porte essentiellement sur une analyse de l'évolution de la teneur en eau, de la porosité et de la résistance pénétrométrique du sol sous l'effet de deux techniques culturales à savoir le travail du sol classique et le semis direct pour la mise en place d'une culture blé dur qui rentre en rotation avec deux cultures fourragères (sorgho et bersim).

Les résultats obtenus ont été traité comme suit :

Une première observation pour faire ressortir les différents effets des deux techniques.

La deuxième partie de notre analyse est la partie statistique qui nous a permis de quantifier l'intensité des différents effets.

La troisième partie est une approche à la modélisation mathématique du rendement des cultures en relation avec les paramètres étudiés.

L'examen de l'ensemble des résultats portés sur l'effet des techniques culturales sur les propriétés du sol et conséquence sur le développement des racines et le rendement, permet de tirer les conclusions suivantes :

- Les résultats de l'humidité du sol sont similaires dans les essais menés en sorgho et blé dur, le semis direct semble permettre une meilleure rétention d'eau par rapport au travail conventionnel. Cette particularité du semis direct offre à la culture un meilleur comportement en situation de déficit hydrique notamment au stade de formation du grain, qui contribue dans l'élaboration d'une composante importante du rendement (poids des grains), contrairement aux essais menés en bersim, ou le travail conventionnel à un effet positif sur l'humidité du sol, ce qui s'explique par la facilité d'infiltration de l'eau dans le sol.

- Les résultats de la porosité du sol sont similaires dans les essais menés en sorgho et bersim, contrairement aux essais menés en blé dur, ou la porosité est pratiquement similaire pour les deux techniques, ce qui fait que sur les parcelles menées en semis direct, le sol est très riche en racines qui augmentent la porosité du sol avec un maintien de la structure. L'instabilité structurale du sol est aussi un facteur physique du sol à prendre en considération.

- Il y a un effet certain des passages des différents outils aratoires sur la résistance pénétrométrique du sol, la résistance mécanique est beaucoup plus élevée dans les sols menés en semis direct par rapport à ceux travaillés avec la méthode conventionnelle.

**Les techniques de préparation du sol modifient nettement le comportement du sol vis-à-vis de la conservation de l'eau, de la porosité et de la résistance pénétrométrique. Les techniques culturales ont un effet certain sur le développement des plantes.**

- Le semis direct permet une meilleure levée des cultures, ce qui s'explique à la non perturbation du sol, le semis est localisé, il permet donc un bon contact sol-graine, ajouter à cela l'humidité du sol qui est plus élevée et qui favorise la levée des plants. Contrairement au semis conventionnel qui possède une structure non stable, Cette dernière faciliterait l'évaporation d'une importante quantité d'eau qui est nécessaire pour la germination des graines. Ainsi que l'effet de la technique culturale sur le nombre de plants/m<sup>2</sup> est important au niveau des parcelles semées avec la deuxième dose comparativement à celle semées avec la première dose.

- Le semis direct permet une meilleure évolution de la hauteur de la tige du bersim, car il diminue l'effet de l'absence de pluie par la conservation de l'eau, ce qui nous confirme que la pluviométrie est un facteur primordial dans la croissance du bersim, plus particulièrement lors de la phase de son installation. Par contre, la croissance des plantes du sorgho est meilleure au niveau de soles travaillées par rapport à ceux menés en semis direct et cela quel que soit la dose de semis étudiée, et ces résultats confirment les études précédemment, qui affirment que le travail du sol améliore la structure du sol en créant un état du sol caractérisé par une porosité moyenne qui favorise l'infiltration et la circulation de l'eau et des éléments nutritifs pour le bon développement des cultures. On peut dire donc que les techniques culturales et les conditions de mise en place ont un effet sur la croissance de la partie aérienne de cultures fourragères.

- Les résultats relatifs au développement des racines montrent nettement que, sur l'ensemble des essais, les racines se développent mieux dans un sol labouré. Dans ces derniers 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, une application à long terme du semis direct peut se manifester par des couches superficielles du sol se réchauffant plus lentement et présentant une plus forte résistance à la pénétration des racines en comparaison avec des sols travaillés conventionnellement. Ceci peut donner lieu à un ensemble de conditions de croissance défavorables durant la période de développement des cultures au niveau du semis direct.

- Concernant l'influence des techniques sur le rendement et ses composantes, nos résultats montrent que, le rendement en vert et en sec du sorgho fourrager est nettement supérieur dans les parcelles travaillées ou on enregistre un rendement vert/sec atteignant en moyenne 97,52/50,35 t/ha dans les sols travaillés et semées à la dose de 35 kg/ha contre une moyenne de 65,13/28 t/ha pour le semis direct semées à la même dose, soit une différence de plus de 32,39/22,35 t/ha. Ces résultats s'expliqueraient par l'effet des techniques culturales sur les propriétés physiques du sol et leurs effets sur le développement racinaire ; ce qui s'est probablement répercuté sur les rendements estimés obtenus.

- Pour la culture du blé dur, le travail conventionnel semé à la dose de 180 kg/ha, représente le nombre d'épi par mètre carré le plus élevé avec une moyenne de 264.75 épis /m<sup>2</sup>, et aussi le poids de mille grains le plus élevé avec une moyenne de 47 g. En effet le rendement estimé varie de 56,13 à 69,23 q/ha pour la technique conventionnelle et il est de 47,24 à 58,35q/ha pour la technique du semis direct. La qualité des grains est donc meilleure au niveau des parcelles travaillées conventionnellement, qui présentent le meilleur développement racinaire, la meilleure porosité et résistance pénétrométrique favorable.

- Par contre, Les meilleurs rendements du bersim sont enregistrés au niveau de la deuxième coupe avec la technique du semis direct, cela peut être dû à l'humidité du sol qui est plus élevée et qui favorise la croissance des plants surtout au stade critique.

**Le rendement des cultures est étroitement lié aux conditions climatiques de la campagne, au type de sol et son état structural, aux techniques culturales appliquées, qui ont une influence profonde et certaine sur les propriétés physicomécaniques du sol et par conséquent sur la forme et le développement des racines.**

L'analyse par régression multiple, mettant en relation la variable RDT avec les variables (Rp, H, P, partie aérienne, partie souterraine); a donné les relations suivantes :

**- Pour le sorgho**

- $RDT_{M,V}(TCD1)=43,29-2,876*H(TC)+1,362*P(TC)-5,508 * Rp(TC) +10,638 *Dr(TCD1) +0,568 *Nbr_{plants/m^2}(TCD1) +0,988*H_{tiges}(TCD1)+0,514*D_{tiges}(TCD1).$
- $RDT_{M,V}(TCD2)=30,56-4,669*H(TC)+1,153*P(TC)-8,717*Rp(TC)+13,35*Dr(TCD2)+0,530*Nbr_{plants/m^2}(TCD2)-0,898*H_{tiges}(TCD2)-1,889*D_{tige}(TCD2).$
- $RDT_{M,V}(SDD2)=31,88+4,674*H(SD)-3,970*P(SD)+7,928*Rp(SD)+20,503*Dr(SDD1)-0,656*Nbr_{plants/m^2}(SDD1)-0,788*H_{tiges}(SDD1)-1,856 *D_{tige}(SDD1)$
- $RDT_{M,V}(SDD2)=23,95+8,890*H(SD)-6,362*P(SD)+15,451 *Rp(SD)+28,543*Dr(SDD2)-0,007*Nbr_{plants/m^2}(SDD2) -1,497*H_{tiges}(SDD2) -1,415 D_{tige}(SDD2).$

**-Pour le blé dur**

- $RDT(TCD1)=111,07-1,110*H(TC)+0,054*P(TC)-4,170*Rp(TC)+6,771 *Dr(TCD1) +1,024 *Nbr_{plants/m^2}(TCD1)+10,185*Nbr_{épis/m^2}(TCD1)+12,196*Nbr_{grains/épi}(TCD1)+18,45*PMG(TCD1)$
- $RDT(TCD2)=55,59-4,149*H(TC)+0,187*P(TC) - 6,188*Rp(TC)+9,203*Dr(TCD2)+2,015*Nbr_{plants/m^2}(TCD2)+13,010*Nbr_{épis/m^2}(TCD2)+14,155*Nbr_{grains/épi}(TCD2)+20,51*PMG(TCD2)$
- $RDT(SDD1)=127,69+1,956*H(TC) -3,440*P(TC) +4,207*Rp(TC) -9,325 *Dr(SDD1) +2,010 *Nbr_{plants/m^2}(SDD1)+10,552*Nbr_{épis/m^2}(SDD1)+10,35*Nbr_{grains/épi}(SDD1)+11,77* PMG(SDD1)$
- $RDT(SDD2)=48,007+1,493*H(TC) -4,023*P(TC) +6,687*Rp(TC) - 10,636*Dr(SDD2)+2,040*Nbr_{plants/m^2}(SDD2)+11,221*Nbr_{épis/m^2}(SDD2)+11,155*Nbr_{grains/épi}(SDD2)+15,824*PMG(SDD2)$

**-Pour le bersim (coupe n°2)**

- $RDT_{M,V}(TCD1)= 5,41-2,128*H(TC)+0,125*P(TC) - 1,202*Rp(TC)+3,003*Dr(TCD1)-0,906*Nbr_{plants/m^2}(TCD1) +5,275*H_{p.a}(TCD1).$
- $RDT_{M,V}(TCD2)=5,50-3,107*H(TC)+0,150*P(TC)-2,201*Rp(TC)+5,023*Dr(TCD2)-1,912*Nbr_{plants/m^2}(TCD2) +8,564*H_{p.a}(TCD2).$

- $RDT_{M.V}(SDD1) = 4,62 - 2,122 * H(SD) + 2,104 * P(SD) - 1,302 * Rp(SD) + 8,274 * D_r(SDD1) - 0,320 * Nbr_{plants/m^2}(SDD1) + 7,510 * H_{p.a}(SDD1)$ .
- $RDT_{M.V}(SDD2) = 9,99 - 2,153 * H(SD) + 2,130 * P(SD) - 1,304 * Rp(SD) + 10,224 * D_r(SDD2) - 0,512 * Nbr_{plants/m^2}(SDD2) + 9,505 * H_{p.a}(SDD2)$ .

Ces équations montrent clairement les effets des deux techniques et de la dose de semis sur les différents paramètres liés au sol et à la culture et par conséquent sur le rendement de cultures. Ces relations mettent aussi en évidence l'intensité des effets des différents paramètres sur le rendement de chaque culture étudiée.

Ces régressions permettent aussi de réduire le nombre de paramètres introduit dans les modèles. Dans notre cas ce sont comme suit : la résistance pénétrométrique du sol (Rp) ; la densité racinaire (Dr) ; la dose de semis (Ds) ; la hauteur de la partie aérienne (H) ; nombre de grains/m<sup>2</sup> (Gr) et poids de mille grains (PMG).

Afin de modéliser les observations faites précédemment, une analyse dimensionnelle a été effectuée pour quantifier les rendements de cultures en relation avec les différents paramètres étudiés. Cette analyse a permis d'établir les modèles suivantes :

- Pour les cultures fourragères (sorgho et bersim) :

$$RDT = \frac{Rp \cdot Ds}{10 \cdot \alpha \cdot Dr \cdot H}$$

Avec :

Cultures	Technique conventionnelle	Semis direct
Sorgho fourrager	$\alpha_{S(TC)} : 31,22$	$\alpha_{S(SD)} : 120,62$
Bersim	$\alpha_{B(TC)} : 22095,48$	$\alpha_{B(SD)} : 21756,40$

- Pour la culture du blé dur :

➤ **Technique conventionnelle**

$$RDT_{TC} = 565,42 \cdot Rp^{-0,42} \cdot Dr^{0,12} \cdot PMG^{0,48} \cdot Ds^{0,82} \cdot Gr^{0,42}$$

➤ **Semis direct**

$$RDT_{SD} = 482,47 \cdot Rp^{-0,36} \cdot Dr^{0,04} \cdot PMG^{0,38} \cdot Ds^{0,94} \cdot Gr^{0,36}$$

De façon générale ces modèles mettent en évidence, l'effet des deux techniques culturales sur l'état du sol et par conséquent sur le développement des racines et le rendement de cultures.

**Les modèles obtenues nous renseignent sur les prévisions du rendement de cultures en connaissent les valeurs de différents paramètres suivants : la dose de semis, la résistance pénétrométrique et la densité racinaire. Mais ces modèles restent valables uniquement dans les limites des conditions où les essais ont été réalisés.**

De façon générale, l'étude a été menée sur un court terme, ce qui diminue la pertinence des résultats vu qu'en semis direct il faut laisser le sol au moins cinq ans sans intervention mécanique pour voir ses avantages. Une étude sur dix ans par exemple aurait été souhaitée.

### **Perspectives**

Malgré les innovations techniques qui ont permis la réduction des coûts de production tout en augmentant le rendement, la réalisation d'études comparatives sur les différentes techniques culturales pour en choisir la plus rentable et la mieux adaptée aux caractéristiques pédoclimatiques demeure plus que nécessaire.

Concernant l'Algérie, l'introduction des techniques simplifiées serait favorable au niveau des régions sahariennes caractérisées par des sols sableux à texture très fragile, mais la maîtrise de la fertilisation et de la lutte chimique contre les mauvaises herbes est à prendre avec beaucoup de sérieux.

Dans le cadre de la maîtrise des mauvaises herbes surtout au niveau du semis direct, la recherche pourrait s'intéresser au pouvoir d'étouffement des plantes sur les adventices ou à la capacité de ces plantes à puiser les nitrates excédentaires du cycle cultural précédent. Il serait aussi nécessaire de faire une étude des effets environnementales des herbicides que ce soit sur les sols, l'eau superficiel ou sur la nappe est nécessaire.

Dans le même ordre d'idées, nous proposons d'entreprendre d'autres essais sur des différents types de sol et dans d'autres conditions de travail et d'utiliser plusieurs cultures afin de généraliser ces modèles. Ainsi que, il est indispensable de le compléter par une étude technico-économique adéquate.

Nous recommandons qu'il serait intéressant même nécessaire de renforcer les systèmes de la recherche agronomique en vue de couvrir l'ensemble des écosystèmes algériens. Les priorités peuvent être données aux recherches sur les systèmes de travail du sol dans tous ses aspects (techniques, fondamentaux, économiques, environnementaux...).

*Références*  
*Bibliographiques*

## Références bibliographiques

1. **Abbas K., A. Abdelguerfi. 2005.** Perspectives d'avenir de la jachère pâturée dans les zones céréalières semi-arides. *Fourrages* 184: 533-546.
2. **Abdelaziz M., 2009-** Essai de prévision de la valeur nutritive des feuilles et la pulpe d'arganier. Thèse Ing. Université Hassiba Ben Bouali Chlef. Algérie.
3. **Abdelguerfi A. et Laouar M., 2002.** Espèces fourragères et pastorales, leurs utilisations au Maghreb. FAO.
4. **Abdelguerfi A., Laouar M., M'Hammedi Bouzina M., 2008.** Les productions fourragères et pastorales en Algérie : Situation et Possibilités d'Amélioration. Revue Semestrielle 'Agriculture & développement'' (INVA, Alger), janvier 2008, n°6 : 14-25.
5. **Abdellaoui Z., Teskrat H., Belhaj A., Zaghouane O, (2011),** 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 : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 96, Zaragoza : CIHEAM / ATU-PAM / INRAA / ITGC / FERT.
6. **Acevedo, E., Harris, C.N., Cooper, P.J.M., 1991.** Crop architecture and water use efficiency in Mediterranean environments. In: Harris and al. (ed): soil and crop management for improved water use efficiency in rain fed areas. Icarda, pp: 9-20.
7. **Acevedo, E., Harris, C.N., Cooper, P.J.M., 1991.** Crop architecture and water use efficiency in Mediterranean environments. In: Harris and al. (ed): soil and crop management for improved water use efficiency in rain fed areas. Icarda, pp: 9-20.
8. **Adda A., 1996.** Contribution à l'étude des caractéristiques morphologiques,
9. **Adem R., Ferrah A. 2002.** Les ressources fourragères en Algérie. [ [www.gredaal.com](http://www.gredaal.com)]
10. **Adli N., Feddal M.A., 2008.** Analyse du comportement physico-mécanique du sol sous l'action des différentes pièces travaillantes des outils aratoires d'une chaîne. Thèse. Ing. Agr. ENSA. El-Harrach, Alger.
11. **Afzalnia et Zabihi, 2014.** Geoderma. Volumes 237–238, January 2014, Pages 60–70
12. **Al-Ouda A. 2010.** The role of improved regional practices in the implementation of conservation agriculture in arab countries. Actes du 4 eme rencontre méditerranéennes du semis direct. Setif, algerie, du 3 à 5 mai 2010 p, 59-67
13. **Amara M., 2007.** Contribution à la modélisation interface outils aratoires –sol optimisation de la forme et de l'effort de résistance à la traction des corps de charrue à socs et des outils à dents. Thèse de doctorat et d'état, I.N.A. El-Harrach.
14. **Amara M., Feddal M. A.; Hamani A., 2014.** 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, Pages 130 à 141.
15. **Anken T., Weiskopf P., Zihlmann U., Forrer H., Jansa J., Perhacova K., 2004.** Long term tillage system effects under moist cool conditions in Switzerland, Soil and tillage research 78 pp 171-183.
16. **Anonyme ,2005.** Filière mil/sorgho dans la zone CMA/AOC. [www.anancy.net/documents/file\\_fr/Mil%20%20Sorgho.doc](http://www.anancy.net/documents/file_fr/Mil%20%20Sorgho.doc)
17. **Anonyme, 2015.** Améliorer le sol grâce aux légumineuses, fiches pratiques. [http://www.gerbeaud.com/jardin/jardinage\\_naturel/enrichir-sol-azote-avec-culture-legumineuses.1281.html](http://www.gerbeaud.com/jardin/jardinage_naturel/enrichir-sol-azote-avec-culture-legumineuses.1281.html).
18. **Anonyme, 2016.** AGRO-PASTORALISME, fiches techniques des cultures. <https://sites.google.com/site/pastoraldz/fiches-techniques-des-cultures/cultures-fourrageres/bersim>

19. Anonyme, 2016. Semis direct en Algérie : premiers semoirs produits localement <https://agriculture-de-conservation.com/Semis-direct-en-Algerie-premiers-semoirs-produits-localement.html>
20. Arnon, I. 1972. *Crop Production in Dry Regions*. Vol. I. Leonard Hill, London. 650 p.
21. Attah K. Boame, 2005. Le semis direct : une pratique verte dans les fermes canadiennes. November 2005. Regards sur l'industrie agro-alimentaire et la communauté agricole. N° 21-004-XIF au catalogue.
22. Austin RB. 1998. Yield of Wheat in the United Kingdom: Recent Advances and Prospects. *Crop Science* 39 : 1604-1610.
23. Bakel M., Amara M., Zenikhri M., 2014. Influence des techniques culturales sur les facteurs de rendement du sorgho fourrager", ENSA, El-Harrach, Algérie.
24. Baker C.J., Saxton K.E., Ritchie W.R., Chamen W.C.T., Reicosky D.C., S Ribeiro M.F., Justice S.E. et Hobbs P.R. 2006. No-tillage Seeding in Conservation Agriculture (2nd edition).
25. Bakken, L., Njo, S. 1987. Effect of soil compaction by tractor traffic on soil structure, denitrification, and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Soil Science* 38: 541-552. In Destain M.-F., 2013. La compaction des sols agricoles en Wallonie. Guide de bonnes pratiques pour éviter la compaction des sols agricoles wallons. UNIVERSITE DE LIEGE (Gembloux Agro-Bio Tech). 54p.
26. Baldy, C., 1974. Contribution à l'étude fréquentielle des conditions climatiques et de leurs influences sur la production des principales zones céréalières d'Algérie. Versailles: *Inra, Département de bioclimatologie ; ministère de l'Agriculture*.
27. Barriuso E., Calvet R., Schiavon M., Soulas G., 1996 – Les pesticides et les polluants organiques des sols : transformations et dissipation. *Etude et Gestion des Sols*, 3, 4, p279-296
28. Barthélémy P., Boisgontier D et Lajoux P., 1987. Choisir les outils de travail du sol. Ed ITCF.france. 1987.
29. Barthélémy P., Boisgontier D et Lajoux P., 1992. Choisir les outils de semis. Ed ITCF.france. 1992. In Bensabti H.A.O.S, Zibani M.N., 2015. Modalisation du comportement du sol sous l'action de deux techniques culturales, effet sur le développement d'une culture de blé. Thèse de master, l'ENSA, Alger, 94p.
30. Baumont, R., Prache, S., Meuret, M. and Morand-fehr, P. (2000). How forage characteristics influence behaviour and intake in small ruminants: a review. *Livestock Production Science* 64 (1): 15-28.
31. Bedoussac L., 2009. Analyse du fonctionnement des performances des associations blé dur-pois d'hiver et blé dur-féverole d'hiver pour la conception d'itinéraires techniques adaptés à différents objectifs de production en systèmes bas-intrants. Thèse Doctorat en science agronomiques, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 147 p.
32. Bedrani S., 2004. L'alimentation de rue en Algérie : quelques réflexions sur la base d'une enquête visuelle rapide. Alger : Food and Agriculture Organisation (FAO).
33. Bekkouche O., 2012. Analyse de la résistance pénétrométrique du sol sous l'action de trois techniques de travail du sol. Thèse Ing. ENSA, El-Harrach. Alger, pp :47.
34. Belaid D., 1986. Aspect de la céréaliculture algérienne. OPU, Alger, pp 2-49.
35. Belaid D., 2014, Semis direct : L'expérience Tunisienne. Agriculture Algérie, 21p.
36. Bellemou A., 2012. Etude des résultats d'essais de différentes techniques de semis du blé dur (CHEN'S). Thèse Magister en science agronomiques, INA-El-Harrach, Algérie, 152 p.
37. Benhammouda M., L. Guesmi, K. Nasr , M. Khammassi. 2004. Evolution de la matière organique en semis direct. Dans : *Actes des deuxièmes rencontres méditerranéennes sur le semis direct, Tunisie*. 104-107
38. Benizri E., Courtade A. and Guckert A., 1995. Fate of two microorganisms in maize simulated rhizosphere under hydroponic and sterile conditions. *Soil Biol. Biochem.* 27 : 71-77.
39. Berner, A., Hildermann, I., Fließbach, A., Pfiffner, L., Niggli, U. et Mäder, P. 2008. Crop yield and soil fertility response to reduced tillage under organic management. *Soil Tillage Res.* 101: 89-96.

40. **Bessam F. et Mrabet R. 2001.** Time influence of no tillage on organic matter and its quality of a vertic Calcixeroll in a semiarid area of Morocco. Garcia-Torres et al. (Eds). In: proceedings of International Congress on Conservation Agriculture. Madrid, Spain. October 1-5, 2001. Vol. 2. pp 281-286.
41. **Biologievegetale\_chap04, 2008.** Racines, tiges et feuilles : le corps primaire de la plante -Chapitre 4, biologie végétale, p68-94
42. **Bonneau M., 1963.** L'importance des propriétés physiques du sol dans la production forestière. revue forestière française : 19-31.
43. **Bonzon B., Picard D., 1969.** - Matériel et méthodes pour l'étude de la croissance et du développement en pleine terre des systèmes racinaires. Cah. ORSTOM, sér. Biol., ,2" 3-18.
44. **Boudiar R., 2013.** Etude Comparative Des Effets De Travail Du Sol Conventionnel Et Le Semis Direct Sur L'évolution Du Sol En Région Semi-aride. Thèse Magister en science agronomiques, uuniversité Ferhat Abbas Sétif 1Faculté des Sciences de la Nature et de la vie, 104 p
45. **Bouguendouz A. 2011.** Effet de trois itinéraires techniques sur l'élaboration du rendement de l'orge (*Hordeumvulgare* L.) sous conditions semi-arides des hautes plaines Sétifiennes. *Options Méditerranéennes* 96 : 83-89.
46. **Boukerker H., 2007.** L'influence des substrats de culture sur l'enracinement de plants sous abri. Thèse. Magister. Agr. Université Colonel El Hadj Lakhdar. Batna, Algérie.
47. **Bounejmate, M., 1997.** Bersim (*Trifolium Alexandrinum* L). Production et utilisation des cultures fourragères au MAROC. Rabat, Jartiz G. et Bounejmate M., INRA, p.p. 140-147.
48. **Bourguignon C., 2004.** Comparaison analytique des sols tunisiens cultivés en labour et en semis direct. Dans : Actes des deuxièmes rencontres méditerranéennes sur le semis direct, pp. 90-98.
49. **Bouzerzour, H., 1998-** La sélection pour le rendement en grain, la précocité la biomasse aérienne et l'indice de récolte chez l'orge (*Hordeum vulgare*. L) en zone semis-aride. Thèse d'état université Mentouri Constantine : 165p.
50. **Brink, M. & Belay, C., 2006.** Ressources végétales de l'Afrique tropicale 1. Céréales et légumes secs. Fondation PROTA, Wageningen, Pays-Bas / Backhuys Publishers, Leiden, Pays-Bas 1 CTA, Wageningen, Pays-Bas. 328 pp.
51. **Bundy L.G., Andraski T.W. and Powell J.M., 2001.** Management practice effects on phosphorus losses in runoff in corn production systems. *Journal of Environmental Quality* 30, 1822-1828.
52. **Cadi, A., 2005.** Caractérisation des zones céréalières potentielles à travers le Nord de l'Algérie. *Rév. ITGC. Céréaliculture n° 44.* : 36-39.
53. **Cadi, A.; Dellig, A.; Sarfatti, P.; Chiar. T.; Bellah, F. et Bazzani, F., 2000-** SIG et zonage agro-écologique : Application au Nord algérien. *Rév. Céréaliculture n° 34 ITGC* : 68-75.
54. **Callot ans all., 1988-**mieux comprendre les interactions sol-racines. Ed INRA.FRANCE. 325p.
55. **Callot G. ; Chamayou H. ; Maertens C. ; Salsac L. (1982).** Les interactions sol-racine : incidence sur la nutrition minérale. Ed. INRA, Paris, 325 p.
56. **Catell ,F., 2006.** Fonctionnement hydrique et physiologique de la plante. In: *Tiercelin J.R. et Vidal A. Traité d'irrigation*, 147-161. 213<sup>2e</sup> Ed. Lavoisier. Paris, 1265p.
57. **Catt J.A., Howse k.R., Christian D.G., Lane P.W., Harris G.L. Et Goss M.J. 2000.** Assessment of tillage strategies to decrease nitrates leaching in the Brimstone Farm Experiment, Oxfordshire, UK. *Soil and Tillage Research*, 53, 185-200.
58. **CCE, 2002,** Vers une stratégie thématique pour la protection des sols, Bruxelles, 41p.
59. **CDSR. 2001.** Le semis direct ; potentiel et limites pour une agriculture durable en Afrique du nord. Commission économique pour l'Afrique. Nations unis décembre 2001
60. **Cesar J., 1971.** - Comparaison de quelques méthodes d'étude quantitative du système racinaire de la strate herbacée. Note dactylographiée.
61. **Chan K.Y. 2001.** An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity - implications for functioning in soils. *Soil Tillage Res.* 57, 179-191

62. **Chantereau J. et Nicou R. (1991).** Le sorgho. Editions Maisonneuve et Larousse. Paris. P.159. in **N'DAH Alphonse, 2016.** Test d'adaptation agro écologique de quatre variétés de sorgho (*Sorghumbicolor*, L. Moench) résilientes au changement climatique dans la commune de Materi. Rapport de fin de formation. Licence professionnelle de l'Université d'Abomey-Calavi(UAC). EPAC. Bénin.37p.
63. **Charreau C., Nicou R., 1971.** l'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest africaine et ses incidences agronomiques. *Bulletin de Liaison ORSTOM. Pédologie*, (1), 13-28.
64. **cheiner J.D. 2005.** Spéciation du carbone, de l'azote et du phosphore de différents boues de stations d'épuration au cours de leurs incubations contrôlées dans deux types de sol, Thèse de doctorat, 20-24p.
65. **Chenaffi H., A. Hannachi, O. Touahria, ZEA. Fellahi, M. Makhlouf, H. Bouzerzour. 2011.** Tillage and residue management effect on durum wheat [*Triticumturgidum*(L.) Thell.ssp. turgidum conv. durum (Desf.)MacKey] growth and yield under semi- arid climate. *Advances in Environmental Biology* **5**: 3231-3240.
66. **Chervet, L. Gubler, P. Hofer, C. Maurer-Troxler, M. Müller, L. Ramseier, B. Streit, W. G. Sturny, P. Weisskopf et U. Zihlmann, 2007.** Semis direct: de l'essai à la pratique : Expériences acquises dans un système de semis direct en continu. *Revue suisse Agric.* 39 (5): I-VI.
67. **Chopart J.L., 2001** - Système racinaire des cultures annuelles tropicales : effet du travail du sol sur les racines.
68. **Chopart J.L., NICOU. R., 1976.** - Influence du labour sur le développement racinaire des différentes plantes cultivées au Sénégal. Conséquences sur leur alimentation hydrique. *L'Agron. Trop.*, 1, 7-28.
69. **Chopart, J.L. 1980.** *Etude au champ des systèmes racinaires des principales cultures au Sénégal (Arachide-Mil-Sorgho-Riz pluvial).* Thèse de doctorat d'Université soutenue à l'Institut National Polytechnique de Toulouse le 19-6-1980. 162 p.
70. **Chopart, J.L. 1983.** Etude du système racinaire du mil (*Pennisetum typhoides*) dans un sol sableux du Sénégal. *L'Agronomie Tropicale* **1**: 37-51.
71. **Chopart, J.L. 1985.** Développement racinaire de quelques espèces annuelles cultivées en Afrique de l'Ouest et résistance à la sécheresse en zone intertropicale. In: *Pour une lutte intégrée contre la sécheresse.* CILF éditions, Paris, pp. 145-154.
72. **Chopart, J.L. et Nicou, R. 1976.** Influence du labour sur le développement racinaire de différentes plantes cultivées au Sénégal. Conséquences sur leur alimentation hydrique. *L'Agronomie Tropicale* **31** (1): 7-28.
73. **Clarkson D.T., Sanderson J. and Scattergood C.B., 1978.** Influence of phosphate-stress on phosphate absorption and translocation by various parts of the root system of *Hordeum vulgare* L.(barley). *Planta* **139**:47-53.
74. **Clement, J. M., 1981.** Dictionnaire des industries alimentaires. Ed. Masson, 1146P.
75. **Conant, R.T., Easter, M., Paustian, K., Swan, A., et S. Williams. 2007.** Impacts of periodic tillage on soil C stocks: A synthesis. *Soil and Tillage Research* **95**:110.
76. **Cowbrough. 2002.** Principe de lutte intégrée contre les mauvaises herbes. <http://www.gov.on.ca/OMAFRA/french/crops/facts/iwm.htm>
77. **Cramer M.D. and Lewis O.A.M., 1993.** The influence of  $\text{NO}_3$  and  $\text{NH}_4^+$  nutrition on the carbon and nitrogen partitioning characteristics of wheat (*Triticum aestivum* L.) and maize (*Zea mays* L.) plants. *Plant Soil* **154** : 289-300.
78. **CRANPDC, 2011:** Agricultures & Territoires-Chambre Régionale d'Agriculture Nord - Pas de Calais [WWW.agriculture-npdc.fr](http://WWW.agriculture-npdc.fr)
79. **Daane, J. Mongbo, R. Schamhart, R. (1989)** - *Méthodologie de recherche socio-économique en milieu rural africain*, UNB / LUW / SVR Abomey-Calavi, 290p.
80. **Daane, J. Mongbo, R. Schamhart, R. (1989)** *Méthodologie de recherche socio-économique en milieu rural africain*, UNB / LUW / SVR Abomey-Calavi, 290p.

- 81. Dahai Guan et al en 2014** – Soil and Tillage Research. Volume 146, Part B, March 2014, Pages 286–295.
- 82. Darbyshire J.F. and Greaves M.P., 1973.** Bacteria and protozoa in the rhizosphere. Pestic. Sci. 4 :349-360.
- 83. Debaeke, P. & Orlando, D. 1994.** Simplification du travail du sol et évolution de la flore adventice : conséquences pour le désherbage à l'échelle de la rotation. In Monnier, G., Thevenet, G., Lesaffre, B. (eds.), Simplification du travail du sol, INRA.
- 84. Delmadji A., 2014.** Analyse de l'effet du travail conventionnel et du semis direct sur l'infestation en mauvaises herbes et conséquences sur le rendement du sorgho fourrager (sorghum bicolor). Thèse fin d'étude en science agronomiques, INA, El-Harrach, 147 p. 109p.
- 85. Demarquilly, C., Andrieu, J., 1988.** Les fourrages. In Alimentation des bovins, ovins et caprins, INRA Edition, Paris. p.315-335.
- 86. Demmak, A. (1982).** Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse de docteur ingénieur. Université Pierre et Marie Curie, Paris. Options Méditerranéennes, Série A, Numéro 69 187.
- 87. Derpsch R. (GTZ), 2001,** Conservation tillage, no-tillage and related technologies, Keynote contributions "First world Congress on Conservation Agriculture; 1-5 octobre 2001", Madrid (SP), ECAF-FAO, p161-170, 394 pp.
- 88. Deumier JM., Lacroix B., Bouthier A., Verdier JL., Mangin M., 1980-** Stratégies de conduite de l'irrigation du maïs et du sorgho dans les situations de ressource en eau.
- 89. D'Haene K., Vermang J., Cornelis W.M., Leroy B.L.M., Schiettecatte W., De Neve S., Gabriels D. et Hofman G. 2008b.** Reduced tillage effects on physical properties of silt loam soils growing root crops. Soil and Tillage Research 99:279-290
- 90. Dill-Macky, R. Et Jones, R. K. 2000.** The effect of previous crop residues and tillage on fusarium head blight of wheat. Plant Dis. 84: 71-76.
- 91. Drew M.C., Saker L.R. and Ashley T. W., 1973.** Nutrient supply and the growth of the seminal root system in barley. I. The effect of nitrate concentration on the growth of axes and laterals. J. Exp. Bot. 24: 1189-1202
- 92. Ducellier L. 1930.** Espèces et variétés de céréales cultivées en Algérie. Direction de l'agriculture et de la colonisation, 130 pages.
- 93. Duthil, J., 1973** - La fertilisation phosphatée des sols calcaires. *An Agro, INA Vol VI n°2*
- 94. ECAF, FAO, 2001,** Report, "First world Congress on Conservation Agriculture; 1-5 octobre 2001", Madrid (SP), ECAF-FAO, 21 pp
- 95. ECAF/FAO, 2001,** Report, "First World Congress on Conservation Agriculture; 1-5 octobre 2001", Madrid, ECAF-FAO, 21 pp.
- 96. El Naharawy, M, et al., 2014.** Egyptian clover (*Trifolium alexandrinum*) King of forage crops. Caire. FAO, p.p. 1-5.
- 97. El-Brahli A. et Mrabet R. 2000.** La jachère Chimique: Pour relancer la céréaliculture nonirriguée en milieu semi-aride Marocain. Actes de la Journée Nationale sur le Désherbage des Céréales. Centre Aridoculture Settat 23 Novembre 2000. Association Marocaine de Malherbologie. pp: 133-145.
- 98. Eliard L.J., 1979.** Manuel d'agriculture générale. Base de la production végétale 5<sup>éd</sup>, Paris..
- 99. Eliard, L.J. 1974** -Manuel d'agriculture générale. Bases de la production végétale. Ed. Baillière, Paris, 344 p.
- 100. Evans, L.T. and Wardlaw, I.F., 1976-** Aspect of comparative physiology in grain yield in cereal. *Adv. Agri.* 28: 301-359.
- 101. Fanou L., 2008.** Rentabilité financière et économique des systèmes de productions maraîchères au Sud-Bénin : Cas de la Tomate (*Lycopersicum esculentum*) et du chou pommé (*Brassica oleracea*). Thèse Ing. Option : Economie, Socio-Anthropologie et Communication pour le développement rural. Université D'abomey-Calavi. Bénin, 102 p.

102. **FAO, 1997.** Le travail du sol pour une agriculture durable, 16p. Référence internet [www.FAO.com02/05/2013](http://www.FAO.com02/05/2013).
103. **FAO. 2008.** la séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des sols.FAO, département du développement durable, 63pages. Référence internet [www.fao.org/DOCREP/005/Y\\_20779F/y2779fo4.html](http://www.fao.org/DOCREP/005/Y_20779F/y2779fo4.html)
104. **Faostat. 2010.** Statistical database of the food and agriculture organization of the United Nations.
105. **Faostat. 2011.** Statistical database of the food and agriculture organization of the United Nations.
106. **FAOSTAT.** FAO Statistics Division 2012. 5 th March 2012, Rome.
107. **Feddal , M.A.,2011.** Analyse du comportement du sol sous l'action de deux techniques de mise en place d'une culture de céréales (*Triticum Durum*). Thèse de magister.INA .El-Harrach, 174p.
108. **Feddal M. A., Amara, M. (2014),** - Effet des techniques culturales simplifiées sur la conservation de l'eau et risque de pollution. Arabian Journal of Earth Sciences. Proceeding : Mars 2014.
109. **Feddal M.A., 2015.** Problématique de l'introduction des techniques culturales simplifiées pour la mise en place des grandes cultures en Algérie. Thèse de doctorat. ENSA. EL-Harrach, 296p.
110. **Feliachi, K. (2000).** Programme de développement de la céréaliculture en Algérie. Dans : Acte du premier symposium international sur la filière blé 2000. Enjeux et stratégies, Alger (Algérie). Pp. 21-27.
111. **Feliachi, K., Ameroune R., Khaldoune A., (2001).** Impact de la sécheresse sur la production des céréales cultivées dans le nord de l'Algérie. Céréaliculture n°35 :28-37.
112. **Ferrah, A.G., 2014.** Effet de trois techniques culturales sur le développement du blé en zone semi-aride. Thèse d'ing de l'université mouhamed Boudiaf, M'Sila.
113. **Frederic O.M., Vandome A.F., McBrewester J. (Ed),** Rhizosphère. Sol (pédologie), racine (botanique), micro organisme, salinisation, desertification, eutrophisation, cation, anion, sol, coiffe (botanique) ,104p.
114. **FrédéricT., 2005.** Techniques culturales simplifiées, N°36. janvier/février 2005.
115. **Frick R., Mosimann E., Aebi Ph., Suter D., Hirschi H., 2013.** Essais de variétés de trèfle d'Alexandrie et de trèfle Incarnat. Recherche Agronomique Suisse 4 (6), 296–301
116. **Gál A., Vyn T.J., Michéli E., Kladienko E.J. et McFee W.W. 2007.** Soil carbon and nitrogen accumulation with long-term no-till versus moldboard plowing overestimated with tilled-zone sampling depths. Soil and Tillage Research 96:42-51.
117. **Geisler G.,1967.in Bachelier G.,1968.**interactive effects of co2 and O2 in soil on root and top growth of barley and peas.PI.Physiol,p.p.305-307.
118. **Giovannozzi I., Ermanni G., Cacciari I., 1967.in Bachelier G., 1968.** Increase of production by means of co2 applied to the roots. agrochimica, p.124-131.
119. **Girard, M.C.; Walter, C.; Rémy J.C. ; Berthelin J. et Morel, J.L., 2005-** Sols et Environnement, *Eds., Dunod, Paris, 816 p.*
120. **Gras R.** Systèmes de culture, définitions et concepts clés. In : Combe L, Picard D, eds. Les systèmes de culture. Paris : Inra éditions, 1990.
121. **Grignac P., 1969.** Le blé dur. Variétés et techniques culturales. Bull. Techn. Inf., 244, 799-806.
122. **Grignac, PH., 1965.** Contribution à l'étude de *Triticum durum* Desf. Thèse de Doctorat Université de Toulouse ,240p.
123. **Groleau-Renaud V., 1998.** Contrainte mécanique et exsudation racinaire du maïs : incidence de la morphologie du système racinaire. Thèse de docteur en Sciences Agronomiques, ENSAIA, INPL, 268P.
124. **Guerif J. ; 1994.** Influence de la simplification du travail du sol sur l'état structural des horizons de surface : conséquences sur leurs propriétés physiques et leurs comportements mécaniques. Simplification du travail du sol. INRA. Paris, (Les Colloques, n°65), 13-33.In **Bellemou A., 2012.** Etude des résultats d'essais de différentes techniques de semis de blé dur. Thèse de magister, l'ENSA, Alger, 152p.
125. **Guerin, H., 1999.** Valeur alimentaire des fourrages cultivés. In Roberge G., and Toutain B., eds. Cultures fourragères tropicales. Collection Repères, CIRAD, Montpellier, France. 93-141.
126. **Hackney, B. 2007.** Bersim clover. Primefact, n°388, 2p.

127. **Hakimi M. 1993.** L'évolution de la culture de l'orge : le calendrier climatique traditionnel et les données agro météorologiques modernes. *In the agrometeorology of rainfed barley-based farming systems. Proceeding of an International symposium. Ed. Jones M., Marthys G., Rijks D. 157 – 166.*
128. **Hamadache A., 2001.** Les ressources fourragères actuelles en Algérie. Situation et possibilité d'amélioration. In Actes de l'atelier national sur la stratégie du développement des cultures fourragères en Algérie. Ed. ITGC, 79p.
129. **Hamadache A., 2003.** Les ressources fourragères actuelles en Algérie : situation et possibilité d'amélioration. Acte de l'atelier national sur la stratégie de développement des cultures fourragères en Algérie. ITGC. P.P. 18-19.
130. **Hamadache A., Makhlof M. et Harkati N. 2002.** Effet de la date et l'effet de travail de sol sur le comportement du brome (*Bromus* sp) et le rendement de blé dur (*triticum durum*). Dans la région de Sétif. *Revue Céréaliculture*, n°37. ITGC Alger, pp.24-29.
131. **Hamadache, A. 2013.** Eléments de phytotechnie générale : Grandes Culture- Tom I : Le blé. 1ère édition. Algérie, P.54 - 59.
132. **Hamadache, A. 2016.** Eléments de phytotechnie générale : Grandes Culture- Tome III : Ressources Fourragères. Edition : 2016. 358p.
133. **Hamani A., 2013.** Effet de trois techniques de mise en place d'une culture sur le développement des racines et conséquences sur le rendement. Thèse Ing. ENSA, El-Harrach. Alger, pp : 81-82.
134. **Hammel, J. E. 1995.** Long-term tillage and crop rotation effects on winter wheat production in Northern Idaho. *Agron. J.* 87: 16-22.
135. **Harrad F., 2003.** Contribution à l'établissement d'un itinéraire technique pour la mise en place du blé dans les zones sahariennes (Adrar), effet de la succession des outils aratoires sur le développement de la plante .Thèse Magister. I.N.A. El Harrach, 98p.
136. **Haynes R.J. 2005.** Labile Organic Matter Fractions as Central Components of the Quality of Agricultural Soils: An Overview. *Advances in Agronomy* 85:221-268.
137. **Hazmoune, T., 2006.** le semis profond comme palliatif à la sécheresse. Rôle du coléoptile dans la levée et conséquences sur les composantes du rendement .Thèse d'état Uni. Constantine, 138p.
138. **Henin S., Feodoroff A., Gras R., Monnier G., 1960.** Le profil cultural. Principes de physique du sol. Société d'Edition des Ingénieurs Agricoles, Paris (1960).
139. **Hénin, S., Gras, R., Monnier, G., 1969.** Le profil cultural (2 édition), Masson Ed., Paris, 332 p.
140. **Hervieu B., R.Capone, S. Abis. 2006.** The challenge posed by the cereals sector in the Mediterranean. Ciheam analytical note, N°9: 14 pages.
141. **Houmani, M., Bencherchali, M. ? 2010.** Intérêt Fourrager Pour les Ruminants de Deux Espèces Fourragères Spontanées *Bromus Madretensis* L. et *Bromus Maximus* Desf. Université de Blida, Algérie. *European Journal of Scientific Research*. ISSN 1450-216X Vol43 No.3 (2010, pp.307-315.
142. **Houmani, M., Houmani Z., Skoula M.2004.** Intérêt de *Artemisia herba alba* Asso. Dans l'alimentation du bétail des steppes algériennes *Acta Botanica Gallica.*, 151 (2), 165-172.
143. <https://www.aquaportail.com/definition-2629-labile.html>
144. **Huwe B.,2003.** The rôle of soil tillage for soil structure, in A. El Titi, ed. Soil.
145. **ICE.2011.** [https://www.theice.com/publicdocs/futures\\_canada /ICE\\_Durum\\_Wheat\\_white\\_paper.pdf](https://www.theice.com/publicdocs/futures_canada /ICE_Durum_Wheat_white_paper.pdf)
146. **ITGC, 2006.** Le bersim où trèfle d'Alexandrie (*Trifolium alexandrinum*).Fiche technique.
147. **Jackson, P.A.; Byth, D.E.; Fischer, K.S. and Johnston. R.P. 1996.** Genotype x environment interactions in progeny from a barley cross: II. Variation in grain yield, yield components and dry matter production among lines with similar times to anthesis. *Field Crops Research* 37: 11-23.
148. **Jaillard B. et Luc J.P., 1979.** Comparaison de la dynamique de l'eau entre trois parcelles à enracinement différents. *Bull. G.F.H.N.*73-98.
149. **Jarrige, R., 1988.** Alimentation des bovins, ovins et caprins. INRA- Paris, 476 P.

- 150. Jean-françois V. 2009.** Comparaison de différentes techniques de travail du Sol en agriculture biologique : effet de la structure et de la localisation des résidus sur les microorganismes du sol et leurs activités de minéralisation du carbone et de l'azote l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech) thèse de doctorat. 172P.
- 151. Jouve Ph. 2006-** La dimension spatiale des systèmes de culture : comparaison entre agriculture tempérée et agriculture tropicale. Synthèse, Cahiers Agricultures vol. 15, n° 3, mai-juin 2006 (France): 265.
- 152. Jürg Hiltbrunner et al., 2012.** Le sorgho-une grande culture intéressante encore inconnue en suisse. Recherche agronomique suisse 3 (11-12) :524-531,2012.
- 153. Kali S., Benidir M., Ait Kaci K., Belkheir B., Benyoucef MT.** 2011. Situation de la filière lait en Algérie: Approche analytique d'amont en aval, Livestock Research for Rural Development., 23 (8) 2011.
- 154. Kassam, A., Friedrich T., Derpsch R., Lahmar R., Mrabet R., Basch G., González-Sánchez EJ., Serraj R. 2012.** Conservation agriculture in the dry Mediterranean climate. *Field crop research* **132**: 7-17.
- 155. Kelkouli, M., 2008-** Influence de différentes techniques culturales utilisées en grandes cultures sur la rétention de l'eau en condition semi-aride, cas du blé. Thèse Magister en science agronomiques, INA, El-Harrach, 147 p.
- 156. Khaledian R.M. Ruelle P. Mailhol J.C., Delage L., Rosique P.,2005.** Evaluation direct seeding on mulch on a field scale. In : Arrue Ugarte J.L. (ed.), Cantero-Martínez C. (ed.). Troisièmes rencontres méditerranéennes du semis direct . Zaragoza : CIHEAM, 2006. p. 125-129. (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 69). 3. Mediterranean Meeting on no Tillage, 2006/03/23-25, Zaragoza (Spain).
- 157. Köller K. 2003.** Techniques of Soil Tillage, p. 1-25, In A. El Titi, ed. Soil Tillage in Agroecosystems. CRC Press LLC, Boca Raton.
- 158. Kribaa, M., Hallaire, V., Curmi, P. et Lahmar, R. (2001).** Effects of various cultivation methods on the structure and hydraulic properties of soil in semi-arid climate. *Soil Tillage Research*, 60 : 43-53.
- 159. Kulagowski R., Robert R., Giraud G., Jézéquel S.,2012.** Evaluation des impacts agronomiques et environnementaux du Semis Direct Sous Couvert Végétal en sols alluvionnaires irrigués des Alpes de Haute Provence. Réseau DEPHY Grandes Cultures irriguées Val de Durance.20 p.
- 160. Labreuche J., LE Souder C., Castillon P., Ouvry J.F., Real B., Germon J.C., de Tourdonnet S. (coordinateurs), 2007.** Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturales Sans Labour en France. ADEME-ARVALIS. Institut du végétal-INRA .400p. <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=51256&p1=00&p2=11&ref=17597>
- 161. Labreuche J., Maumene C., Couleaud G., Seguin B.,2007 -** Tirer parti des rotations pour éviter les maladies du blé- Perspectives agricoles 288. 58-61.
- 162. Lal R., Reicosky D.C., et Hanson J.D., 2007 :** Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil and Tillage Research* 93:1-12.
- 163. Latreche F.,2011.** Le rendement et l'efficience d'utilisation de l'eau de la culture de blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous les effets du précédent cultural et de l'outil de labour du sol en environnement semi-aride. Thèse Magister. Université Ferhat Abbas –Sétif-1Faculté des Sciences de la Nature et de la vie. 119p.
- 164. Leclercq J. et Verbrugge J.C., 1984.** Approche théorique de l'interaction mécanique entre une racine et le sol. *Bull. Rech. Agron. Gembloux* 19:37-50
- 165. Lieth H., 1968.** - The determination of plant dry-matter production with special emphasis on the underground parts. In "Fonctionnement des écosystèmes terrestres au niveau de la production primaire", Actes du colloque de Copenhague, UNESCO, 179-186.
- 166. Liljeroth E., Baath E., Mathiasson I. and Lund borg T., 1990.** Root exudation and rhizoplane bacterial abundance of barley (*Hordeum vulgare* L.) in relation to nitrogen fertilization and root growth. *Plant Soil* **127**: 81-89.

167. Little J.L., Bennett D.R. et Miller J.J. 2005. Nutrient and sediment losses under simulated rainfall following manure incorporation by different methods. *Journal of Environmental Quality* 34: 1883-1895.
168. Liu X.J., Mosier A.R., Halvorson A.D. et Zhang F.S. 2006. The impact of nitrogen placement and tillage on NO, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> fluxes from a clay loam soil. *Plant and Soil*, **280**, 177-188.
169. Longueval C., 2005. Gestion durable des sols cultivés : intérêt des techniques culturales sans labour dans l'amélioration de la qualité des sols. Publication CR Midi-Pyrénées
170. LópezMV., JL. Arrúe. 2005. Soil tillage and wind erosion in fallow lands of Central Aragon, Spain: An overview. In :Faz A, Ortiz R, Mermut AR, eds. *Sustainable Use and Management of Soils : Arid and Semiarid Regions. Advances in GeoEcology*, 36-41
171. Sebillotte M. (1974). Agronomie et Agriculture. Essai d'analyse des tâches de l'agronome. Cah. ORSTOM, Sér. Biol., 24, 3-25.
172. MADR. Ministère de l'agriculture. 2007. Statistiques agricoles, superficies et productions. Direction des Statistiques Agricoles et des Enquêtes Economiques. *Séries B*.
173. MADR. Ministère de l'agriculture. 2013. Statistiques agricoles, superficies et productions. Direction des Statistiques Agricoles et des Enquêtes Economiques. *Séries B*.
174. Mareaux M.C., « Alternatives au pâturage de prairies l'été », (2010)
175. McBride R.A., Martin H. et Kennedy B., 1989 - La compaction du sol. Fiche technique, Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, Ontario, Canada.
176. Mekhlouf A., H. Bouzerzour, A. Benmahammed, A. Hadj Sahraoui, N. Harkati. 2006. Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride. *Sécheresse*, 17 :206-213.
177. Merabet, B.A., Bassaid, F., Abdelguerfi A., Daoud, Y., 2005. Production et qualité fourragère du trèfle d'Alexandrie en fonction de l'alimentation hydrique en Mitidja (Algerie), fourrages 181,179-191.
178. Mrabet R. 1997. Crop residue management and tillage systems for water conservation in a semiarid area of Morocco. PhD dissertation. Colorado State Univ. Fort Collins, CO. USA. 220 p.
179. Mrabet R. 2001d. No-Tillage System: Research Findings, Needed Developments and Future Challenges for Moroccan Dryland Agriculture. In proceedings of International Congress on Conservation Agriculture. Garcia-Torres et al. (eds). Madrid, Spain. October 1-5, 2001. p:737-741.
180. Mrabet R. 2004. Le système de semis direct en milieu semi-aride marocain: Aperçu sur les acquis de la recherche. In 2 ième Rencontres Méditerranéennes sur le Semis Direct, Tabarka (Tunisie), 54-57.
181. Mrabet R., 2001. Le semis direct : potentiel pour une agriculture durable en Afrique du Nord. Centre de développement sous-régional pour l'Afrique du Nord (CDSR). Dans : Commission économique pour l'Afrique. Tanger (Maroc).
182. Mrabet, R., Ibno Namr, K., Smali, N., Ahdi, M. et Saber, N. (2000). Soil quality and associated changes in fertilizer management for wheat in no-tillage production systems of semiarid Morocco. Dans : Actes du Premier Congrès de l'Association Marocaine des Sciences du Sol, ENA. Meknès (Maroc), 18-19 May 2000.
183. Müller M., Schafflützel R., Chervet A., Sturny W.G., Zihlmann U. et Weissopf P. 2008. Teneurs en humus après 11 ans de semis direct ou de labour. *Revue suisse Agric.* **40** (en préparation).
184. Munkholm L.J., Schjonning P., Rasmussen K.J. et Tanderup K. 2003. Spatial and temporal effects of direct drilling on soil structure in the seedling environment. *Soil and Tillage Research* 71:163-173.
185. Nantawisarakul T. and Newman I.A., 1992. Growth and gravitropism of corn roots in solution. *Plant Cell Environ.* 15 : 693-701.
186. Nassif, F. 2001. Semis direct et environnement socio-économique dans les zones arides et semi-arides au Maroc. Actes des 1ères journées de Rencontres Méditerranéennes sur le Semis Direct. Mrabet et al. (eds). Settat, 22-23 Octobre 2001. Le semis direct : potentiel et limites pour une agriculture durable en Afrique du Nord

- 187. Nicolas Bottinelli.** Evolution de la structure et de la perméabilité d'un sol en contexte de non labour associé à l'apport d'effluent d'élevage : rôle de l'activité lombricienne. Sciences de la Terre. Agrocampus - Ecole nationale supérieure d'agronomie de rennes, 2010.
- 188. Nicou R., Charreau C. and Chopart J.L. 1993.** Tillage and soil physical properties in semi-arid West Africa. *Soil and Tillage Research* 27: 125-147.
- 189. Nicou, R., 1972.** Le travail du sol on terre oxoncloes et SCIS incidences agronomiques. Dot.mult. IRAT CNRA Dambey, Si, gol, 20p.
- 190. Nouiri I., M'hedbi K., ben hamouda M., Kammassi M., Neit el Arbi S., Ali Hannachi M., Guesmi L., Mannai C. et Hajji S. 2004.** Etude comparative de l'humidité des horizons du sol entre le semis direct et le semi conventionnel. Actes des deuxièmes rencontres méditerranéennes sur le semis direct.
- 191. Oird. 1977.** Bilan des opérations intégrées de recherche et développement de la daïra d'El Eulma. IDGC. Tome I, 70 pages
- 192. Olioso A., 2006-** Spatialisation des transferts sol-végétation-atmosphère de l'échelle de la parcelle à celle du paysage agricole en combinant modèles de fonctionnement de la végétation et du sol, modèles de transfert radiatif et systèmes de mesure de télédétection. Mémoire de HDR, spécialité "Physique de l'Environnement (Sciences de l'eau, Télédétection)", *Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, Avignon (FRA)*, 330 pp.
- 193. Olivier Jean, 2012.** Revue semence de Provence. N°01.France.
- 194. Olivier M., 2014.** Techniques Culturelles Sans Labour. Agricultures et Territoires, chambres d'agriculture Bretagne. Guide pratique.
- 195. Oorts K. 2006.** Effect of tillage system on soil organic matter stocks and C and N fluxes in cereal cropping systems on a silt loam soil in Northern France, PhD thesis, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris.
- 196. Ouanzar S., 2012.** Etude comparative de l'effet du semis direct et du labour conventionnel sur le comportement du blé dur (*Triticum durum* Desf.). Thèse Magister en science agronomiques, univ. Ferhat Abbas Sétif 1 Faculté des Sciences de la Nature et de la vie, 70 p.
- 197. Oudina M., 1986.** Céréaliculture. Le choix variétal. Revue., n° 4, ITGC., pp10-19
- 198. Ouzounidou G., Ciamporova M., Moustakas M. and Karataglis S., 1995.** Responses of maize (*Zea mays* L.) plants to copper stress. I. Growth, mineral content and ultrastructure of roots. *Environ. Exp. Bot.* 35: 167-176.
- 199. Pajonk Daniel, 2012.** Le non-labour et le semis direct à l'honneur, Publié le 16/09/2012 <https://france3-regions.francetvinfo.fr/auvergne-rhone-alpes/>
- 200. Pena R.J., W.H. Pfeiffer. 2005.** Breeding methodologies and strategies for durum wheat quality improvement. In *Conxita, R., Nachit, M., di Fonzo, N., Araus, J.L., Pfeiffer, W.H., & Slafer, G.A. (eds.). Durum wheat breeding: current approaches and future strategies. Food product press.* 663-686. physiologiques et anatomiques de la productivité chez le blé dur (*Triticum durum*) Vég., INA, El Harrach, Alger, 114 p.
- 201. Pierre Daum, 2016.** Le Monde Diplomatique. Mai 2016, p16-17
- 202. Prasad, B.; Carver, B.F.; Stone, M.L.; Babar, M.A.; Raun, W.R. and Klat A.R., 2007-** Genetic Analysis of Indirect Selection for Winter Wheat Grain Yield Using Spectral Reflectance Indices. *Crop science, vol. (47): 1716-1425.*
- 203. Prosensols, 2011.** Le tassement des sols agricoles: prévenir et remédier, dans: projet PROSENSOLS. 32p. [https://www.vlm.be/nl/SiteCollectionDocuments/VLM%20WestVlaanderen/Projecten/PROSENSOLS/PROSENSOLS\\_FR\\_web.pdf](https://www.vlm.be/nl/SiteCollectionDocuments/VLM%20WestVlaanderen/Projecten/PROSENSOLS/PROSENSOLS_FR_web.pdf)
- 204. Rachedi M.F, 2003** « les céréales en Algérie- Céréaliculture ». Revue ITGC, n°38 :4-25.
- 205. Rahali A. Makhlouf M. et Benkherbeche N. 2010.** Influence de l'itinéraire technique sur le type et le stocke semencier du sol des mauvaises herbes, cas de la zone semi aride de Sétif. Actes du 4<sup>e</sup> Rencontre méditerranéen du semis direct. Sétif, Algérie, du 3 à 5 mai 2010 p, 90-99.

206. **Richard G, Mary B, Boizard H, Roger-Estrade J, Chenu C, 2004.** Impacts des techniques culturales sans labour sur le fonctionnement des sols cultivés: composantes physique et organique. In: Techniques culturales sans labour. Paris : éditions CORPEN
207. **Rieu C., 2001,** Les enjeux économiques de la simplification du travail du sol, Du labour au semis direct : enjeux Agronomiques, Conférence-débat INRA –ITCF, Salon International du Machinisme Agricole, février, p 21-22, pp 22.
208. **Roberts, Sir William, & Kartar Singh. 1951.** *A Textbook of Punjab Agriculture.* Lahore: Civil and Military Gazette.
209. **Salhi H., 2013.** Valeur nutritive des espèces spontanés de la plaine du moyen Chelif. thèse de magister. Université Hassiba Ben Bouali. Chlef.117p.
210. **Schuurman J.J., Goedevisgen M.A.J., 1964.** - Methods for the examination of root systems and roots. Centre for Agric. Publ. and Doc., liagemingen, Netherlands, 86 pages.
211. **Sharpley A.N. 2003.** Soil mixing to decrease surface stratification of phosphorus in manured soils. *Journal of Environmental Quality* 32: 1375-1384
212. **Shipitalo M.J., Dick W.A., Edwards W.M., 2000.** Conservation tillage and macropore factors that affect water movement and the fate of chemicals. *Soil and Tillage Research*, 53, 167-183.
213. **Si Bennasseur A., 2005.** Référentiel pour la Conduite Technique de la Culture du blé dur (*Triticum durum*). Maroc. 38 pages.
214. **Smith C.W. & Frederiksen R.A., 2000.** Sorghum: Origin, History, Technology And Production. Wiley John & Sons, New York, 824 p.
215. **Soltner D., 1990.** Phytotechnie spéciale : les grandes productions végétales : céréales plantes sarclées prairies. Collection sciences et technique agricole, 17 ème édition, Paris, pp 25-41.
216. **Soltner, D., 2005-** La base de la production végétale Tom I. Le sol et son amélioration *24Eme Edi. collection science et technique agricole. 472P.*
217. **Stéphane Foucart, 2016.** Roundup : le pesticide divise l'Union européenne et l'OMS, journal le monde, Publié le 25 mars 2016. [https://www.lemonde.fr/planete/article/2016/03/28/roundup-le-pesticide-divise-l-union-europeenne-et-l-oms\\_4891222\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2016/03/28/roundup-le-pesticide-divise-l-union-europeenne-et-l-oms_4891222_3244.html)
218. **Stoddard C.S., Grove J.H, Coyne M.S. et Thom W.O. 2005.** Fertilizer, tillage, and dairy manure contributions to nitrate and herbicide leaching. *Environ. Qual.*, 34, 1354-1362.
219. **Swart G. M., 2011.** Santé des racines - la clé pour améliorer le rendement. Livre blanc 2011.travail du sol. dans : les colloques n°65, INRA, ITCF, CEMAGREF, Edition INRA, 1994, pp.13-33.
220. **Tahir,M.; Ketata, H. and Amiri, A.,1998-** breedin of wheat (*Triticum aestivum* L.) for thermal stress tolerance for continental Mediterranean environments . *In proceeding for of the 9 th international wheat genetic symposium .Vol. 4: 95-97.*
221. **Taser et Metinoglu, 2005** - Soil Biology and Biochemistry Volume 34, Issue 6, June 2002, Pages 833–840.
222. **Tebrügge F. et Düring R.A. 1999.** Reducing tillage intensity -- a review of results from a long-term study in Germany. *Soil and Tillage Research* 53:15-28.
223. **Tebrügge F., Böhrnsen, 1997,** Crop yields and economic aspects of no tillage compared to plough tillage: results of long term soil tillage field experiments in Germany,p 25-45.
224. **Teyker R.H. and Hobbs D.C., 1992.** Growth and root morphology of corn as influenced by nitrogen form. *Agron. J.* 84:694-700.
225. **UCL, 2011** : Université catholique de Louvain [www.uclouvain.be](http://www.uclouvain.be)
226. **Unger, P. W. & Jones, O. R. 1998.** Long-term tillage and cropping systems affect bulk density and penetration resistance of soil cropped to dryl and wheat and grain sorghum. *Soil & Tillage Research*, 45, 39-57.

227. **Vadon B., Lamouchi L., Elmay S., Maghfour A., Mahnane S., Benaouda H. et Elgharras O.,2006.** Organisations paysannes : Un levier pour développer l'agriculture de conservation au Maghreb. Options Méditerranéennes, Série A, Numéro 69.p.87-99
228. **Verhallen A., 2014.** Automne humide + compactage = effet sur les racines de l'année prochaine. Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales.ontario.ca.
229. **Vermang J., Desauw H., Cornelis W.M. and Gabriels D.,2010.**Evaluation of conservation tillage by means of physical soil quality indicators.19<sup>th</sup> World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World,1 – 6 August 2010, Brisbane, Australia. Published on DVD.
230. **Vian J-F.2009.** comparaison de différentes techniques de travail du sol en agriculture biologique: effet de la structure et de la localisation des résidus sur les microorganismes du sol et leurs activités de minéralisation du carbone et de l'azote, thèse de docteur, paris, l'institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AGRO PARIS TECH), 204P.
231. **Villax, E.J., 1963.** La culture des plantes fourragères dans la région méditerranéenne. INRA, RABAT(MAROC), p.p.407-641.
232. **VLM, 2011** : Vlaamse Landmaatschappij [www.vlm.be](http://www.vlm.be)
233. **Vulioud P., Delabays N., Frei P. et Mercier E. 2006.** Résultats de 35 ans de culture sans labour à chagins. Revue suisse. Agric. 38 (2): 81-87.
234. **Whitteman, P. C., 1980.** Tropical pasture science; 2ème édition Rustica Paris, 177P.
235. **Young E, 2001,** Charges de structures: les rouages de la mécanisation, Cultivar le Mensuel, n°514, septembre, p26-28.
236. **Zaghouane O., Abdellaoui Z., and Houassine D.,** Quelles perspectives pour l'agriculture de conservation dans les zones céréalières en conditions algériennes, Options Méditerranéennes, Série A, pp.183-187, 2006.
237. **Zahid H.,2016.** La racine, Biologie vegetale, mybiologie, publié 7mai 2016. <http://mybiologie.blogspot.com/2016/05/la-racine.html>
238. **Zidan I, Azaizeh H. and Neumann P.M., 1990.** Does salinity reduce growth in maize root epidermal cells by inhibiting their capacity for cell wall acidification? . Plant Physiol. 93 : 7-11.
239. **Zihlman U., Chervet A., Müller M., Schafflützel R., Sturny W.G. et Weisskopf P., 2001.** Semis direct en grandes cultures. Effets sur la matière organique et les nutriments dans le sol. *Revue suisse Agric.* **33** (1),21-25.

# *Annexes*

**Tableau A-1** : Variation de l'humidité du sol-sorgho fourrager

T	D	Pr	B	Au semis	8 jours	15 jours	22 jours	29 jours	36 jours
T1	d1	N1	1	13,96	14,29	11,56	11,30	10,11	9,95
T1	d1	N1	1		10,97	10,97	9,57	11,17	8,65
T1	d1	N1	1		12,12	10,66	12,09	9,23	7,14
T1	d1	N1	2		12,90	10,10	10,92	10,53	9,42
T1	d1	N1	2		14,37	8,73	10,58	10,70	8,76
T1	d1	N1	2		11,62	9,74	8,87	11,68	8,72
T1	d1	N1	3		14,58	9,70	11,23	9,29	9,39
T1	d1	N1	3		13,61	10,50	9,18	11,11	10,53
T1	d1	N1	3		9,46	8,09	12,44	10,64	10,77
T1	d1	N2	1	13,92	13,64	9,05	11,56	11,05	9,95
T1	d1	N2	1		14,63	13,15	10,64	11,89	10,00
T1	d1	N2	1		13,19	13,64	11,62	11,73	10,00
T1	d1	N2	2		14,38	12,29	10,05	9,20	9,09
T1	d1	N2	2		13,64	11,79	11,54	10,71	10,82
T1	d1	N2	2		10,50	12,37	11,06	11,52	11,11
T1	d1	N2	3		15,51	13,11	11,64	11,11	10,82
T1	d1	N2	3		11,41	11,91	9,19	11,70	9,71
T1	d1	N2	3	13,66	9,05	10,53	11,76	10,05	
T1	d1	N3	1	13,96	14,94	11,56	10,61	12,83	10,47
T1	d1	N3	1		14,61	10,47	11,47	10,55	11,06
T1	d1	N3	1		13,25	9,78	12,82	12,83	9,58
T1	d1	N3	2		14,16	11,68	11,41	11,90	11,67
T1	d1	N3	2		15,96	12,57	11,42	11,73	11,11
T1	d1	N3	2		10,64	11,74	11,43	11,18	9,52
T1	d1	N3	3		13,37	12,50	9,00	10,53	10,61
T1	d1	N3	3		15,63	11,11	10,87	12,36	9,63
T1	d1	N3	3	13,33	10,64	11,68	9,95	11,54	
T1	d2	N1	1	13,96	10,97	13,12	8,06	8,88	8,66
T1	d2	N1	1		12,00	10,55	9,52	7,84	7,69
T1	d2	N1	1		10,43	11,33	8,21	8,94	8,96
T1	d2	N1	2		11,18	11,43	8,66	10,70	8,70
T1	d2	N1	2		11,11	10,22	11,28	8,56	8,11
T1	d2	N1	2		13,07	10,76	11,56	9,68	9,95
T1	d2	N1	3		14,14	9,62	7,61	10,27	9,89
T1	d2	N1	3		13,71	10,13	8,50	11,11	8,50
T1	d2	N1	3	12,00	10,32	8,46	10,93	9,89	
T1	d2	N2	1	13,92	13,38	9,39	10,43	9,59	10,05
T1	d2	N2	1		15,05	11,24	11,06	10,34	8,25
T1	d2	N2	1		13,86	11,22	10,79	11,31	9,34
T1	d2	N2	2		11,86	10,09	11,52	10,53	9,09
T1	d2	N2	2		11,85	11,60	10,00	8,76	10,08
T1	d2	N2	2		14,07	11,70	7,92	11,62	10,43
T1	d2	N2	3		11,76	12,85	11,63	9,95	10,55
T1	d2	N2	3		10,64	9,14	10,05	10,53	11,23
T1	d2	N2	3	13,14	12,90	10,55	10,53	8,81	
T1	d2	N3	1	13,96	13,53	10,91	11,74	10,64	7,65
T1	d2	N3	1		11,94	11,22	8,59	10,70	9,48
T1	d2	N3	1		13,64	11,80	10,90	9,49	8,61
T1	d2	N3	2		11,93	10,29	9,28	8,29	8,89
T1	d2	N3	2		14,07	11,23	9,09	9,77	8,17
T1	d2	N3	2		13,39	10,78	10,76	11,70	8,38
T1	d2	N3	3		12,97	12,85	11,00	12,07	9,13
T1	d2	N3	3		13,46	10,98	9,72	12,82	9,22
T1	d2	N3	3	14,14	13,92	8,58	10,74	9,50	
T2	d1	N1	1	13,97	15,93	13,51	11,74	11,62	10,99

T2	d1	N1	1		13,29	12,39	11,86	8,21	11,67
T2	d1	N1	1		13,33	12,94	11,64	8,47	11,70
T2	d1	N1	2		16,78	13,70	12,83	9,78	10,56
T2	d1	N1	2		13,84	13,14	11,05	8,96	10,00
T2	d1	N1	2		15,09	12,43	12,22	7,34	10,56
T2	d1	N1	3		13,10	13,51	12,09	8,47	9,18
T2	d1	N1	3		13,78	11,11	11,48	10,55	11,05
T2	d1	N1	3		11,11	13,26	12,71	11,70	8,00
T2	d1	N2	1		13,98	14,55	11,66	12,82	10,09
T2	d1	N2	1	14,78		13,19	10,63	10,53	11,63
T2	d1	N2	1	14,40		12,88	10,95	9,95	11,59
T2	d1	N2	2	16,59		13,27	11,73	10,11	10,47
T2	d1	N2	2	12,50		14,48	12,79	8,21	10,50
T2	d1	N2	2	16,29		13,33	10,47	9,38	11,61
T2	d1	N2	3	14,89		14,02	10,33	11,73	9,43
T2	d1	N2	3	13,41		13,19	11,96	11,11	10,05
T2	d1	N2	3	12,21		14,01	10,16	10,00	11,90
T2	d1	N3	1	13,96	14,53	12,07	11,62	11,32	11,28
T2	d1	N3	1		15,57	12,89	11,11	11,64	11,67
T2	d1	N3	1		13,04	14,44	12,18	11,49	9,60
T2	d1	N3	2		17,86	13,75	11,70	11,93	8,65
T2	d1	N3	2		14,84	13,18	8,95	11,17	10,22
T2	d1	N3	2		14,98	13,21	11,06	8,33	11,43
T2	d1	N3	3		15,89	12,39	10,26	11,58	11,22
T2	d1	N3	3		15,57	12,78	11,05	9,45	10,33
T2	d1	N3	3		13,51	13,79	12,30	9,81	10,58
T2	d2	N1	1	13,97	13,71	13,45	11,16	9,18	10,12
T2	d2	N1	1		11,52	12,04	10,33	11,73	10,05
T2	d2	N1	1		10,53	14,00	11,70	9,20	10,61
T2	d2	N1	2		13,64	12,89	10,58	5,23	9,91
T2	d2	N1	2		13,90	8,88	10,42	10,10	8,78
T2	d2	N1	2		14,11	13,51	11,85	7,32	9,50
T2	d2	N1	3		15,73	10,61	11,70	6,74	9,00
T2	d2	N1	3		14,62	12,63	11,73	6,03	10,00
T2	d2	N1	3		13,33	9,57	9,33	8,82	10,00
T2	d2	N2	1	13,98	12,77	14,44	10,55	7,09	10,30
T2	d2	N2	1		14,20	11,43	10,45	8,24	10,92
T2	d2	N2	1		13,57	12,08	11,06	8,95	9,60
T2	d2	N2	2		15,38	12,50	11,73	9,15	8,16
T2	d2	N2	2		14,19	14,43	10,16	9,69	9,60
T2	d2	N2	2		14,97	14,12	10,55	9,47	10,42
T2	d2	N2	3		14,89	11,60	11,05	9,04	9,76
T2	d2	N2	3		10,53	14,29	11,06	8,08	11,40
T2	d2	N2	3		15,50	11,76	10,09	12,57	9,95
T2	d2	N3	1	13,96	13,42	10,96	11,11	11,35	8,50
T2	d2	N3	1		11,56	11,47	11,30	11,43	9,14
T2	d2	N3	1		13,75	14,14	10,53	10,81	9,62
T2	d2	N3	2		12,31	13,95	12,75	11,34	8,75
T2	d2	N3	2		13,01	14,97	9,09	10,55	9,70
T2	d2	N3	2		16,09	14,75	9,74	11,05	10,06
T2	d2	N3	3		12,81	14,79	9,78	8,20	10,45
T2	d2	N3	3		12,77	14,20	12,22	11,17	9,50
T2	d2	N3	3		15,34	12,67	11,11	9,47	8,59

**Tableau A-1-1' : Récapitulatif des valeurs moyennes de l'humidité du sol (%) en fonction de la technique et de la profondeur pour la culture du sorgho fourrager**

Techniques	Humidité du sol en %					
	Technique conventionnelle			Semis direct		
	N1 0-10 cm	N2 10-20 cm	N3 20-30 cm	N1 0-10 cm	N2 10-20 cm	N3 20-30 cm
<b>Au semis</b>	13,96	13,92	13,96	13,97	13,98	13,96
<b>8 jours</b>	12,66	13,40	13,99	14,03	14,40	15,09
<b>15 jours</b>	9,78	11,82	11,34	12,89	13,34	13,17
<b>22 jours</b>	10,80	10,87	11,19	11,96	11,32	11,14
<b>29 jours</b>	10,49	11,19	11,54	9,45	10,12	10,75
<b>36 jours</b>	9,15	10,17	10,58	10,41	10,78	10,55
<b>Moyenne</b>	<b>11,14</b>	<b>11,90</b>	<b>12,10</b>	<b>12,12</b>	<b>12,32</b>	<b>12,44</b>

**Tableau A-2 : Variation de l'humidité du sol-Blé**

T	D	Pr	B	Au semis	8 jours	22 jours	36 jours	60 jours	90 jours	120 jours	150 jours
T1	d1	N1	1	16,56	21,55	21,00	16,02	19,89	20,21	21,51	21,13
T1	d1	N1	1		16,77	18,75	14,36	15,06	18,13	16,87	16,67
T1	d1	N1	1		21,88	18,87	15,74	20,00	19,80	21,82	21,39
T1	d1	N1	2		24,26	18,06	13,99	22,41	17,31	24,14	23,63
T1	d1	N1	2		20,13	21,00	16,46	18,18	20,79	20,13	19,75
T1	d1	N1	2		14,09	21,25	16,18	12,34	20,40	14,29	14,20
T1	d1	N1	3		18,82	21,18	13,59	17,14	17,09	18,86	18,58
T1	d1	N1	3		18,01	20,00	13,00	16,27	16,18	18,07	17,82
T1	d1	N1	3		19,64	20,18	16,32	17,92	20,60	19,65	19,34
T1	d1	N1	4		19,05	19,07	14,42	17,34	18,08	19,08	18,78
T1	d1	N1	4		18,75	19,49	10,95	16,97	13,44	18,79	18,50
T1	d1	N1	4		14,67	18,31	12,93	12,90	15,92	14,84	14,72
T1	d1	N2	1	16,6	20,00	17,32	15,43	18,06	19,62	20,00	19,63
T1	d1	N2	1		20,13	19,70	14,08	18,29	17,58	20,12	19,77
T1	d1	N2	1		17,98	21,30	17,43	16,39	22,22	18,03	17,80
T1	d1	N2	2		20,33	19,35	16,67	18,72	21,34	20,32	20,00
T1	d1	N2	2		20,40	21,26	18,82	18,93	24,67	20,39	20,09
T1	d1	N2	2		22,63	22,50	14,77	21,03	18,79	22,56	22,17
T1	d1	N2	3		16,57	21,76	13,66	15,05	17,20	16,67	16,49
T1	d1	N2	3		21,97	20,83	15,83	20,22	19,90	21,91	21,51
T1	d1	N2	3		22,81	21,80	16,74	21,02	21,21	22,73	22,28
T1	d1	N2	4		17,95	21,35	14,22	16,50	17,78	18,00	17,79
T1	d1	N2	4		20,53	20,48	13,48	18,97	16,67	20,51	20,20
T1	d1	N2	4		22,35	20,31	13,57	20,65	16,96	22,28	21,88
T1	d1	N3	1	16,74	17,98	20,10	15,00	16,39	18,82	18,03	17,80
T1	d1	N3	1		19,77	20,31	11,93	18,13	15,79	19,78	19,47
T1	d1	N3	1		18,54	22,17	15,04	16,94	18,75	18,58	18,32
T1	d1	N3	2		20,83	20,00	11,00	19,08	14,77	20,81	20,44
T1	d1	N3	2		20,57	20,56	13,13	18,89	16,37	20,56	20,21
T1	d1	N3	2		16,23	20,00	13,50	14,80	16,86	16,33	16,18
T1	d1	N3	3		20,11	19,80	15,25	18,48	19,15	20,11	19,79
T1	d1	N3	3		15,34	22,51	15,57	13,92	19,66	15,46	15,35
T1	d1	N3	3		19,35	21,35	12,38	17,80	15,30	19,37	19,10
T1	d1	N3	4		21,28	19,77	13,76	19,69	17,28	21,24	20,90
T1	d1	N3	4		17,37	21,93	14,71	15,90	18,50	17,44	17,24
T1	d1	N3	4		16,57	22,28	13,99	15,05	17,58	16,67	16,49
T1	d2	N1	1	16,56	21,21	16,48	13,64	17,30	20,77	22,70	22,22
T1	d2	N1	1		20,73	20,13	13,30	12,12	18,97	18,18	17,75

T1	d2	N1	1	16,6	18,47	19,35	11,65	17,07	20,38	23,17	22,62
T1	d2	N1	2		21,08	14,21	13,57	19,65	18,02	25,43	24,86
T1	d2	N1	2		23,13	21,13	14,75	15,03	21,30	21,57	21,02
T1	d2	N1	2		22,38	21,18	13,85	15,17	20,93	15,69	15,29
T1	d2	N1	3		20,12	19,73	13,00	14,37	18,02	20,11	19,66
T1	d2	N1	3		19,38	18,52	12,32	13,33	17,11	19,39	18,93
T1	d2	N1	3		19,76	16,00	12,73	15,12	21,13	20,93	20,45
T1	d2	N1	4		20,96	21,08	13,51	14,53	18,85	20,35	19,89
T1	d2	N1	4		20,12	16,00	12,90	14,02	14,50	20,12	19,64
T1	d2	N1	4		24,26	16,84	14,81	15,75	16,74	16,23	15,82
T1	d2	N2	1		25,17	22,45	15,79	14,94	20,35	21,43	20,89
T1	d2	N2	1		24,68	21,05	15,67	15,34	18,37	21,47	20,96
T1	d2	N2	1	25,29	22,11	16,31	13,74	22,64	19,23	18,82	
T1	d2	N2	2	25,58	21,52	16,53	16,13	21,91	21,51	21,05	
T1	d2	N2	2	20,00	19,87	13,46	16,59	25,00	21,46	21,05	
T1	d2	N2	2	22,87	20,29	15,14	18,56	19,63	23,71	23,23	
T1	d2	N2	3	21,47	21,23	14,04	12,43	18,13	17,84	17,46	
T1	d2	N2	3	22,99	21,58	14,96	17,51	20,47	23,16	22,65	
T1	d2	N2	3	22,94	21,39	14,85	18,29	21,70	24,00	23,46	
T1	d2	N2	4	22,75	20,12	15,08	14,07	18,56	19,10	18,72	
T1	d2	N2	4	20,51	19,25	13,73	16,49	17,45	21,65	21,21	
T1	d2	N2	4	20,34	18,24	13,30	18,03	17,84	23,50	22,99	
T1	d2	N3	1	19,43	22,86	12,66	13,74	19,50	19,23	18,82	
T1	d2	N3	1	19,77	17,11	12,93	15,47	17,43	20,99	20,54	
T1	d2	N3	1	17,98	21,83	11,74	14,29	19,37	19,78	19,35	
T1	d2	N3	2	18,34	19,38	11,82	16,28	16,67	22,09	21,59	
T1	d2	N3	2	20,34	16,88	13,30	16,20	17,30	21,79	21,31	
T1	d2	N3	2	20,54	19,25	13,58	12,31	17,74	17,44	17,09	
T1	d2	N3	3	20,11	19,77	13,19	15,85	19,80	21,31	20,86	
T1	d2	N3	3	21,79	22,16	14,29	11,40	20,31	16,58	16,24	
T1	d2	N3	3	19,46	18,02	12,86	15,26	16,24	20,53	20,10	
T1	d2	N3	4	24,29	20,53	15,83	17,19	18,18	22,40	21,94	
T1	d2	N3	4	23,89	22,22	15,64	13,40	19,25	18,56	18,18	
T1	d2	N3	4	21,26	24,20	13,85	12,43	18,44	17,84	17,46	
T2	d1	N1	1	16,66	18,13	23,59	17,07	20,90	22,81	24,75	21,52
T2	d1	N1	1		28,76	22,22	15,76	22,30	17,88	23,64	21,02
T2	d1	N1	1		24,32	23,12	16,80	20,43	23,33	24,26	18,67
T2	d1	N1	2		21,29	20,48	15,12	21,39	25,79	21,60	21,38
T2	d1	N1	2		16,46	24,02	17,44	19,10	21,58	25,12	23,53
T2	d1	N1	2		22,08	23,65	17,19	18,10	15,11	24,76	22,79
T2	d1	N1	3		18,75	21,25	15,08	17,88	20,00	22,70	20,37
T2	d1	N1	3		21,43	20,00	14,42	19,75	19,21	21,35	19,61
T2	d1	N1	3		28,48	23,88	17,32	18,78	20,89	25,00	20,00
T2	d1	N1	4		20,89	21,79	15,70	21,56	20,25	23,08	21,25
T2	d1	N1	4		23,91	17,02	12,44	19,19	20,00	18,32	20,38
T2	d1	N1	4		14,94	19,21	14,17	17,89	15,71	20,39	24,81
T2	d1	N2	1	16,71	22,16	23,75	16,75	19,74	21,43	25,15	25,69
T2	d1	N2	1		27,78	21,20	15,35	22,94	21,48	22,46	25,17
T2	d1	N2	1		27,88	25,50	18,36	21,24	19,05	26,60	25,77
T2	d1	N2	2		16,76	25,30	17,84	19,02	21,51	26,63	26,06
T2	d1	N2	2		22,41	28,95	19,90	19,61	21,47	30,32	20,21
T2	d1	N2	2		22,28	23,18	16,23	22,63	23,89	24,68	23,20
T2	d1	N2	3		20,10	21,38	15,15	21,77	17,54	22,84	21,76
T2	d1	N2	3		25,52	23,15	16,86	21,35	23,31	24,27	23,35
T2	d1	N2	3		20,21	24,50	17,72	21,81	24,22	25,62	23,31
T2	d1	N2	4		25,38	21,43	15,49	21,30	18,92	22,70	23,08
T2	d1	N2	4		22,68	20,00	14,69	20,32	21,67	21,18	20,74
T2	d1	N2	4		27,37	20,81	14,95	18,02	23,67	22,16	20,59

T2	d1	N3	1	16,56	16,24	22,34	16,17	17,93	19,05	23,56	19,64
T2	d1	N3	1		26,46	22,68	14,52	19,46	20,96	25,00	20,00
T2	d1	N3	1		21,83	21,90	16,09	21,00	19,64	23,00	18,13
T2	d1	N3	2		22,77	22,22	13,91	17,29	22,15	24,73	18,52
T2	d1	N3	2		20,94	20,23	14,55	20,38	21,82	21,59	20,59
T2	d1	N3	2		29,14	20,69	14,88	19,75	17,13	22,03	20,79
T2	d1	N3	3		24,71	22,63	16,39	20,22	21,30	23,83	20,35
T2	d1	N3	3		18,82	23,33	16,74	20,47	16,20	24,59	22,09
T2	d1	N3	3		24,19	18,92	13,78	19,88	20,45	20,21	19,66
T2	d1	N3	4		25,14	21,34	15,20	16,46	22,47	22,75	24,71
T2	d1	N3	4		11,52	22,29	15,98	19,05	18,33	23,60	24,28
T2	d1	N3	4		16,28	21,56	15,38	22,36	17,54	22,94	21,56
T2	d2	N1	1	16,66	18,24	21,05	17,28	20,83	21,76	24,44	22,58
T2	d2	N1	1		23,56	22,36	16,08	20,36	20,00	20,00	22,08
T2	d2	N1	1		21,05	23,71	13,95	18,13	21,32	25,16	19,73
T2	d2	N1	2		24,72	21,50	15,14	20,71	18,75	27,38	22,44
T2	d2	N1	2		19,29	25,25	15,29	22,70	22,28	23,65	24,67
T2	d2	N1	2		28,14	25,11	18,03	21,92	21,89	17,57	24,06
T2	d2	N1	3		24,23	21,25	16,59	19,77	18,99	21,89	21,38
T2	d2	N1	3		23,56	20,00	14,35	19,02	17,92	21,25	20,67
T2	d2	N1	3		28,57	25,00	14,69	19,41	22,11	22,75	21,02
T2	d2	N1	4		29,51	21,67	15,81	20,59	19,77	22,16	22,29
T2	d2	N1	4		23,21	19,46	16,03	19,76	15,05	22,01	21,43
T2	d2	N1	4		22,38	18,23	15,81	23,74	17,41	18,12	26,19
T2	d2	N2	1	16,71	24,85	23,75	16,34	24,68	21,52	23,49	26,95
T2	d2	N2	1		26,49	22,95	17,50	24,22	19,23	23,42	26,35
T2	d2	N2	1		27,98	21,36	19,68	24,86	23,74	20,90	26,88
T2	d2	N2	2		17,54	25,00	18,72	25,14	23,17	23,20	27,16
T2	d2	N2	2		21,67	24,38	15,58	19,70	26,67	23,00	21,05
T2	d2	N2	2		29,57	22,67	15,82	22,51	20,81	25,40	24,16
T2	d2	N2	3		23,32	21,88	17,07	21,11	19,11	19,44	22,75
T2	d2	N2	3		25,14	24,50	15,03	22,60	21,39	25,00	24,39
T2	d2	N2	3		21,11	21,89	17,33	22,54	22,73	25,88	24,38
T2	d2	N2	4		26,67	21,43	15,20	22,40	19,44	20,62	24,02
T2	d2	N2	4		25,43	20,50	17,59	20,20	18,18	23,28	21,62
T2	d2	N2	4		28,00	26,59	18,71	20,00	18,71	25,28	21,56
T2	d2	N3	1	16,56	22,62	24,60	18,01	19,10	20,43	20,90	20,61
T2	d2	N3	1		22,41	23,73	15,89	19,44	18,95	22,73	20,96
T2	d2	N3	1		31,41	22,27	18,40	17,68	20,19	21,47	19,05
T2	d2	N3	2		30,43	20,00	17,82	18,02	18,18	23,95	19,50
T2	d2	N3	2		31,82	20,59	16,28	20,00	18,13	23,56	21,56
T2	d2	N3	2		21,13	20,00	17,78	20,21	18,60	18,95	21,71
T2	d2	N3	3		18,50	25,00	16,59	19,78	20,74	23,03	21,30
T2	d2	N3	3		16,28	22,65	18,18	21,43	21,35	18,09	23,08
T2	d2	N3	3		18,72	20,11	18,83	19,15	16,94	22,16	20,57
T2	d2	N3	4		17,50	22,70	14,86	23,89	19,14	24,06	25,75
T2	d2	N3	4		24,57	22,03	16,89	23,50	20,23	20,11	25,29
T2	d2	N3	4		16,67	26,04	18,78	20,90	19,39	19,44	22,56

**Tableau A-2-2'**: Récapitulatif des valeurs moyennes de l'humidité du sol (%) en fonction de la technique et de la profondeur pour la culture du blé dur.

Techniques	Humidité du sol en %					
	Technique conventionnelle			Semis direct		
	N1 0-10 cm	N2 10-20 cm	N3 20-30 cm	N1 0-10 cm	N2 10-20 cm	N3 20-30 cm
<b>Au semis</b>	16,56	16,6	16,74	16,66	16,71	16,56

<b>8 jours</b>	18,97	20,30	18,66	22,38	22,29	21,58
<b>22 jours</b>	19,76	20,66	20,90	22,31	22,54	22,05
<b>36 jours</b>	14,50	15,39	13,77	15,24	16,37	15,89
<b>60 jours</b>	17,20	18,65	17,09	15,94	20,61	18,94
<b>90 jours</b>	18,16	19,50	17,40	19,10	22,02	19,29
<b>120 jours</b>	19,00	20,29	18,70	20,64	23,72	23,32
<b>150 jours</b>	18,71	19,97	18,44	19,58	21,13	20,86
<b>Moyenne</b>	<b>17,87</b>	<b>18,93</b>	<b>17,70</b>	<b>18,98</b>	<b>20,67</b>	<b>19,82</b>

Tableau A-3 : Variation de l'humidité du sol-bersim

Technique	Dose	Profondeur	Bloc	Au semis	8 jours	38 jours	68 jours	90 jours
T1	d1	N1	1	36,95	18,52	17,67	18,71	21,68
T1	d1	N1	2		10,80	14,89	21,01	18,41
T1	d1	N1	3		18,15	19,35	20,83	18,76
T1	d1	N1	4		9,84	16,20	21,94	18,24
T1	d1	N2	1	36,69	15,34	20,00	18,76	19,51
T1	d1	N2	2		9,44	15,83	20,17	19,98
T1	d1	N2	3		15,58	20,91	20,06	18,09
T1	d1	N2	4		12,05	17,99	21,93	17,18
T1	d1	N3	1	36,84	13,41	19,01	18,96	19,86
T1	d1	N3	2		13,56	12,52	19,55	20,85
T1	d1	N3	3		13,49	20,92	20,02	17,00
T1	d1	N3	4		12,31	18,36	17,44	17,19
T1	d2	N1	1	36,95	10,25	16,59	19,37	17,08
T1	d2	N1	2		6,29	12,89	19,11	17,40
T1	d2	N1	3		6,07	17,97	20,16	16,58
T1	d2	N1	4		17,78	17,53	20,10	18,93
T1	d2	N2	1	36,69	13,11	18,35	19,62	19,06
T1	d2	N2	2		10,66	15,81	20,02	18,26
T1	d2	N2	3		11,14	21,26	18,97	17,81
T1	d2	N2	4		14,06	18,10	20,43	18,56
T1	d2	N3	1	36,84	11,95	18,20	19,30	18,92
T1	d2	N3	2		11,66	19,29	20,47	17,29
T1	d2	N3	3		10,11	19,73	19,11	16,99
T1	d2	N3	4		14,36	18,96	21,24	18,30
T2	d1	N1	1	38,77	10,25	16,59	19,37	17,08
T2	d1	N1	2		16,00	14,51	17,63	18,24
T2	d1	N1	3		9,74	20,57	20,02	18,62
T2	d1	N1	4		10,96	18,19	23,30	18,81
T2	d1	N2	1	42,12	10,64	15,98	16,59	17,78
T2	d1	N2	2		15,19	13,60	17,19	18,32
T2	d1	N2	3		10,87	19,24	20,97	17,72
T2	d1	N2	4		9,57	17,69	20,80	19,66
T2	d1	N3	1	39,54	11,03	16,52	19,85	17,75
T2	d1	N3	2		16,36	14,35	20,04	18,12
T2	d1	N3	3		10,04	20,37	21,35	15,06
T2	d1	N3	4		14,62	18,95	21,30	17,86
T2	d2	N1	1	38,77	13,16	7,81	18,77	18,09
T2	d2	N1	2		10,03	14,02	23,02	18,90
T2	d2	N1	3		14,16	18,98	19,55	18,09
T2	d2	N1	4		16,50	16,99	19,88	17,21
T2	d2	N2	1	42,12	13,25	12,60	19,68	18,17
T2	d2	N2	2		10,44	17,19	20,74	25,25
T2	d2	N2	3		8,77	19,21	19,16	17,85
T2	d2	N2	4		12,64	18,12	20,47	17,66

T2	d2	N3	1	39,54	16,29	16,13	20,06	18,09
T2	d2	N3	2		12,13	15,49	15,80	13,99
T2	d2	N3	3		11,91	19,75	19,75	24,67
T2	d2	N3	4		15,37	17,97	20,11	17,13

**Tableau A-3-3'** : Récapitulatif des valeurs moyennes de l'humidité du sol (%) en fonction de la technique et de la profondeur pour la culture du bersim.

Techniques	Humidité du sol en %					
	Technique conventionnelle			Semis direct		
	N1 0-10 cm	N2 10-20 cm	N3 20-30 cm	N1 0-10 cm	N2 10-20 cm	N3 20-30 cm
<b>Au semis</b>	13,08					
<b>8 jours</b>	14,33	13,10	13,19	11,74	11,57	13,01
<b>38 jours</b>	17,03	18,68	17,70	17,47	16,63	17,55
<b>68 jours</b>	20,62	20,23	18,99	20,08	18,89	20,63
<b>90 jours</b>	19,27	18,69	18,72	18,19	18,37	17,20
<b>Moyenne</b>	<b>16,87</b>	<b>16,76</b>	<b>16,34</b>	<b>16,11</b>	<b>15,71</b>	<b>16,29</b>

**Tableau B-1** : variation de la porosité du sol en % -sorgho fourrager  
 $V_c=217,79 \text{ cm}^3$   
 $d_r=2,42 \text{ g/cm}^3$

T	D	Pr (cm)	B	Au semis	8 jours	15 jours	22 jours	29 jours
T1	d1	N1	1	38,40	32,83	26,82	31,19	32,52
T1	d1	N1	2	37,58	33,34	27,21	30,62	32,64
T1	d1	N1	3	35,87	33,91	24,18	28,91	31,00
T1	d1	N2	1	37,58	31,57	27,27	29,92	30,68
T1	d1	N2	2	34,79	34,23	30,75	31,19	33,09
T1	d1	N2	3	37,77	32,96	32,45	30,24	33,97
T1	d1	N3	1	36,76	32,77	25,64	30,05	30,11
T1	d1	N3	2	34,67	33,59	26,25	29,17	27,14
T1	d1	N3	3	36,31	32,64	26,65	29,04	31,51
T1	d2	N1	1	37,07	30,24	37,51	28,85	32,20
T1	d2	N1	2	39,03	32,14	29,80	32,14	30,24
T1	d2	N1	3	33,97	34,54	32,45	28,34	31,13
T1	d2	N2	1	36,82	33,34	35,87	24,10	34,23
T1	d2	N2	2	32,71	31,76	32,83	27,27	31,11
T1	d2	N2	3	36,19	32,90	29,92	25,45	33,97
T1	d2	N3	1	33,85	31,13	30,37	31,38	30,24
T1	d2	N3	2	35,55	29,61	35,17	31,19	33,40
T1	d2	N3	3	36,00	30,18	34,04	32,26	31,06
T2	d1	N1	1	35,05	30,75	26,76	27,58	28,28
T2	d1	N1	2	33,32	31,51	31,57	26,95	27,58
T2	d1	N1	3	33,21	29,29	28,53	26,70	27,21
T2	d1	N2	1	32,71	28,28	27,27	27,14	29,10
T2	d1	N2	2	33,34	28,22	29,55	25,50	27,96
T2	d1	N2	3	33,72	28,66	29,55	27,90	29,42
T2	d1	N3	1	33,78	28,60	26,13	29,99	27,39
T2	d1	N3	2	33,91	25,62	27,77	26,45	28,79
T2	d1	N3	3	29,55	25,75	27,46	27,39	29,10
T2	d2	N1	1	33,34	28,62	30,75	27,14	26,57
T2	d2	N1	2	31,13	30,75	30,87	28,85	29,61
T2	d2	N1	3	31,00	33,91	26,45	27,58	28,79
T2	d2	N2	1	32,20	30,75	26,45	30,18	25,94
T2	d2	N2	2	34,98	29,99	27,46	27,08	29,73
T2	d2	N2	3	28,66	30,11	28,41	25,37	28,28

T2	d2	N3	1	35,11	30,37	28,53	27,39	27,39
T2	d2	N3	2	31,38	27,46	28,72	28,09	26,07
T2	d2	N3	3	30,56	28,22	27,46	26,38	28,91

**Tableau B-1-1' :** Récapitulatif des valeurs moyennes de la porosité (%) en fonction de la technique et de la profondeur pour la culture du sorgho fourrager.

Techniques	Porosité du sol en %					
	Technique conventionnelle			Semis direct		
	N1 0-10 cm	N2 10-20 cm	N3 20-30 cm	N1 0-10 cm	N2 10-20 cm	N3 20-30 cm
Au semis	37,11	37,24	37,05	36,42	28,53	28,28
8 jours	36,71	37,28	35,91	33,86	33,26	32,41
15 jours	32,92	33,36	33	30,51	28,39	26,66
22 jours	30,16	26,07	26,18	28,95	28,79	27,12
29 jours	30,45	30,24	29,42	27,08	26,85	27,94
36 jours	32,58	32,05	29,59	27,69	28,83	28,43
Moyenne	<b>32,71</b>	<b>33,32</b>	<b>31,86</b>	<b>30,75</b>	<b>29,11</b>	<b>28,47</b>

**Tableau B-2 :** variation de la porosité du sol en % -blé

$V_c=96 \text{ cm}^3$        $dr=2,42 \text{ g/cm}^3$

T	D	Pr (cm)	B	Au semis	8 jours	22 jours	36 jours	60 jours	90 jours	120 jours
T1	d1	N1	1	45,10	35,45	32,28	40,72	45,25	34,54	36,50
T1	d1	N1	2	45,25	28,36	25,34	30,77	49,32	27,45	45,25
T1	d1	N1	3	47,66	37,70	34,54	40,72	45,55	36,80	34,39
T1	d1	N1	4	45,40	33,79	30,62	38,76	47,96	32,88	35,14
T1	d1	N2	1	39,67	36,80	33,79	40,27	46,91	35,90	41,93
T1	d1	N2	2	37,56	45,55	42,38	47,51	37,10	44,65	48,56
T1	d1	N2	3	32,28	34,84	31,67	38,76	42,53	33,79	34,84
T1	d1	N2	4	33,79	35,60	32,43	38,76	38,16	34,69	40,57
T1	d1	N3	1	32,28	42,38	39,37	33,94	41,78	41,48	34,69
T1	d1	N3	2	36,95	49,32	46,15	47,51	41,48	48,26	27,75
T1	d1	N3	3	38,91	35,75	32,58	39,52	39,22	34,54	37,10
T1	d1	N3	4	37,10	41,33	38,16	43,44	38,61	40,27	33,18
T1	d2	N1	1	38,01	36,80	40,88	42,68	36,20	42,23	38,76
T1	d2	N1	2	37,10	27,45	32,58	44,65	29,11	46,16	29,56
T1	d2	N1	3	33,48	37,86	36,80	41,48	38,46	42,53	40,12
T1	d2	N1	4	34,84	34,24	33,03	44,79	34,54	44,95	36,05
T1	d2	N2	1	39,52	36,35	43,74	43,44	37,56	43,74	38,46
T1	d2	N2	2	37,71	44,64	44,04	33,93	46,30	33,94	46,61
T1	d2	N2	3	36,05	34,84	41,93	38,61	35,44	39,52	37,11
T1	d2	N2	4	40,42	35,60	44,80	33,94	36,35	34,99	37,86
T1	d2	N3	1	42,23	33,33	39,07	37,56	43,29	38,61	33,79
T1	d2	N3	2	30,92	48,26	38,46	37,41	49,92	38,46	46,46
T1	d2	N3	3	26,55	36,20	37,25	35,90	36,20	36,05	38,31
T1	d2	N3	4	26,55	38,76	36,35	36,20	39,22	34,99	40,72
T2	d1	N1	1	31,07	39,22	35,44	36,05	39,82	34,99	41,18
T2	d1	N1	2	33,48	41,03	36,35	37,41	41,93	35,60	42,99
T2	d1	N1	3	35,74	36,65	35,75	36,65	38,46	35,75	39,22
T2	d1	N1	4	37,40	36,80	38,76	38,61	39,97	38,31	37,26
T2	d1	N2	1	41,78	31,82	35,90	39,97	36,20	39,97	34,99
T2	d1	N2	2	43,14	30,01	34,09	41,33	34,39	41,33	34,84
T2	d1	N2	3	44,49	25,04	29,26	42,84	29,56	42,84	35,29
T2	d1	N2	4	45,70	21,72	28,81	44,20	29,11	44,20	36,95

T2	d1	N3	1	45,55	27,00	34,69	44,04	34,84	44,04	36,65
T2	d1	N3	2	44,19	30,92	38,01	42,53	38,16	42,53	36,65
T2	d1	N3	3	42,08	33,48	38,16	40,27	38,46	40,27	33,79
T2	d1	N3	4	42,38	30,77	35,90	40,57	36,35	40,57	33,94
T2	d2	N1	1	42,53	29,56	34,39	40,72	34,84	40,72	33,48
T2	d2	N1	2	44,64	30,17	34,24	42,83	34,54	42,83	37,10
T2	d2	N1	3	46,75	31,83	36,50	44,94	36,65	44,94	39,06
T2	d2	N1	4	46,91	31,52	36,95	45,10	37,10	45,10	39,67
T2	d2	N2	1	43,59	31,22	37,26	41,78	37,56	41,78	35,75
T2	d2	N2	2	39,82	30,47	36,50	38,01	36,95	38,01	33,18
T2	d2	N2	3	34,84	33,18	40,27	33,18	40,72	33,18	28,36
T2	d2	N2	4	33,48	39,67	46,00	31,83	46,30	31,83	26,24
T2	d2	N3	1	33,63	41,48	46,76	31,98	47,06	31,98	25,79
T2	d2	N3	2	36,95	36,65	40,87	35,14	41,02	35,14	28,81
T2	d2	N3	3	39,06	30,77	35,14	37,40	35,44	37,40	30,92
T2	d2	N3	4	37,41	28,21	32,58	35,75	32,88	35,75	29,41

**Tableau B-2-2' :** Récapitulatif des valeurs moyennes de la porosité (%) en fonction de la technique et de la profondeur pour la culture du blé dur.

Techniques	Porosité du sol en %					
	Technique conventionnelle			Semis direct		
	N1 0-10 cm	N2 10-20 cm	N3 20-30 cm	N1 0-10 cm	N2 10-20 cm	N3 20-30 cm
<b>Au semis</b>	35,14	44,25	37,25	47,85	38,25	46,32
<b>8 jours</b>	34,43	43,78	36,31	45,85	35,82	43,55
<b>22 jours</b>	38,43	27,15	42,2	33,82	38,2	30,54
<b>36 jours</b>	36,58	32,01	39,07	30,69	35,07	36,69
<b>60 jours</b>	37,18	42,08	41,1	37,75	41,33	41,86
<b>90 jours</b>	40,04	32,31	40,27	47,02	41,18	36,95
<b>120 jours</b>	36,16	42,08	41,14	32,92	37,26	41,86
<b>150 jours</b>	40,16	35,52	33,18	37,82	41,48	35,26
<b>Moyenne</b>	<b>37,27</b>	<b>37,40</b>	<b>38,82</b>	<b>39,22</b>	<b>38,57</b>	<b>39,13</b>

**Tableau B-3 :** variation de la porosité du sol en %-bersim

$V_c = 135,05 \text{ cm}^3$        $d_r = 2,42 \text{ g/cm}^3$

T	D	Pr (cm)	B	Au semis	8 jours	38 jours	68 jours
T1	d1	N1	1	37,05	43,81	47,23	55,29
T1	d1	N1	2	39,77	51,70	44,18	58,52
T1	d1	N1	3	38,29	46,10	38,39	57,59
T1	d1	N1	4	28,52	42,44	54,74	65,59
T1	d1	N2	1	37,27	40,98	41,70	47,82
T1	d1	N2	2	37,96	43,22	36,92	55,56
T1	d1	N2	3	37,95	38,88	37,05	50,01
T1	d1	N2	4	32,05	40,13	46,97	63,01
T1	d1	N3	1	36,36	39,24	36,96	43,34
T1	d1	N3	2	39,09	39,20	38,02	39,61
T1	d1	N3	3	36,02	38,42	37,84	49,25
T1	d1	N3	4	31,93	39,80	45,30	54,13
T1	d2	N1	1	29,44	45,00	43,18	58,00
T1	d2	N1	2	37,83	48,84	46,76	59,37
T1	d2	N1	3	38,63	40,77	43,00	57,70
T1	d2	N1	4	36,82	42,97	53,24	50,72
T1	d2	N2	1	30,57	37,18	35,05	50,05

T1	d2	N2	2	42,50	45,76	41,35	49,06
T1	d2	N2	3	42,84	41,89	39,61	51,57
T1	d2	N2	4	39,66	37,84	56,36	43,06
T1	d2	N3	1	38,18	39,68	36,33	45,95
T1	d2	N3	2	40,34	39,20	39,60	43,34
T1	d2	N3	3	39,89	37,39	42,83	44,48
T1	d2	N3	4	36,59	36,27	53,31	40,77
T2	d1	N1	1	29,44	45,00	43,18	58,00
T2	d1	N1	2	42,05	50,00	41,55	49,09
T2	d1	N1	3	40,57	48,41	46,37	46,22
T2	d1	N1	4	39,55	43,75	53,90	55,67
T2	d1	N2	1	41,36	43,53	37,15	40,99
T2	d1	N2	2	39,43	44,34	40,37	42,08
T2	d1	N2	3	41,37	38,75	40,28	41,89
T2	d1	N2	4	38,07	43,86	48,40	42,16
T2	d1	N3	1	32,73	39,12	34,50	42,28
T2	d1	N3	2	38,98	41,24	40,79	41,13
T2	d1	N3	3	32,16	38,64	39,08	43,10
T2	d1	N3	4	39,32	43,42	43,73	40,37
T2	d2	N1	1	45,34	45,91	38,98	41,86
T2	d2	N1	2	35,57	42,31	38,11	46,79
T2	d2	N1	3	35,68	38,73	47,71	44,23
T2	d2	N1	4	52,27	46,21	48,54	52,00
T2	d2	N2	1	36,48	40,95	40,53	42,74
T2	d2	N2	2	33,75	41,67	37,21	45,34
T2	d2	N2	3	35,69	37,72	44,69	39,22
T2	d2	N2	4	36,93	45,87	45,77	42,05
T2	d2	N3	1	45,46	41,06	38,24	40,85
T2	d2	N3	2	33,87	43,49	37,30	43,81
T2	d2	N3	3	33,75	38,28	42,64	39,80
T2	d2	N3	4	44,89	41,52	42,21	39,87

**Tableau B-3-3'**: Récapitulatif des valeurs moyennes de la porosité (%) en fonction de la technique et de la profondeur pour la culture du bersim.

Techniques	Porosité du sol en %					
	Technique conventionnelle			Semis direct		
	N1 0-10 cm	N2 10-20 cm	N3 20-30 cm	N1 0-10 cm	N2 10-20 cm	N3 20-30 cm
<b>Au semis</b>	36,95	36,69	36,84	38,77	42,12	39,54
<b>8 jours</b>	35,91	36,31	35,85	37,90	40,06	35,80
<b>38 jours</b>	46,01	40,80	39,17	46,79	42,62	40,61
<b>68 jours</b>	46,13	40,66	39,53	46,25	41,55	39,52
<b>90 jours</b>	59,25	54,10	46,58	52,24	41,78	41,72
<b>Moyenne</b>	<b>44,85</b>	<b>41,71</b>	<b>39,59</b>	<b>44,39</b>	<b>41,63</b>	<b>39,44</b>

**Tableau C-1** : Variation de la résistance à la pénétration en daN/cm<sup>2</sup>-sorgho fourrager

Technique	Dose	Bloc	Au semis	8 jours	15 jours	22 jours	29 jours
T1	D1	1	13,02	12,76	16,40	16,79	16,27
T1	D1	1	14,45	13,02	14,32	15,23	16,53
T1	D1	1	13,54	12,76	13,80	16,79	16,79
T1	D1	1	10,15	13,80	14,45	16,14	16,01
T1	D1	1	10,41	14,84	16,92	15,75	17,05
T1	D1	1	13,02	14,45	15,88	16,01	17,44
T1	D1	1	11,84	16,01	16,01	14,45	16,01

T1	D1	1	10,93	15,62	14,45	18,48	17,70
T1	D1	1	13,15	14,97	13,02	17,57	17,83
T1	D1	2	12,50	13,80	14,19	16,01	16,66
T1	D1	2	11,32	13,28	15,23	15,62	16,92
T1	D1	2	12,76	13,80	15,49	14,32	18,35
T1	D1	2	11,58	15,49	15,23	14,84	16,27
T1	D1	2	11,98	14,06	15,62	16,27	15,88
T1	D1	2	13,02	14,19	16,14	15,23	17,18
T1	D1	2	12,50	13,02	16,01	16,40	17,44
T1	D1	2	14,45	14,45	15,62	15,49	16,40
T1	D1	2	11,32	16,27	14,45	15,49	17,57
T1	D1	3	14,84	13,28	16,14	16,53	16,01
T1	D1	3	16,14	14,06	16,92	16,01	15,75
T1	D1	3	15,62	13,80	16,27	16,14	15,88
T1	D1	3	16,66	13,54	16,92	13,54	16,53
T1	D1	3	13,15	17,18	17,18	15,10	16,40
T1	D1	3	16,27	16,66	17,18	16,27	16,01
T1	D1	3	15,62	16,14	16,27	15,49	17,70
T1	D1	3	13,02	16,92	16,01	15,10	16,92
T1	D1	3	14,71	14,97	16,14	16,27	17,83
T1	D2	1	13,02	14,58	16,40	15,62	18,22
T1	D2	1	10,93	16,14	15,23	17,05	17,57
T1	D2	1	12,50	17,18	15,75	16,01	16,01
T1	D2	1	14,32	13,02	13,28	16,92	16,53
T1	D2	1	11,45	11,58	14,45	17,44	16,92
T1	D2	1	11,84	14,19	15,88	16,79	17,44
T1	D2	1	14,45	15,23	17,18	14,97	16,01
T1	D2	1	12,50	15,75	16,14	16,14	16,92
T1	D2	1	10,80	15,49	15,49	15,62	17,44
T1	D2	2	13,02	16,14	15,88	15,88	16,27
T1	D2	2	15,75	13,02	14,06	16,53	17,70
T1	D2	2	13,15	17,18	14,45	15,49	15,62
T1	D2	2	12,24	15,49	17,18	16,92	14,32
T1	D2	2	11,32	12,76	16,66	14,19	17,57
T1	D2	2	12,11	13,15	15,88	17,05	15,88
T1	D2	2	15,75	14,06	14,84	16,01	16,53
T1	D2	2	14,45	14,45	16,01	14,19	17,96
T1	D2	2	12,50	15,62	16,92	16,01	17,57
T1	D2	3	14,71	17,44	15,36	15,75	15,88
T1	D2	3	12,37	15,62	14,19	15,62	16,01
T1	D2	3	11,06	15,88	16,27	17,18	17,70
T1	D2	3	15,62	14,45	17,44	17,70	15,62
T1	D2	3	14,45	13,93	16,40	16,27	15,88
T1	D2	3	12,63	12,11	16,92	15,75	17,96
T1	D2	3	11,06	16,27	16,53	16,40	17,70
T1	D2	3	12,50	13,93	16,92	15,62	16,01
T1	D2	3	15,62	16,92	14,97	16,01	17,18
T2	D1	1	15,49	17,44	19,13	19,39	20,70
T2	D1	1	16,27	17,96	17,96	18,22	19,00
T2	D1	1	14,97	19,00	19,39	19,65	19,26
T2	D1	1	15,36	17,96	17,70	19,26	19,52

T2	D1	1	16,27	19,00	17,96	18,22	18,61
T2	D1	1	15,88	18,22	19,52	18,87	19,65
T2	D1	1	16,79	17,18	17,31	17,96	19,92
T2	D1	1	16,14	15,88	17,70	18,61	19,39
T2	D1	1	15,62	16,79	16,92	17,44	22,91
T2	D1	2	16,40	18,48	20,05	18,74	20,05
T2	D1	2	16,14	17,96	18,48	18,74	19,26
T2	D1	2	14,45	16,40	17,44	17,70	19,39
T2	D1	2	16,01	19,52	18,35	19,00	19,52
T2	D1	2	16,92	17,18	16,92	17,18	20,18
T2	D1	2	16,14	18,35	19,65	17,57	19,52
T2	D1	2	15,23	15,75	17,96	16,92	19,39
T2	D1	2	15,62	17,44	19,26	16,92	17,70
T2	D1	2	16,79	17,70	19,13	18,22	20,31
T2	D1	3	16,92	16,92	17,18	17,44	20,05
T2	D1	3	16,14	17,96	18,09	17,05	20,70
T2	D1	3	15,62	18,48	17,96	18,22	19,39
T2	D1	3	14,45	18,09	17,57	17,18	18,48
T2	D1	3	15,62	17,70	18,22	18,48	18,74
T2	D1	3	16,79	18,35	17,44	17,70	19,92
T2	D1	3	16,01	17,18	18,09	17,18	20,70
T2	D1	3	16,27	15,62	18,35	18,61	20,31
T2	D1	3	15,88	17,57	17,83	18,22	19,52
T2	D2	1	15,62	17,44	17,44	18,48	19,39
T2	D2	1	16,92	15,88	17,31	17,44	18,48
T2	D2	1	17,05	17,18	18,22	19,13	19,00
T2	D2	1	16,53	15,88	19,65	16,92	18,09
T2	D2	1	15,62	18,35	19,39	18,22	17,44
T2	D2	1	18,35	17,05	19,00	19,13	18,22
T2	D2	1	16,92	17,96	17,96	17,70	19,78
T2	D2	1	16,53	17,18	16,53	18,48	19,52
T2	D2	1	16,92	16,66	17,96	19,00	18,87
T2	D2	2	15,88	16,27	18,22	18,48	20,05
T2	D2	2	16,66	14,32	18,74	18,22	17,57
T2	D2	2	16,92	16,92	14,06	18,87	20,31
T2	D2	2	16,79	16,79	18,87	18,22	20,05
T2	D2	2	18,22	17,70	19,65	19,26	19,13
T2	D2	2	17,31	16,27	19,13	18,22	18,48
T2	D2	2	16,27	15,62	17,70	18,48	17,83
T2	D2	2	17,18	14,45	18,22	18,09	17,57
T2	D2	2	16,66	17,18	17,44	18,74	19,92
T2	D2	3	15,88	18,35	16,66	18,35	19,52
T2	D2	3	18,35	17,83	17,83	18,61	19,39
T2	D2	3	16,79	16,27	16,79	18,74	19,78
T2	D2	3	17,18	15,88	17,05	18,87	18,22
T2	D2	3	13,02	14,45	18,22	18,48	18,09
T2	D2	3	15,88	17,70	17,57	19,00	19,78
T2	D2	3	16,92	16,27	16,79	18,09	17,83
T2	D2	3	14,45	17,18	16,92	17,83	19,13
T2	D2	3	17,18	18,22	18,74	18,35	19,78

**Tableau C-1' : Moyenne de la résistance à la pénétration en daN/cm<sup>2</sup>-sorgho fourrager**

Technique	Dose	Bloc	Au semis	8 jours	15 jours	22 jours	29 jours
T1	d1	1	12,28	14,25	15,03	16,36	16,85
T1	d1	2	12,38	14,26	15,33	15,52	16,96
T1	d1	3	15,11	15,17	16,56	15,61	16,56
T1	d2	1	12,42	14,80	15,53	16,28	17,01
T1	d2	2	13,36	14,65	15,76	15,81	16,60
T1	d2	3	13,33	15,17	16,11	16,26	16,66
T2	d1	1	15,87	17,72	18,18	18,63	19,89
T2	d1	2	15,97	17,64	18,58	17,89	19,48
T2	d1	3	15,97	17,54	17,86	17,79	19,76
T2	d2	1	16,72	17,07	18,17	18,28	18,76
T2	d2	2	16,88	16,17	18,01	18,51	18,99
T2	d2	3	16,18	16,91	17,40	18,48	19,06

**Tableau C-1-1'-1''** : Récapitulatif des valeurs de la résistance pénétrométrique (daN/cm<sup>2</sup>) en fonction de la technique pour la culture du sorgho fourrager.

Techniques	Résistance pénétrométrique en daN/cm <sup>2</sup>	
	Technique conventionnelle	Semis direct
Au semis	14,24	16,35
8 jours	13,26	15,93
15 jours	14,56	17,63
22 jours	15,64	18,21
29 jours	15,83	18,10
36 jours	16,79	19,71
Moyenne	<b>15,05</b>	<b>17,66</b>

**Tableau C-2** : Variation de la résistance à la pénétration en daN/cm<sup>2</sup>-Blé

Technique	Dose	Bloc	Au semis	8 jours	22 jours	36 jours	60 jours	90 jours	120 jours
T1	d1	1	12,60	16,09	16,63	32,72	20,92	12,34	21,45
T1	d1	1	19,31	16,09	13,94	26,82	23,33	12,60	17,43
T1	d1	1	17,70	18,24	16,36	23,06	26,28	14,75	20,38
T1	d1	1	10,19	16,09	13,94	29,50	20,92	15,29	17,70
T1	d1	1	13,94	14,48	15,02	19,85	18,50	14,48	15,02
T1	d1	1	13,94	15,02	14,48	27,89	23,06	12,34	22,53
T1	d1	1	15,55	18,24	12,34	28,70	25,75	18,77	22,26
T1	d1	1	12,34	18,24	13,94	23,60	25,75	18,50	20,65
T1	d1	1	11,53	12,87	12,34	30,04	24,67	18,77	20,38
T1	d1	1	12,60	18,24	15,02	23,06	25,21	18,77	22,80
T1	d1	2	10,99	18,77	23,60	27,89	12,34	18,50	31,38
T1	d1	2	15,02	18,77	19,31	26,28	20,92	19,04	34,06
T1	d1	2	12,07	20,92	16,63	27,36	15,29	20,11	33,26
T1	d1	2	9,38	21,99	21,19	27,89	15,55	20,65	31,11
T1	d1	2	11,53	22,26	12,87	21,99	20,92	21,72	34,87
T1	d1	2	13,14	20,65	16,63	32,18	20,92	21,45	33,52
T1	d1	2	13,41	17,70	15,55	22,53	19,31	17,97	32,72
T1	d1	2	17,16	19,04	16,09	33,79	21,45	17,70	35,40
T1	d1	2	14,48	17,70	16,09	26,82	15,55	17,97	32,18
T1	d1	2	9,38	20,38	15,55	32,18	19,85	20,92	31,11
T1	d1	3	11,53	19,04	10,19	15,82	16,63	18,77	30,57
T1	d1	3	7,24	17,70	9,65	20,11	15,02	19,85	28,43
T1	d1	3	13,94	17,43	9,12	20,65	25,75	16,63	28,16
T1	d1	3	15,02	15,02	14,21	22,53	12,34	16,63	31,65
T1	d1	3	14,21	15,55	9,12	26,82	10,99	15,29	32,45
T1	d1	3	11,53	13,14	10,19	25,21	12,87	13,41	37,55
T1	d1	3	11,53	15,02	13,41	20,38	12,34	20,65	29,23

T1	d1	3	12,34	14,75	13,68	25,75	17,16	13,41	30,04
T1	d1	3	11,80	17,97	11,80	25,75	13,41	17,70	29,77
T1	d1	3	13,94	17,43	10,46	20,65	18,24	23,60	30,57
T1	d1	4	18,77	18,77	25,75	28,96	19,31	16,63	39,16
T1	d1	4	11,53	19,31	20,65	28,43	18,77	15,82	30,57
T1	d1	4	8,85	15,02	20,11	27,89	21,99	15,02	32,72
T1	d1	4	10,46	11,26	21,19	17,16	21,99	14,48	28,96
T1	d1	4	12,34	14,75	23,33	20,92	20,38	16,09	27,36
T1	d1	4	16,09	13,68	22,26	32,99	17,43	13,68	28,43
T1	d1	4	9,65	10,19	21,19	24,67	18,24	10,19	20,38
T1	d1	4	12,34	16,63	15,29	19,58	16,63	22,26	28,16
T1	d1	4	21,45	19,85	20,65	19,58	16,09	24,14	28,43
T1	d1	4	15,82	15,29	16,09	21,99	20,65	23,87	28,16
T1	d2	1	16,36	25,75	19,85	20,92	22,26	25,48	22,80
T1	d2	1	10,99	18,24	12,87	21,45	26,28	11,53	21,45
T1	d2	1	8,85	18,24	11,80	21,99	21,99	17,70	29,50
T1	d2	1	12,34	21,45	4,29	18,24	26,55	21,99	18,24
T1	d2	1	9,38	18,24	10,99	19,85	20,92	18,77	12,87
T1	d2	1	9,92	12,87	9,12	28,43	19,04	12,87	23,60
T1	d2	1	12,34	11,80	14,21	23,87	23,60	14,48	25,75
T1	d2	1	14,75	19,85	15,02	19,04	25,21	15,02	28,96
T1	d2	1	11,53	18,24	14,48	20,38	24,67	12,34	29,50
T1	d2	1	16,09	19,31	17,16	25,21	24,67	15,02	30,57
T1	d2	2	16,63	17,97	20,92	29,18	17,70	17,97	27,36
T1	d2	2	15,29	19,04	17,97	25,65	12,87	19,04	32,18
T1	d2	2	19,31	16,36	18,24	28,96	15,02	18,50	26,82
T1	d2	2	10,73	19,31	17,70	24,04	15,02	19,04	28,96
T1	d2	2	8,58	17,43	15,02	25,89	18,50	17,97	31,65
T1	d2	2	12,60	17,70	19,04	26,82	21,45	18,50	25,21
T1	d2	2	14,48	16,63	17,16	24,43	20,92	16,09	30,84
T1	d2	2	6,70	17,70	15,55	23,18	23,60	25,21	26,55
T1	d2	2	14,48	19,85	19,85	28,43	17,70	16,63	29,50
T1	d2	2	15,29	18,24	18,77	27,36	21,45	18,24	24,67
T1	d2	3	15,55	16,89	9,38	12,60	10,46	22,26	27,09
T1	d2	3	17,70	16,09	12,34	19,65	23,60	5,09	28,96
T1	d2	3	7,51	16,36	11,26	15,55	22,53	16,63	19,85
T1	d2	3	11,53	11,26	8,31	13,14	22,53	15,82	25,21
T1	d2	3	11,53	13,68	15,02	17,70	19,85	15,02	19,85
T1	d2	3	18,77	13,41	9,38	20,65	14,48	13,68	32,18
T1	d2	3	12,34	13,68	11,80	14,48	15,55	15,02	16,09
T1	d2	3	18,77	13,94	11,80	22,53	16,09	19,04	26,82
T1	d2	3	18,50	12,07	13,41	22,53	19,31	16,09	24,67
T1	d2	3	16,63	16,36	11,80	27,62	18,77	15,55	24,67
T1	d2	4	16,09	14,75	12,60	24,67	11,26	16,63	16,63
T1	d2	4	16,63	8,31	9,92	20,11	9,12	10,99	15,55
T1	d2	4	20,38	10,46	13,41	23,60	16,63	23,87	24,14
T1	d2	4	22,53	12,34	10,19	24,67	13,41	13,94	29,77
T1	d2	4	20,92	12,87	9,38	26,82	12,87	14,48	24,14
T1	d2	4	15,02	15,02	14,21	24,94	7,78	15,02	25,21
T1	d2	4	15,02	13,94	15,02	16,89	12,87	16,63	26,82
T1	d2	4	15,55	14,75	13,41	19,31	24,67	16,09	29,50
T1	d2	4	19,31	8,04	16,09	23,60	12,34	11,80	21,45
T1	d2	4	9,65	17,43	17,16	18,50	15,82	12,34	19,31
T2	d1	1	24,94	24,67	23,06	19,85	24,14	21,99	27,36
T2	d1	1	24,67	19,31	22,53	24,14	20,92	21,45	31,65
T2	d1	1	26,82	18,50	17,43	6,70	19,31	20,65	29,50
T2	d1	1	23,87	22,53	17,70	24,40	18,24	20,38	30,57
T2	d1	1	17,43	24,40	19,04	28,16	23,33	24,14	26,28

T2	d1	1	21,45	25,75	18,50	27,89	25,75	23,60	25,75
T2	d1	1	22,26	23,87	18,24	26,55	26,82	23,87	28,96
T2	d1	1	13,68	18,77	20,92	30,57	24,67	18,50	25,21
T2	d1	1	17,97	20,92	21,99	16,63	30,31	20,65	30,04
T2	d1	1	19,85	21,45	21,72	21,99	26,28	21,99	24,67
T2	d1	2	19,31	20,11	19,04	32,08	23,60	20,11	29,50
T2	d1	2	19,04	23,60	19,85	31,82	21,45	21,45	31,65
T2	d1	2	23,33	16,36	22,53	33,26	17,70	16,63	34,33
T2	d1	2	22,80	19,85	20,92	35,40	20,65	22,80	30,57
T2	d1	2	16,63	19,04	21,45	28,96	12,34	20,38	30,84
T2	d1	2	13,94	20,92	23,87	32,72	20,92	24,14	31,65
T2	d1	2	24,14	23,33	26,82	27,89	21,72	21,99	32,45
T2	d1	2	24,94	22,26	21,99	30,04	18,24	22,26	28,16
T2	d1	2	24,67	18,24	23,60	28,96	26,28	20,11	31,11
T2	d1	2	20,11	20,92	21,19	26,28	25,21	23,33	23,87
T2	d1	3	20,11	25,48	23,60	23,06	10,46	2,41	28,70
T2	d1	3	20,38	24,40	17,43	22,26	23,60	24,14	30,31
T2	d1	3	20,38	24,40	22,53	23,06	22,53	1,90	29,23
T2	d1	3	25,48	19,04	11,53	20,11	22,53	20,65	29,77
T2	d1	3	16,63	15,55	16,09	3,22	19,85	15,82	31,11
T2	d1	3	19,04	22,26	18,77	21,45	14,48	16,09	33,79
T2	d1	3	17,70	14,75	13,41	27,36	15,55	16,63	27,62
T2	d1	3	17,70	18,77	20,65	27,09	16,09	16,09	32,18
T2	d1	3	21,99	23,60	19,04	20,92	19,31	23,60	30,84
T2	d1	3	18,24	22,26	17,70	25,75	18,77	21,99	31,65
T2	d1	4	26,28	20,65	21,19	28,43	20,38	20,38	28,43
T2	d1	4	18,77	17,70	20,38	28,70	17,70	16,09	28,96
T2	d1	4	22,80	17,70	22,26	32,18	16,09	16,63	28,43
T2	d1	4	19,04	22,80	22,26	25,48	10,19	15,82	29,50
T2	d1	4	17,16	19,85	23,87	28,70	17,70	20,38	34,87
T2	d1	4	20,92	23,33	21,72	23,87	16,09	21,45	31,91
T2	d1	4	17,16	20,92	17,43	25,48	13,14	20,92	18,77
T2	d1	4	22,26	22,53	18,24	22,53	17,70	16,09	27,62
T2	d1	4	13,41	19,31	21,72	21,45	18,77	16,63	28,43
T2	d1	4	22,53	25,75	28,16	30,57	15,02	24,14	26,82
T2	d2	1	28,43	26,28	16,63	30,84	23,60	25,75	29,50
T2	d2	1	22,26	25,75	17,16	25,21	19,85	25,75	32,45
T2	d2	1	23,33	24,40	19,04	27,89	18,77	23,33	31,38
T2	d2	1	20,92	21,72	24,67	35,40	19,85	21,99	28,70
T2	d2	1	22,53	20,38	23,06	33,52	25,21	23,87	25,75
T2	d2	1	21,72	21,45	24,67	23,33	24,94	20,11	26,28
T2	d2	1	22,80	27,36	21,45	26,55	24,94	26,28	30,04
T2	d2	1	25,48	21,72	19,04	27,89	23,60	25,21	31,11
T2	d2	1	24,40	23,60	19,04	24,94	29,50	24,14	32,99
T2	d2	1	22,80	21,99	19,31	27,09	26,01	22,80	32,18
T2	d2	2	21,45	24,14	20,92	34,33	20,38	25,75	29,23
T2	d2	2	22,53	22,53	18,77	26,28	20,92	23,87	31,11
T2	d2	2	21,45	20,65	22,80	38,62	16,09	20,38	28,96
T2	d2	2	22,80	19,58	23,33	37,82	19,85	18,77	32,45
T2	d2	2	18,77	18,77	19,58	33,26	12,87	19,58	30,31
T2	d2	2	17,70	22,53	18,77	31,65	19,85	16,09	29,23
T2	d2	2	23,87	18,50	22,53	31,65	18,77	18,50	29,50
T2	d2	2	24,40	20,65	20,38	15,02	16,09	20,38	26,28
T2	d2	2	16,36	15,82	23,06	27,36	24,94	17,43	31,65
T2	d2	2	22,80	20,38	21,72	29,77	24,94	20,65	32,45
T2	d2	3	26,01	22,26	25,75	24,94	20,92	21,19	20,65
T2	d2	3	20,92	24,67	21,99	32,18	12,87	21,45	26,82
T2	d2	3	21,72	20,65	17,70	28,70	16,63	21,19	23,60

T2	d2	3	22,53	23,60	16,09	26,01	17,70	23,87	26,28
T2	d2	3	18,50	22,26	22,53	21,19	16,09	21,45	26,82
T2	d2	3	21,19	19,85	20,38	26,01	14,48	20,65	25,75
T2	d2	3	24,67	20,38	22,80	31,65	15,82	18,77	27,36
T2	d2	3	22,53	20,65	21,72	19,04	15,29	23,06	28,16
T2	d2	3	12,07	19,58	21,72	23,33	15,82	22,53	26,28
T2	d2	3	28,43	23,60	19,31	27,62	18,77	23,60	24,14
T2	d2	4	24,40	22,53	21,99	26,01	16,36	17,70	32,72
T2	d2	4	22,53	21,72	23,87	29,23	14,48	21,19	33,52
T2	d2	4	20,11	22,26	25,21	29,23	16,36	21,45	25,75
T2	d2	4	21,99	18,77	23,87	27,89	17,16	18,24	25,21
T2	d2	4	24,67	18,50	23,60	27,62	18,77	23,06	23,87
T2	d2	4	21,45	18,77	21,45	23,33	20,38	16,89	18,50
T2	d2	4	23,87	21,72	22,80	22,80	18,24	18,77	25,21
T2	d2	4	25,21	18,50	21,72	27,89	15,02	18,50	26,28
T2	d2	4	24,14	17,43	19,04	26,28	18,77	20,38	29,50
T2	d2	4	25,75	20,92	24,94	26,55	15,02	21,19	31,11

Tableau C-2' : Moyenne de la résistance à la pénétration en daN/cm<sup>2</sup>-Blé

Technique	Dose	Bloc	Au semis	8 jours	22 jours	36 jours	60 jours	90 jours	120 jours
T1	d1	1	13,97	16,36	14,40	26,52	23,44	15,66	20,06
T1	d1	2	12,66	19,82	17,35	27,89	18,21	19,60	32,96
T1	d1	3	12,31	16,30	11,18	22,37	15,47	17,59	30,84
T1	d1	4	13,73	15,47	20,65	24,22	19,15	17,22	29,23
T1	d2	1	12,25	18,40	12,98	21,94	23,52	16,52	24,32
T1	d2	2	13,41	18,02	18,02	26,39	18,42	18,72	28,37
T1	d2	3	14,88	14,37	11,45	18,65	18,32	15,42	24,54
T1	d2	4	17,11	12,79	13,14	22,31	13,68	15,18	23,25
T2	d1	1	21,29	22,02	20,11	22,69	23,98	21,72	28,00
T2	d1	2	20,89	20,46	22,12	30,74	20,81	21,32	30,41
T2	d1	3	19,76	21,05	18,07	21,43	18,32	15,93	30,52
T2	d1	4	20,03	21,05	21,72	26,74	16,28	18,85	28,37
T2	d2	1	23,47	23,47	20,41	28,27	23,63	23,92	30,04
T2	d2	2	21,21	20,35	21,19	30,57	19,47	20,14	30,12
T2	d2	3	21,86	21,75	21,00	26,07	16,44	21,78	25,58
T2	d2	4	23,41	20,11	22,85	26,68	17,06	19,74	27,17

Tableau C2-2'-2'' : Récapitulatif des valeurs de la résistance pénétrométrique (daN/cm<sup>2</sup>) en fonction de la technique pour la culture du blé dur.

Techniques	Résistance pénétrométrique en daN/cm <sup>2</sup>	
	Technique conventionnelle	Semis direct
Au semis	14,56	22,36
8 jours	13,17	20,50
22 jours	16,99	21,15
36 jours	15,90	20,51
60 jours	25,25	25,40
90 jours	19,07	19,85
120 jours	17,52	19,46
150 jours	28,27	29,33
Moyenne	<b>18,84</b>	<b>22,32</b>

Tableau C-3 : Variation de la résistance à la pénétration en daN/cm<sup>2</sup>- bersim

Technique	Dose	Bloc	Au semis	8 jours	38 jours	68 jours
T1	d1	1	66,5	50	54	56
T1	d1	1	52	51	46	42

T1	d1	1	73	57	24	50
T1	d1	1	54	32,5	48	61,5
T1	d1	1	62,5	62	37	51
T1	d1	2	68,5	46	24	26
T1	d1	2	48	59	16	35
T1	d1	2	78	59,5	28,5	44
T1	d1	2	63	34,5	39	35
T1	d1	2	48	51	24	36
T1	d1	3	41,25	74	19	34
T1	d1	3	26	39	29	40
T1	d1	3	67,75	69	21,5	40,5
T1	d1	3	80,25	47	35	30,5
T1	d1	3	60	47,5	34,5	16
T1	d1	4	91	57,5	45,5	49
T1	d1	4	40	67,5	31	41
T1	d1	4	65	50	49	53
T1	d1	4	62,25	60	51	47,5
T1	d1	4	43	58	54,5	45
T1	d2	1	57	44	14	67,5
T1	d2	1	66	39	36	57
T1	d2	1	61	51	35	60,5
T1	d2	1	71	42	40	56
T1	d2	1	45	36,5	51	53
T1	d2	2	32,75	66	49	30
T1	d2	2	58	57	43	28
T1	d2	2	46	62	48,5	3,5
T1	d2	2	53	66,5	46	17
T1	d2	2	39	56	41,5	16
T1	d2	3	44,25	80,5	65	43
T1	d2	3	65,75	57,5	64,5	51
T1	d2	3	48	56	64	31
T1	d2	3	35,75	19,5	65,5	40
T1	d2	3	52	27	75	27
T1	d2	4	64,75	57,5	68	40
T1	d2	4	28,5	67,5	48	54
T1	d2	4	46	50	59	50
T1	d2	4	37	60	40,5	51,5
T1	d2	4	66,25	58	40	54
T2	d1	1	81	65	63,5	52
T2	d1	1	66,75	77,5	64	70
T2	d1	1	79	91	58	62
T2	d1	1	90	78,5	75,5	51
T2	d1	1	88,75	73,5	64	67
T2	d1	2	57,75	36	42	63
T2	d1	2	69,5	75	41	64,5
T2	d1	2	57	33,5	42	54
T2	d1	2	57,75	31	49	66
T2	d1	2	59	36	64	54
T2	d1	3	83,75	97	28,5	62,5
T2	d1	3	73,75	70	21	64
T2	d1	3	62	72,5	40,5	53
T2	d1	3	52	74,5	39,5	61,5
T2	d1	3	69	69	36	61
T2	d1	4	61,25	63,5	57,5	68
T2	d1	4	67	56,5	50	50
T2	d1	4	53,75	46	52	57,5
T2	d1	4	55	54	52	73
T2	d1	4	82,75	53,5	66,5	78

T2	d2	1	74,75	79	69,5	59
T2	d2	1	71	72,5	49,5	54,5
T2	d2	1	84	59,5	73	54
T2	d2	1	70	72,5	49,5	56
T2	d2	1	80	63	63,5	63
T2	d2	2	82	77	69,5	57,5
T2	d2	2	54,25	56	61	62
T2	d2	2	57	45	53,5	46
T2	d2	2	48,25	74	67	61
T2	d2	2	60	58	67	59
T2	d2	3	59,75	84	75	58
T2	d2	3	68	76	34	34
T2	d2	3	42	92	49	50
T2	d2	3	54	88,5	42	56
T2	d2	3	60	98,5	51,5	55,5
T2	d2	4	71,75	72	77	64
T2	d2	4	52	74	69	58
T2	d2	4	61,75	76	59	52
T2	d2	4	49,75	62	62	55,5
T2	d2	4	51,75	50	65,5	60

**Tableau C-3' :** Moyenne de la résistance à la pénétration en daN/cm<sup>2</sup>- bersim

Technique	Dose	Bloc	Au semis	8 jours	38 jours	68 jours
T1	d1	1	36,18	45,00	45,25	56,96
T1	d1	2	36,68	40,13	39,18	50,31
T1	d1	3	34,77	42,57	43,22	55,69
T1	d1	4	38,48	41,13	45,12	48,89
T1	d2	1	36,89	39,51	43,05	46,51
T1	d2	2	40,59	46,01	43,87	46,81
T1	d2	3	36,66	40,32	40,61	42,11
T1	d2	4	41,64	43,32	43,42	45,05
T2	d1	1	37,66	41,46	41,29	42,04
T2	d1	2	37,50	41,10	40,72	41,16
T2	d1	3	68,10	76,60	34,25	59,88
T2	d1	4	63,95	52,50	55,60	65,30
T2	d2	1	75,95	69,30	61,00	57,30
T2	d2	2	60,30	62,00	63,60	57,10
T2	d2	3	56,75	87,80	50,30	50,70
T2	d2	4	57,40	66,80	66,50	57,90

**Tableau C-3-1'-1'' :** Récapitulatif des valeurs de la résistance pénétrométrique (daN/cm<sup>2</sup>) en fonction de la technique pour la culture du bersim.

Techniques	Résistance pénétrométrique en daN/cm <sup>2</sup>	
	Technique conventionnelle	Semis direct
Au semis	29,15	40,12
8 jours	24,42	32,48
38 jours	24,10	33,70
68 jours	29,79	33,89
90 jours	27,80	37,29
Moyenne	27,05	35,50

**Tableau D-1 :** Nombre de pieds par m<sup>2</sup> au stade fin de levée par technique-sorgho fourrager

Technique	Dose	Bloc	Nombre de pieds/m <sup>2</sup>	Technique	Dose	Bloc	Nombre de pieds/m <sup>2</sup>
T1	d1	1	68	T2	d1	1	91
T1	d1	1	84	T2	d1	1	84

T1	d1	1	88	T2	d1	1	80
T1	d1	2	75	T2	d1	2	92
T1	d1	2	65	T2	d1	2	95
T1	d1	2	76	T2	d1	2	76
T1	d1	3	68	T2	d1	3	84
T1	d1	3	74	T2	d1	3	91
T1	d1	3	81	T2	d1	3	87
T1	d2	1	116	T2	d2	1	136
T1	d2	1	132	T2	d2	1	142
T1	d2	1	140	T2	d2	1	138
T1	d2	2	124	T2	d2	2	130
T1	d2	2	128	T2	d2	2	137
T1	d2	2	128	T2	d2	2	130
T1	d2	3	131	T2	d2	3	135
T1	d2	3	134	T2	d2	3	140
T1	d2	3	130	T2	d2	3	141

**Tableau D-1-1'** : Récapitulatif de nombre de pieds par m<sup>2</sup> du sorgho fourrager en fonction de la technique et la dose de semis

Techniques culturales	Technique Conventionnelle		Semis direct	
Densités de semis	Dose 1	Dose 2	Dose 1	Dose 2
Nombre de pieds par m <sup>2</sup>	75	129	87	137
Taux de levée en %	57,69	71,66	66,92	76,11

**Tableau D-2** : Nombre de pieds par m<sup>2</sup> au stade fin de levée par technique-blé dur

Technique	Dose	Bloc	Nombre de pieds/m <sup>2</sup>	Technique	Dose	Bloc	Nombre de pieds/m <sup>2</sup>
T1	d1	1	148	T2	d1	1	208
T1	d1	1	162	T2	d1	1	198
T1	d1	1	150	T2	d1	1	207
T1	d1	2	162	T2	d1	2	180
T1	d1	2	168	T2	d1	2	192
T1	d1	2	174	T2	d1	2	205
T1	d1	3	145	T2	d1	3	182
T1	d1	3	162	T2	d1	3	214
T1	d1	3	139	T2	d1	3	203
T1	d1	4	202	T2	d1	4	231
T1	d1	4	208	T2	d1	4	209
T1	d1	4	197	T2	d1	4	216
T1	d2	1	150	T2	d2	1	240
T1	d2	1	189	T2	d2	1	260
T1	d2	1	162	T2	d2	1	245
T1	d2	2	206	T2	d2	2	230
T1	d2	2	214	T2	d2	2	229
T1	d2	2	205	T2	d2	2	233
T1	d2	3	172	T2	d2	3	249
T1	d2	3	146	T2	d2	3	251
T1	d2	3	166	T2	d2	3	243
T1	d2	4	242	T2	d2	4	265
T1	d2	4	186	T2	d2	4	223
T1	d2	4	198	T2	d2	4	204

**Tableau D-2-2'** : Récapitulatif de nombre de plants par m<sup>2</sup> en fonction de la technique et la dose de semis, cas de blé dur

Techniques	Technique conventionnelle		Semis direct	
Dose de semis	Dose 1	Dose 2	Dose 1	Dose 2
Nombre de plants par m <sup>2</sup>	168	186	204	239
Taux de levée en %	46,66	48,94	56,66	62,89

**Tableau D-3** : Nombre de pieds par m<sup>2</sup> au stade fin de levée par technique-bersim

Technique	Dose	Bloc	Nombre de pieds/m <sup>2</sup>	Technique	Dose	Bloc	Nombre de pieds/m <sup>2</sup>
T1	d1	1	56	T2	d1	1	182
T1	d1	1	42	T2	d1	1	176
T1	d1	1	40	T2	d1	1	184
T1	d1	2	50	T2	d1	2	192
T1	d1	2	50	T2	d1	2	184
T1	d1	2	40	T2	d1	2	194
T1	d1	3	40	T2	d1	3	184
T1	d1	3	44	T2	d1	3	196
T1	d1	3	56	T2	d1	3	172
T1	d1	4	50	T2	d1	4	176
T1	d1	4	48	T2	d1	4	184
T1	d1	4	36	T2	d1	4	160
T1	d2	1	94	T2	d2	1	214
T1	d2	1	90	T2	d2	1	230
T1	d2	1	98	T2	d2	1	226
T1	d2	2	88	T2	d2	2	218
T1	d2	2	104	T2	d2	2	202
T1	d2	2	98	T2	d2	2	208
T1	d2	3	96	T2	d2	3	216
T1	d2	3	104	T2	d2	3	199
T1	d2	3	89	T2	d2	3	204
T1	d2	4	100	T2	d2	4	195
T1	d2	4	102	T2	d2	4	221
T1	d2	4	108	T2	d2	4	232

**Tableau D-3-3'**: Récapitulatif de nombre de plants par m<sup>2</sup> du bersim en fonction de la technique et la dose de semis.

Techniques	Technique conventionnelle		Semis direct	
	Dose 1	Dose 2	Dose 1	Dose 2
Dose de semis				
Nombre de plants par m <sup>2</sup>	46	98	182	214
Taux de levée en %	17,03	35	67,40	76,42

**Tableau E-1** : Hauteur et diamètre des tiges du sorgho fourrager

Technique	Dose	Bloc	Hauteur des tiges en cm	Diamètre des tiges en mm	Technique	Dose	Bloc	Hauteur des tiges en cm	Diamètre des tiges en mm
T1	d1	1	160,56	0,595	T2	d1	1	138,89	0,305
T1	d1	1	163,00	0,57	T2	d1	1	137,67	0,315
T1	d1	1	161,78	0,57	T2	d1	1	137,45	0,31
T1	d1	2	166,89	0,52	T2	d1	2	136,22	0,32
T1	d1	2	163,67	0,565	T2	d1	2	134,89	0,305
T1	d1	2	166,78	0,555	T2	d1	2	137,89	0,33
T1	d1	3	163,00	0,56	T2	d1	3	136,11	0,335
T1	d1	3	164,78	0,54	T2	d1	3	134,34	0,335
T1	d1	3	168,45	0,57	T2	d1	3	135,22	0,345
T1	d2	1	159,40	0,505	T2	d2	1	130,27	0,335
T1	d2	1	157,74	0,51	T2	d2	1	131,25	0,39
T1	d2	1	153,12	0,595	T2	d2	1	130,72	0,37
T1	d2	2	154,14	0,565	T2	d2	2	131,66	0,305
T1	d2	2	152,28	0,585	T2	d2	2	134,69	0,375
T1	d2	2	156,40	0,51	T2	d2	2	132,18	0,35

T1	d2	3	158,14	0,521	T2	d2	3	130,24	0,391
T1	d2	3	154,11	0,532	T2	d2	3	132,89	0,312
T1	d2	3	158,03	0,557	T2	d2	3	136,69	0,364

**Tableau E-1-1'**: Récapitulatif des paramètres liés à la partie aérienne des cultures

Techniques	Technique conventionnelle		Semis direct	
	Dose 1	Dose 2	Dose 1	Dose 2
<b>Hauteur des tiges en cm</b>	164,32	155,93	136,52	132,28
<b>Diamètre des tiges en mm</b>	0,56	0,54	0,35	0,32

**Tableau E-2** : Hauteur de la partie aérienne de la culture du bersim

T	D	B	22/12/15	6/1/16	28/01/16	13/02/16	T	D	B	22/12/15	6/1/16	28/01/16	13/02/16
T1	d1	1	2	3,5	6	17,5	T2	d1	1	2	3,3	8	10
T1	d1	1	2	3,3	6,7	8,8	T2	d1	1	3	3	8,2	7,5
T1	d1	1	2,5	2	7,5	7,5	T2	d1	1	3,5	4,8	10	10,5
T1	d1	1	2,3	3,2	6,3	15	T2	d1	1	3,3	6,3	8,2	12,5
T1	d1	1	3	2,7	5,7	5,5	T2	d1	1	3	4,2	5,5	6,5
T1	d1	1	3,2	2,8	7,2	6	T2	d1	1	2	3,1	6	13,4
T1	d1	1	2,8	2,6	5	17	T2	d1	1	2,3	3,7	5,5	13
T1	d1	1	3,5	2,7	4,8	5,5	T2	d1	1	4	3,4	5,8	16,2
T1	d1	1	1,5	1,2	3,2	6,2	T2	d1	1	4	4	5	13,5
T1	d1	1	1,4	2	5	8,5	T2	d1	1	4,2	3,3	9	17,5
T1	d1	1	1	2,5	7,5	7	T2	d1	1	2,5	2,7	8,5	12
T1	d1	1	2	2,4	10,3	9,3	T2	d1	1	3	4	5,4	17,5
T1	d1	1	1,5	3,8	13	7,5	T2	d1	1	2,7	4,7	7,5	6,5
T1	d1	1	2,5	3,5	7,5	7	T2	d1	1	4	3,8	6,1	7
T1	d1	1	3	4	9	7,3	T2	d1	1	2	3	6	12
T1	d1	1	1	3,3	11,5	11	T2	d1	1	2,5	3,2	5	12
T1	d1	1	2,3	3,1	5,9	9,5	T2	d1	1	4	4	6,8	7,5
T1	d1	1	0,9	4	10,6	8	T2	d1	1	2,7	3	9	10
T1	d1	1	0,8	2,1	6	8,5	T2	d1	1	3	4,2	11	11
T1	d1	1	2,6	3,5	6,7	11,6	T2	d1	1	4,7	4	8,7	7
T1	d1	1	2,7	3,2	5,8	10,5	T2	d1	1	5	5,1	7	12
T1	d1	1	2	3	5,8	10	T2	d1	1	5,1	4,5	6,8	12,2
T1	d1	1	3,1	2,5	5,5	17	T2	d1	1	3	3,5	10	11,1
T1	d1	1	2,7	2,7	13,5	6,8	T2	d1	1	3,5	3,8	9	13
T1	d1	1	2	2,8	10	10	T2	d1	1	4	3,4	7,7	11,5
T1	d1	1	1,8	2,1	8,5	14	T2	d1	1	3	3,9	14,1	10
T1	d1	1	2,5	2,9	10,4	17,2	T2	d1	1	3,5	4,5	11,5	12,4
T1	d1	1	3,8	3	5,2	15,4	T2	d1	1	4,5	3,1	8,5	11,5
T1	d1	1	3	1	5,1	7	T2	d1	1	2,5	2,5	7,5	7,9
T1	d1	1	3,6	2,2	6	10,2	T2	d1	1	2	3,7	7	9,3
T1	d1	2	3	2,6	10	12	T2	d1	2	4,5	6	7,5	10
T1	d1	2	3	3	7,3	10,5	T2	d1	2	4	4,5	10	15
T1	d1	2	2,5	2,8	5,6	20	T2	d1	2	5,4	7	9,4	16
T1	d1	2	3,8	2,9	6,7	19,5	T2	d1	2	3	7,5	10	19
T1	d1	2	2,5	2,6	5,3	11	T2	d1	2	4	3,9	8,6	12
T1	d1	2	2,5	3,8	6,3	6,5	T2	d1	2	2,4	3	15	16,2
T1	d1	2	1,5	3	7,5	11	T2	d1	2	1,5	3,3	11	14
T1	d1	2	3,5	4	8	7,3	T2	d1	2	3	5,8	10,2	20
T1	d1	2	1,5	4	6,6	12	T2	d1	2	2,5	2,5	5,6	16
T1	d1	2	2	2,5	8,7	11,5	T2	d1	2	3,5	4,2	13,2	19,5
T1	d1	2	3	4,5	13	15,5	T2	d1	2	5	3,7	5,3	18
T1	d1	2	1,5	5,2	10,5	12,5	T2	d1	2	6,5	4	5,8	11,4
T1	d1	2	3,5	4,3	7	10,5	T2	d1	2	4	2,7	6	17,2
T1	d1	2	3	4	5,4	7	T2	d1	2	3,5	5,2	4	12,2
T1	d1	2	3,5	2,5	6,2	10,5	T2	d1	2	3	2,8	9	10,4
T1	d1	2	4,5	2,8	7,5	9,9	T2	d1	2	2,5	3	9	21

T1	d1	2	3	3,5	7	8	T2	d1	2	2,5	2,8	9,3	15
T1	d1	2	2	3,4	6,1	15	T2	d1	2	3,5	3,5	7,6	14,3
T1	d1	2	2,5	2,5	6,5	11,5	T2	d1	2	4	3,4	11	21,4
T1	d1	2	1,7	1,7	6,3	8	T2	d1	2	4	3,8	10,2	11,5
T1	d1	2	2	3,2	7,2	6,5	T2	d1	2	6,5	3,6	10,6	13
T1	d1	2	1,8	4	5,6	6	T2	d1	2	5,5	5,5	9,7	14,5
T1	d1	2	2,8	3	4,4	17,5	T2	d1	2	3	6,1	9,5	17
T1	d1	2	2	4,4	5,9	11,5	T2	d1	2	4,5	2,4	11	24
T1	d1	2	3	3	9,6	9	T2	d1	2	4,5	2,9	11	14
T1	d1	2	3	2	9,5	11	T2	d1	2	3	5	15	12,5
T1	d1	2	2,5	2,6	8	11,5	T2	d1	2	3	4,2	12,9	7
T1	d1	2	3,8	5,3	12	10	T2	d1	2	3	6	10,2	11,4
T1	d1	2	2,5	4,6	8,3	9	T2	d1	2	5,5	4,8	17	11,7
T1	d1	2	2,5	3,8	6,8	13,5	T2	d1	2	4,5	3,3	11	7,5
T1	d1	3	2	3,9	8,2	6	T2	d1	3	3	4,3	13,2	9
T1	d1	3	2,3	3,4	7,2	6,9	T2	d1	3	2	3,1	8,5	8
T1	d1	3	2	3,5	16,5	13	T2	d1	3	3,5	3,4	6,3	5,8
T1	d1	3	2,5	4,4	11	8	T2	d1	3	3,8	2,8	15,7	6,7
T1	d1	3	1,8	3,5	8,3	10,5	T2	d1	3	2	4,1	9,8	14
T1	d1	3	1,5	3	9	13	T2	d1	3	4	3,1	12	6,5
T1	d1	3	2	2,8	9	12	T2	d1	3	4,5	3,5	7,5	8,2
T1	d1	3	2	3,5	9	17,5	T2	d1	3	3,5	4,3	9,6	6,5
T1	d1	3	1,5	2,9	12,4	12	T2	d1	3	4	4,1	11,5	6,8
T1	d1	3	2	3,3	7	16	T2	d1	3	5	4	8	9,5
T1	d1	3	1,8	3,1	10,5	11,2	T2	d1	3	3,5	4,2	14	13
T1	d1	3	2	4,3	6,8	10	T2	d1	3	4	6,5	8,5	16
T1	d1	3	1,6	4,5	5,4	8,5	T2	d1	3	4,5	2,9	12,1	8
T1	d1	3	1,9	3,7	5,7	12	T2	d1	3	3	4,5	8,8	8,5
T1	d1	3	1,1	4	7,2	16,3	T2	d1	3	6	4,4	12,2	16
T1	d1	3	2,5	4	12,2	6	T2	d1	3	5,5	3,5	5,6	14,5
T1	d1	3	2	3,4	11	8	T2	d1	3	4,5	4,5	10,8	12,5
T1	d1	3	3	3,9	8,5	10	T2	d1	3	2,8	5,8	8,6	11,2
T1	d1	3	3	4	6,8	7	T2	d1	3	5	3,2	8	11
T1	d1	3	2	3,2	6,1	12	T2	d1	3	4,5	4	9	13
T1	d1	3	2	3,5	7	12,2	T2	d1	3	3,5	4,2	5,3	11,6
T1	d1	3	2,5	3	6,9	7,5	T2	d1	3	2,5	4	6,3	12
T1	d1	3	1,8	1,9	6,5	9,4	T2	d1	3	2,7	7,3	9,4	11,5
T1	d1	3	1,5	4	6	7,5	T2	d1	3	4,5	4,4	10,5	15,6
T1	d1	3	2,5	3,7	4,9	8,2	T2	d1	3	3	5,3	8,9	12,4
T1	d1	3	2	2,9	6,6	10	T2	d1	3	2,8	4,5	9,4	13
T1	d1	3	2	3,5	5,1	5,5	T2	d1	3	2,8	4	12,2	14,5
T1	d1	3	1,5	2,8	8,5	5	T2	d1	3	3,5	5,8	7	18
T1	d1	3	2,5	2,9	4,2	4,2	T2	d1	3	5	3,3	11,5	20
T1	d1	3	2	2,5	6,7	6	T2	d1	3	4,5	5,1	9	19,8
T1	d1	4	2,6	3,1	13,5	9	T2	d1	4	2,6	4,5	13	17,5
T1	d1	4	3,8	2,1	13,4	11,5	T2	d1	4	2,6	6	8	10,5
T1	d1	4	3,3	4	7,3	11,6	T2	d1	4	3,6	3,8	8	12,5
T1	d1	4	2,8	5	14,8	7	T2	d1	4	2,8	6	11	13,8
T1	d1	4	2,9	3,2	7	11,2	T2	d1	4	3,6	4,2	3,5	15,5
T1	d1	4	2	3,3	10	7	T2	d1	4	5,5	3,8	5	19,5
T1	d1	4	3	2,5	8,9	11,4	T2	d1	4	1,8	3,5	15	11
T1	d1	4	2,4	3,4	11	6,2	T2	d1	4	3,2	6	9	16,6
T1	d1	4	2,3	4,5	7,5	9,5	T2	d1	4	4	3	9,5	13,5
T1	d1	4	1,6	4,4	6,4	11	T2	d1	4	2	7,2	9	13
T1	d1	4	3,2	2,8	4,8	14,4	T2	d1	4	2,5	2,1	11,5	10,2
T1	d1	4	1,8	3,9	5,7	8	T2	d1	4	3,7	3,8	11	10
T1	d1	4	3,5	4,4	6,4	12	T2	d1	4	3,4	9,8	9	9,5
T1	d1	4	3,5	3,6	5,5	9	T2	d1	4	5,3	5,8	13	26

T1	d1	4	2	2,9	7	8,2	T2	d1	4	2,8	5,4	11,5	12,5
T1	d1	4	1,1	5,7	6,2	8,8	T2	d1	4	3,4	3	13	18,5
T1	d1	4	2,4	2,8	9,1	7,5	T2	d1	4	4,5	5,4	13,5	15
T1	d1	4	2,6	2,7	8,1	9,4	T2	d1	4	5,5	4,2	8,5	2,6
T1	d1	4	2,3	4,5	6,6	14	T2	d1	4	3,8	2,5	9,6	20
T1	d1	4	2,4	2,8	7	9,5	T2	d1	4	2,3	2	5,7	16,5
T1	d1	4	2	3	5,5	10	T2	d1	4	3,6	4,5	18	23
T1	d1	4	1,9	3,2	6	14,3	T2	d1	4	2,9	4	9,5	15
T1	d1	4	3,7	3,1	2,5	14,2	T2	d1	4	3,2	5	9,6	10,8
T1	d1	4	1,2	2,5	5	14,2	T2	d1	4	5,8	3,2	12,2	10,2
T1	d1	4	1,8	2,7	5,1	7,5	T2	d1	4	4,8	3	9,5	8
T1	d1	4	2,3	2,2	5,6	6,8	T2	d1	4	3,9	4	6,8	16,2
T1	d1	4	2,4	6	6	12,3	T2	d1	4	4,4	3,2	8	15
T1	d1	4	1,7	3,7	5,9	4,4	T2	d1	4	2,9	2,9	17,5	15,1
T1	d1	4	0,3	2,6	4,2	6,5	T2	d1	4	1,8	3,1	7,5	16,8
T1	d1	4	0,6	5,4	4,9	9	T2	d1	4	3,2	7,6	12,4	8
T1	d2	1	1,8	4,1	8	20	T2	d2	1	3,8	4	8,5	18
T1	d2	1	3,5	3,5	7,8	10,5	T2	d2	1	3,5	3,3	5	13,9
T1	d2	1	1,7	2,8	10,5	10,7	T2	d2	1	4	6	5,4	14
T1	d2	1	1,8	2,8	11	11	T2	d2	1	3	4,2	8,2	15,6
T1	d2	1	2,1	3,4	5,8	10,2	T2	d2	1	5	3,9	10,5	9
T1	d2	1	2,1	3	8	15,5	T2	d2	1	4,5	4	13	14
T1	d2	1	1,8	5	9,6	9	T2	d2	1	5	3,8	9,6	15,9
T1	d2	1	3	2,8	6,7	6	T2	d2	1	6,5	4	14	15,2
T1	d2	1	2,5	4,5	6,8	8,8	T2	d2	1	3	7,2	17	17
T1	d2	1	1,9	4,7	6,2	13,2	T2	d2	1	4	5	9,8	14,8
T1	d2	1	2,3	4	12	12	T2	d2	1	4	2,8	6,6	8
T1	d2	1	2,3	3,4	8,5	10,2	T2	d2	1	4,3	4,8	6,5	11,4
T1	d2	1	1,6	3	6,5	5,8	T2	d2	1	3,5	5,1	9,2	17,5
T1	d2	1	1,6	5	13,6	8,1	T2	d2	1	3	5,2	7,5	20
T1	d2	1	2,6	3,5	10	7,6	T2	d2	1	2,3	3,5	5	7,2
T1	d2	1	1,7	4,4	10,2	11,4	T2	d2	1	4	9,2	10,6	6
T1	d2	1	2,8	4,8	10,3	15	T2	d2	1	3,5	4	10,6	11,5
T1	d2	1	3,3	4,5	9,5	9,5	T2	d2	1	3	3	5,6	12
T1	d2	1	2	3,2	6,1	7	T2	d2	1	2,3	8	8,6	13,2
T1	d2	1	1,8	2,8	9	8,8	T2	d2	1	4	5	13,5	10,5
T1	d2	1	2	3,5	7,1	12,4	T2	d2	1	3,5	5,3	13	9,3
T1	d2	1	2	3,9	4,8	6,3	T2	d2	1	4,5	5,2	7,5	9
T1	d2	1	4	4	8,5	9,3	T2	d2	1	3	3,8	7	13
T1	d2	1	1,7	3,6	6	9	T2	d2	1	4,3	4,6	8,3	16,8
T1	d2	1	2,4	4,1	5	7	T2	d2	1	5	4,3	6,6	11
T1	d2	1	2	3,5	4,8	12,2	T2	d2	1	4,5	5,2	10,3	16,2
T1	d2	1	3	3	4,5	9,5	T2	d2	1	4	5,5	9,6	14
T1	d2	1	4	3,2	5,6	6,2	T2	d2	1	3,5	8,2	6	11,2
T1	d2	1	2,7	2,5	7	13,5	T2	d2	1	4,5	5	7,5	11
T1	d2	1	3,3	2,8	6	14,5	T2	d2	1	4,3	2,7	5,6	10,4
T1	d2	2	1	3,3	4	10,5	T2	d2	2	3	2,8	10,3	11,5
T1	d2	2	2	2,1	8,2	8	T2	d2	2	4,5	3,1	6	10,5
T1	d2	2	2	3,1	8,4	8,5	T2	d2	2	3	3,2	10,4	11,4
T1	d2	2	1,5	2	5,2	10	T2	d2	2	4,5	2,5	5,4	13
T1	d2	2	2,5	2,1	6,8	9	T2	d2	2	1,5	3	7,3	14,5
T1	d2	2	2	2,4	4,8	15,5	T2	d2	2	4	2,8	6	18
T1	d2	2	1,5	3,8	11,4	11,5	T2	d2	2	5	5	10,2	16
T1	d2	2	1	2,6	9,4	16	T2	d2	2	4,5	7,3	7,4	15
T1	d2	2	1	3	4,6	15,9	T2	d2	2	4	7,4	9,4	12
T1	d2	2	3	3,4	7,8	10,5	T2	d2	2	5,5	4,9	11	17
T1	d2	2	3	1,6	9	15,2	T2	d2	2	2	5	6	10,2
T1	d2	2	2,5	3	8	15	T2	d2	2	3	5,5	10	11,5

T1	d2	2	2	3,4	8	13	T2	d2	2	3	4	10	9,7
T1	d2	2	2,5	3,2	7,3	10,2	T2	d2	2	7	4,2	13,3	12,5
T1	d2	2	1,5	3,1	7,5	14	T2	d2	2	5,5	6,5	10,5	12
T1	d2	2	2,5	3,4	5,1	14,5	T2	d2	2	3,5	5,2	8,6	13,5
T1	d2	2	3	4,5	5,4	10	T2	d2	2	4	6	8,7	15
T1	d2	2	2	3,3	9	5	T2	d2	2	2,5	5	9,2	5
T1	d2	2	1,5	6,1	6,6	8,4	T2	d2	2	2,5	3,2	12,8	11
T1	d2	2	1,7	3,3	12,6	15	T2	d2	2	3	6,4	4,4	16
T1	d2	2	2	4	6	9	T2	d2	2	3	4,5	9,3	9,5
T1	d2	2	1,8	3,2	6,5	12	T2	d2	2	5,5	6,5	9,5	11,5
T1	d2	2	1,5	4,2	4,6	6	T2	d2	2	2,5	5	10,3	9
T1	d2	2	2	3,9	7,1	14	T2	d2	2	5	6	7,9	11
T1	d2	2	1,5	3,7	5,4	11	T2	d2	2	4	8,5	10,2	11
T1	d2	2	1,5	3,5	8	6,4	T2	d2	2	4	8,8	15,7	17
T1	d2	2	1	3,3	7,2	11	T2	d2	2	4	4	10,3	16
T1	d2	2	1,5	4	9,4	8,5	T2	d2	2	4	5,2	12	12
T1	d2	2	2	3,9	8,5	8,4	T2	d2	2	4	5,7	10	23
T1	d2	2	3	3,1	7,8	7,8	T2	d2	2	4	5	8	20
T1	d2	3	2,7	4	10	21,5	T2	d2	3	2,5	6,5	12,5	13
T1	d2	3	2	4,9	5,5	11,5	T2	d2	3	2	5	11	12
T1	d2	3	2	4,1	9,4	9	T2	d2	3	3	4	12	8
T1	d2	3	2,3	4,2	7,2	18	T2	d2	3	3,5	6	20	18
T1	d2	3	1,5	3,9	8,5	18,5	T2	d2	3	4	6,5	9	12
T1	d2	3	1,7	3,5	14,3	11,4	T2	d2	3	3	4	11	13
T1	d2	3	2,9	3	7,6	12	T2	d2	3	1,5	3,5	8,5	14,6
T1	d2	3	1,7	4,5	12,5	18	T2	d2	3	2,5	6,2	9	10,5
T1	d2	3	2	2,9	3	14,6	T2	d2	3	4,2	4,2	13	18
T1	d2	3	2,3	3,6	7,8	10,2	T2	d2	3	3	5,1	9,5	15
T1	d2	3	2,5	2,8	10	13	T2	d2	3	3	4	19,5	16,3
T1	d2	3	2,5	6	11,8	12,3	T2	d2	3	2	6,5	10,5	16,8
T1	d2	3	0,9	3,7	7,3	13,5	T2	d2	3	2	7	10	30,5
T1	d2	3	2	3,2	8,5	12,2	T2	d2	3	4	4,2	7,5	18
T1	d2	3	1,8	4,2	6,5	14	T2	d2	3	4	6,8	9,5	37,4
T1	d2	3	2,8	2,8	7	25	T2	d2	3	3,5	7	14	17,6
T1	d2	3	2,5	4,9	3,8	16,5	T2	d2	3	4	4	9	12
T1	d2	3	1	4	4,2	13,2	T2	d2	3	3,5	6,4	9,6	16
T1	d2	3	2,3	3,2	7	8,2	T2	d2	3	4	7,8	13,5	21,3
T1	d2	3	3	3,2	6,9	7	T2	d2	3	4,2	4,9	3,7	16
T1	d2	3	2,5	4	7,7	20	T2	d2	3	2,5	6,2	12	19
T1	d2	3	1,2	4,9	10,5	18	T2	d2	3	1,8	4,5	9,8	21
T1	d2	3	2	4,3	10,7	14,2	T2	d2	3	3	6	8,5	32,5
T1	d2	3	2,5	3,2	5,5	15	T2	d2	3	2,8	3,2	9	16,3
T1	d2	3	2,2	4	6,5	13,5	T2	d2	3	2,5	3,1	9,5	7,5
T1	d2	3	2	3,5	6,4	11	T2	d2	3	3,5	4	7,3	3,8
T1	d2	3	1,5	4	9,4	11,8	T2	d2	3	2,5	5,1	10	6,2
T1	d2	3	1,5	4,2	9	15,6	T2	d2	3	2,2	6,2	6,5	10,5
T1	d2	3	1,5	4	7,1	16,6	T2	d2	3	2,2	4	16	13,2
T1	d2	3	1,6	5,2	6,7	3,5	T2	d2	3	3,5	3,8	12,5	7,5
T1	d2	4	2	3,2	11,4	19,8	T2	d2	4	5	8	15	23
T1	d2	4	2,5	3	9,2	14,5	T2	d2	4	3,5	6,8	9,5	23,5
T1	d2	4	1,5	3,1	11	10,5	T2	d2	4	3	7,4	7,5	14,5
T1	d2	4	2	2,4	8,3	8,2	T2	d2	4	3,5	4	12,5	16
T1	d2	4	2,1	3,2	11,5	23	T2	d2	4	3,5	8,5	9	14,8
T1	d2	4	3	4	8,5	11,2	T2	d2	4	3,5	8,4	11,4	14,3
T1	d2	4	3	4,2	9,2	14,5	T2	d2	4	4	3,8	16	21
T1	d2	4	2,5	3,8	9,5	11,5	T2	d2	4	3,2	3,5	14,6	18
T1	d2	4	2	3,3	13	9	T2	d2	4	4	8	9,5	21
T1	d2	4	3	5	6,5	21	T2	d2	4	4	3,8	8	21,5

T1	d2	4	2,5	2,8	7,5	10,6	T2	d2	4	3,8	4	4,5	27,5
T1	d2	4	3	2,6	9	9	T2	d2	4	3,5	6,5	8,4	23,5
T1	d2	4	2	4	9	11	T2	d2	4	3,5	7	5,8	10
T1	d2	4	2,5	3,6	14	10,4	T2	d2	4	4,5	5,6	7,5	9,6
T1	d2	4	2,1	5	11	9,5	T2	d2	4	5	6,2	11,5	11
T1	d2	4	2	4,9	8	10,2	T2	d2	4	5	3,5	13,2	6,5
T1	d2	4	2,2	4,5	15	16	T2	d2	4	3	4,2	12,5	13,4
T1	d2	4	2	3,8	6,5	11,2	T2	d2	4	2	4	9	11
T1	d2	4	2,5	5	11,5	18,5	T2	d2	4	3,5	3,8	8,5	8
T1	d2	4	2	3,3	9,5	15	T2	d2	4	2,5	4,5	10,6	4
T1	d2	4	2	5,6	8,5	15,5	T2	d2	4	2,5	7	11,5	9,4
T1	d2	4	0,7	4	9	7	T2	d2	4	3,5	6,3	19	6,5
T1	d2	4	2	4,5	8,5	14,6	T2	d2	4	5	5	11,5	9,5
T1	d2	4	1,8	6	6	12	T2	d2	4	6	3,2	11,2	11,2
T1	d2	4	3	6,9	6,5	14,3	T2	d2	4	4,5	5,2	8,5	9
T1	d2	4	1,9	5	10	14,4	T2	d2	4	2,5	5,2	8,2	16,5
T1	d2	4	1,7	4	8	17,5	T2	d2	4	4,5	7	9,7	6
T1	d2	4	3	4,5	8,5	9	T2	d2	4	3,5	4,7	12	9
T1	d2	4	2,7	4,2	6,5	6,3	T2	d2	4	4	7,4	12,8	8,9
T1	d2	4	3,9	3,3	8	4	T2	d2	4	2,5	5,2	17	6,2

**Tableau E-2-2'**: Récapitulatif des valeurs de la hauteur de la partie aérienne de la culture du bersim

Techniques	Hauteur des parties aériennes en cm			
	22/12/2015	06/1/2016	28/01/2016	13/02/2016
Technique conventionnelle Dose 1	2,33	3,28	7,53	10,20
Technique conventionnelle Dose 2	2,16	3,75	8,10	11,98
Semis direct dose1	3,62	4,16	9,45	13,68
Semis direct dose2	3,62	5,18	9,96	13,83

**Tableau F-1** : Longueur et diamètre de la racine principale, densité racinaire –sorgho fourrager

T	D	B	Lr en mm (stade-levée).	Φ r en cm (stade-levée).	dr(g/dm <sup>3</sup> ) (stade-levée).	Φ r en mm (stade-tallage).	Lr en cm (stade-tallage).	dr (g/dm <sup>3</sup> ) (stade-tallage).	Φ r en mm (stade-épiaison).	Lr en cm (stade-épiaison).	dr (g/dm <sup>3</sup> ) (stade-épiaison).
T1	d1	1	1,09	12,45	0,167	3,45	13,85	0,400	3,63	22,15	2,100
T1	d1	1	1,04	12,7	0,165	3,41	13,95	0,322	3,665	21,5	2,117
T1	d1	1	0,93	12,8	0,165	3,45	13,82	0,344	3,695	29,85	2,578
T1	d1	2	1,07	12,5	0,164	3,47	13,8	0,406	3,675	28,4	2,361
T1	d1	2	1,15	12,2	0,160	3,485	13,9	0,450	3,62	25,35	1,994
T1	d1	2	1,14	12	0,164	3,51	13,7	0,328	2,905	28,2	2,678
T1	d1	3	1,12	12	0,162	3,505	14,05	0,361	3,75	22,65	1,822
T1	d1	3	1,05	12,5	0,165	3,471	13,7	0,344	3,67	27,65	2,317
T1	d1	3	0,98	12,75	0,165	3,51	13,9	0,311	2,77	25,85	2,783
T1	d2	1	1,15	11,85	0,190	3	12,6	0,517	3,3	27,9	2,906
T1	d2	1	0,99	11,65	0,193	2,995	12,8	0,422	2,755	25,2	3,461
T1	d2	1	1,02	11,85	0,181	2,825	13,4	0,472	2,84	23,1	3,017
T1	d2	2	1,15	12,1	0,174	2,875	13,15	0,533	2,905	20,15	2,896
T1	d2	2	1,09	12,25	0,174	2,76	13,05	0,433	2,59	26,55	2,628
T1	d2	2	1,00	12,05	0,172	2,905	13	0,478	2,64	27,2	2,694
T1	d2	3	0,99	11,62	0,180	3,03	13,24	0,422	3,23	26,29	2,856
T1	d2	3	0,99	11,53	0,182	3,07	12,325	0,494	2,91	27,665	3,512
T1	d2	3	1,00	11,52	0,175	3,005	12,3415	0,517	3,235	21,305	4,017
T2	d1	1	1,077	8,65	0,071	1,82	10,75	0,128	1,895	12,23	1,644
T2	d1	1	1,047	8,85	0,073	1,75	9,9	0,194	1,905	11,05	1,556
T2	d1	1	1,003	8,75	0,070	1,985	8,95	0,100	1,84	12,3	1,739
T2	d1	2	0,837	8,7	0,073	2,145	10,55	0,050	1,965	14,2	1,228

T2	d1	2	0,753	8,75	0,083	2,175	9,9	0,106	1,89	12,25	1,422
T2	d1	2	0,827	9,03	0,070	1,96	9,85	0,261	1,97	13,2	1,522
T2	d1	3	0,797	8,98	0,076	1,955	10,15	0,156	1,905	14,05	1,672
T2	d1	3	1,047	9,03	0,076	2,07	10,25	0,200	1,935	14,95	1,600
T2	d1	3	1,017	9,05	0,080	1,935	9,98	0,094	1,97	13,2	1,050
T2	d2	1	1,13	8,02	0,091	1,77	9,3	0,211	1,86	14,7	2,029
T2	d2	1	0,80	8,07	0,099	1,72	9,95	0,217	1,83	15,75	1,673
T2	d2	1	0,65	7,95	0,097	1,785	8,75	0,219	1,895	17,7	1,981
T2	d2	2	0,86	7,86	0,091	1,85	10,8	0,256	1,89	16,15	1,644
T2	d2	2	0,63	8,02	0,100	1,815	8,25	0,194	1,895	15,25	1,549
T2	d2	2	0,78	8,05	0,089	1,795	9,4	0,144	1,845	14,05	1,673
T2	d2	3	0,87	8,1	0,086	2,02	8,885	0,228	1,815	16,995	1,786
T2	d2	3	0,71	8,08	0,093	2,07	9,74	0,172	1,96	17,145	1,253
T2	d2	3	0,86	8,01	0,094	1,98	10,23	0,156	1,93	18,755	1,415

**Tableau F-1-1'**: Récapitulatif des paramètres liés à la partie souterraine de la culture du sorgho fourrager

Stades	Partie souterraine								
	Longueur de la racine principale en cm			Diamètre de la racine principale en mm			Densité racinaire (g/dm <sup>3</sup> )		
	Levée	Tallage	Épiaison	Levée	Tallage	Épiaison	Levée	Tallage	Épiaison
<b>Technique conventionnelle Dose 1</b>	12,43	13,85	25,733	1,06	3,47	3,48	0,18	0,47	3,11
<b>Technique conventionnelle Dose 2</b>	11,82	12,87	25,040	1,04	2,94	2,93	0,16	0,36	2,30
<b>Semis direct dose 1</b>	8,86	10,03	13,048	0,93	1,97	1,91	0,07	0,14	1,49
<b>Semis direct dose 2</b>	8,01	9,47	16,277	0,80	1,86	1,88	0,09	0,20	1,66

**Tableau F-2** : Longueur et diamètre de la racine principale, densité racinaire –Blé dur

Technique	Dose	Bloc	densité racinaire (g/dm <sup>3</sup> )	Technique	Dose	Bloc	densité racinaire (g/dm <sup>3</sup> )
T1	d1	1	1,202	T2	d1	1	0,939
T1	d1	1	1,244	T2	d1	1	0,952
T1	d1	1	1,342	T2	d1	1	1,123
T1	d1	2	1,402	T2	d1	2	0,579
T1	d1	2	1,371	T2	d1	2	0,653
T1	d1	2	1,563	T2	d1	2	0,684
T1	d1	3	0,973	T2	d1	3	0,941
T1	d1	3	0,991	T2	d1	3	0,975
T1	d1	3	1,426	T2	d1	3	0,980
T1	d1	4	1,356	T2	d1	4	1,569
T1	d1	4	1,440	T2	d1	4	1,332
T1	d1	4	1,436	T2	d1	4	1,244
T1	d2	1	1,667	T2	d2	1	1,445
T1	d2	1	1,634	T2	d2	1	1,513
T1	d2	1	1,629	T2	d2	1	1,482
T1	d2	2	1,555	T2	d2	2	1,147
T1	d2	2	1,564	T2	d2	2	1,348
T1	d2	2	1,491	T2	d2	2	1,443
T1	d2	3	2,146	T2	d2	3	1,675
T1	d2	3	2,027	T2	d2	3	1,546
T1	d2	3	1,873	T2	d2	3	1,466
T1	d2	4	1,506	T2	d2	4	1,403
T1	d2	4	1,536	T2	d2	4	1,366
T1	d2	4	1,540	T2	d2	4	1,463

**Tableau F-2-2' : Récapitulatif des paramètres liés à la partie souterraine de la culture du blé dur**

Techniques	Longueur de la racine principale (cm) stade épiaison	Diamètre de la racine (mm) au stade épiaison	Densité racinaire (g/dm <sup>3</sup> )
Technique conventionnelle Dose 1	119,78	0,90	1,31
Technique conventionnelle Dose 2	119,78	0,80	1,68
Semis direct dose 1	101,88	0,72	1,00
Semis direct dose 2	102,28	0,69	1,44

**Tableau F-3 : Longueur et diamètre de la racine principale, densité racinaire –Bersim**

Technique	Dose	Bloc	Densité racinaire Coupe n°1	Densité racinaire Coupe n°2	Technique	Dose	Bloc	Densité racinaire Coupe n°1	Densité racinaire Coupe n°2
T1	d1	1	0,337	0,837	T2	d1	1	0,412	0,610
T1	d1	1	0,276	1,045	T2	d1	1	0,367	1,271
T1	d1	1	0,359	0,630	T2	d1	1	0,321	0,654
T1	d1	2	0,553	1,010	T2	d1	2	0,321	0,615
T1	d1	2	0,451	0,900	T2	d1	2	0,363	0,825
T1	d1	2	0,732	0,656	T2	d1	2	0,217	0,465
T1	d1	3	0,397	0,966	T2	d1	3	0,355	0,730
T1	d1	3	0,367	1,028	T2	d1	3	0,411	0,756
T1	d1	3	0,434	0,839	T2	d1	3	0,399	0,842
T1	d1	4	0,509	1,781	T2	d1	4	0,659	0,889
T1	d1	4	0,330	0,655	T2	d1	4	0,460	1,080
T1	d1	4	0,369	0,455	T2	d1	4	0,609	0,962
T1	d2	1	0,276	0,751	T2	d2	1	0,566	1,005
T1	d2	1	0,355	0,870	T2	d2	1	0,350	0,703
T1	d2	1	0,593	0,896	T2	d2	1	0,164	0,602
T1	d2	2	0,390	1,237	T2	d2	2	0,392	1,172
T1	d2	2	0,516	1,714	T2	d2	2	0,343	0,663
T1	d2	2	0,382	0,935	T2	d2	2	0,396	0,724
T1	d2	3	0,502	1,261	T2	d2	3	0,545	1,494
T1	d2	3	0,474	1,059	T2	d2	3	0,415	1,110
T1	d2	3	0,280	0,684	T2	d2	3	0,772	0,475
T1	d2	4	0,621	1,000	T2	d2	4	0,439	1,181
T1	d2	4	0,400	1,037	T2	d2	4	0,943	0,915
T1	d2	4	0,420	0,900	T2	d2	4	0,214	1,283

**Tableau F-3-3' : Récapitulatif des valeurs de la densité racinaire de la culture du bersim**

Techniques	Densité racinaire (g/dm <sup>3</sup> )	
	Coupe n°1	Coupe n°2
Technique conventionnelle Dose 1	0,42	0,90
Technique conventionnelle Dose 2	0,43	1,02
Semis direct dose1	0,40	0,80
Semis direct dose2	0,46	0,94

**Tableau G-1: Rendements en matière vert et matière sèche du sorgho fourrager**

Technique	Dose	Bloc	rendement estimé du fourrage en vert(t/ha)	rendement estimé en matière sèche (t/ha)	Technique	Dose	Bloc	rendement estimé du fourrage en vert(t/ha)	rendement estimé en matière sèche (t/ha)
T1	d1	1	69,9	26,55	T2	d1	1	49,25	18,43
T1	d1	1	74,5	25,79	T2	d1	1	52	18,43

T1	d1	1	67,1	29,7	T2	d1	1	40,25	12,38
T1	d1	2	77,1	22,03	T2	d1	2	42,4	16,06
T1	d1	2	74,25	29,31	T2	d1	2	48	17,34
T1	d1	2	70,25	26,9	T2	d1	2	47,45	17,27
T1	d1	3	75,85	31,67	T2	d1	3	45,25	17,65
T1	d1	3	78,4	38,99	T2	d1	3	50	20,58
T1	d1	3	80,6	40,58	T2	d1	3	48,5	17,29
T1	d2	1	95,9	45,2	T2	d2	1	61,6	21,56
T1	d2	1	85,1	31,24	T2	d2	1	66,8	26,58
T1	d2	1	93,2	42,62	T2	d2	1	65,8	29,32
T1	d2	2	105,6	55,1	T2	d2	2	71,02	38,26
T1	d2	2	95,6	46,32	T2	d2	2	65,2	25,32
T1	d2	2	97,6	48,87	T2	d2	2	69,5	27,63
T1	d2	3	94,8	41,24	T2	d2	3	64,3	28,74
T1	d2	3	108,9	76,98	T2	d2	3	61,1	29,55
T1	d2	3	101	65,64	T2	d2	3	60,9	25,11

**Tableau G-1-1' :** Récapitulatif des rendements en MV et MS en fonction de la technique et la dose de semis

Techniques	Technique conventionnelle		Semis direct	
	Dose 1	Dose 2	Dose 1	Dose 2
<b>Rendements estimés du fourrage en vert(t/ha)</b>	74,21	97,52	47,01	65,13
<b>Rendements estimés en matière sèche (t/ha)</b>	30,16	50,35	17,27	28,00

**Tableau G-2:** Composantes de rendement et le rendement du blé dur

Technique	Dose	Bloc	Nombre d'épis /m2	Nombre des grains par épis	PMG	Rendement (q/ha)
T1	d1	1	249	55	36,68	45,22
T1	d1	2	231	55	43,86	55,78
T1	d1	3	251	57	39,57	58,64
T1	d1	4	248	61	40,80	64,90
T1	d2	1	269	56	45,05	67,86
T1	d2	2	257	57	46,00	67,32
T1	d2	3	275	59	48,70	79,02
T1	d2	4	256	54	45,46	62,72
T2	d1	1	213	58	47,28	47,41
T2	d1	2	216	54	44,53	49,54
T2	d1	3	224	51	43,44	47,68
T2	d1	4	233	61	47,38	44,34
T2	d2	1	211	60	44,62	55,42
T2	d2	2	233	55	47,75	61,19
T2	d2	3	244	52	45,38	51,38
T2	d2	4	262	52	50,98	65,41

**Tableau G-2-2' :** Récapitulatif des composantes du rendement et le rendement en fonction de la technique et la dose de semis

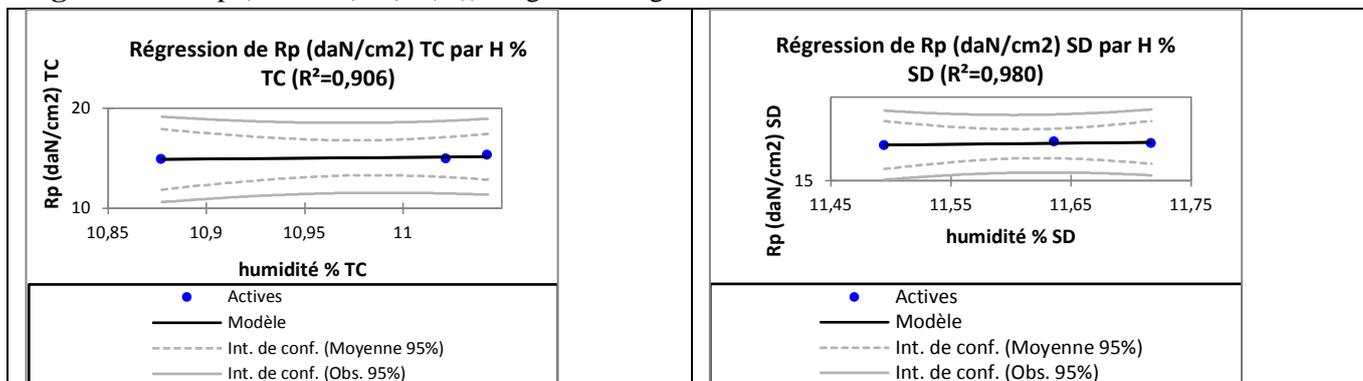
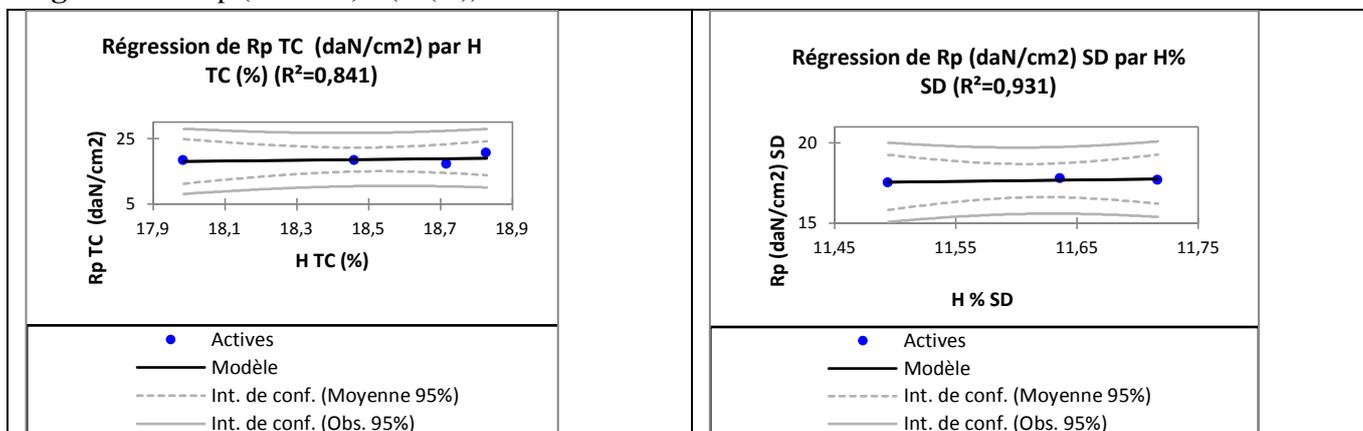
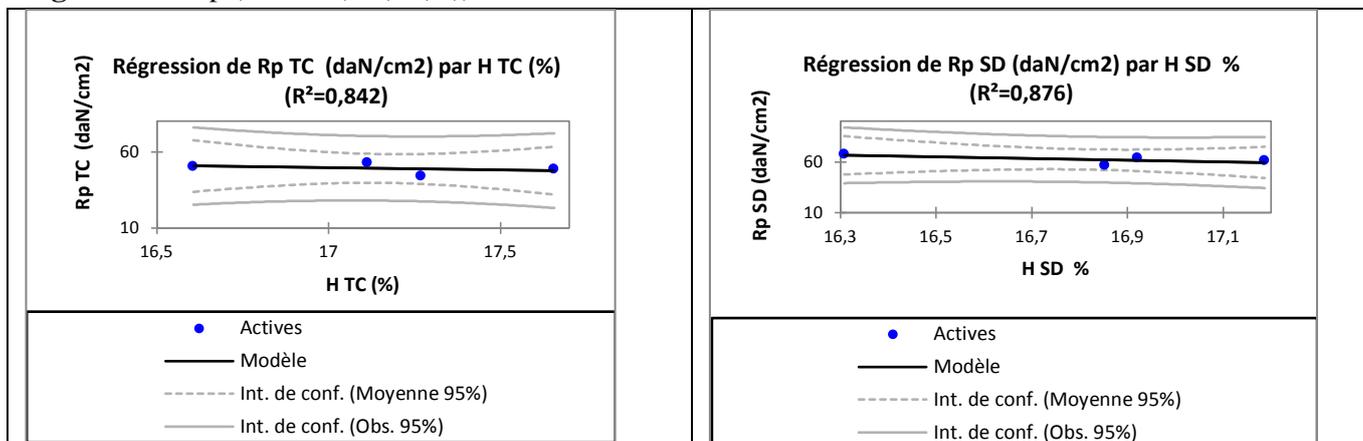
Techniques	Nombre d'épis /m2	Nombre des grains /épi	PMG	Rendement théorique (q/ha)
<b>Technique conventionnelle Dose 1</b>	245	57	46	56,13
<b>Technique conventionnelle Dose 2</b>	264	57	47	69,23
<b>Semis direct dose1</b>	222	56	40	47,24
<b>Semis direct dose2</b>	237	55	46	58,35

**Tableau G-3:** Rendements en matière vert et matière sèche du bersim

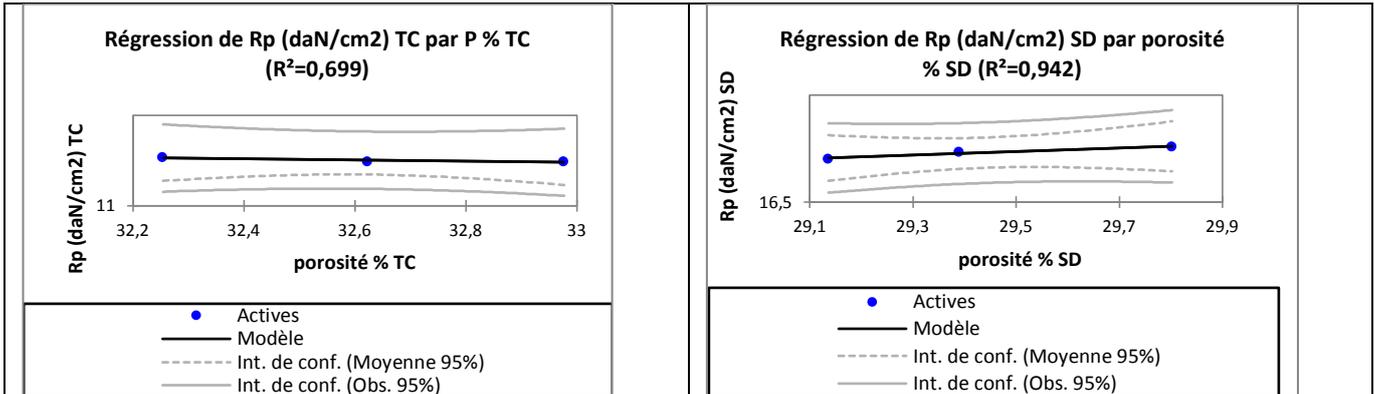
Technique	Dose	Bloc	Rendement en MV(t/ha) coupe n°1	Rendement en MS(t/ha) coupe n°1	Rendement en MV(t/ha) coupe n°2	Rendement en MS(t/ha) coupe n°2
T1	d1	1	1,365	0,435	3,817	1,250
T1	d1	1	1,374	0,441	3,926	1,374
T1	d1	1	1,581	0,466	3,728	1,402
T1	d1	2	1,618	0,478	3,798	1,254
T1	d1	2	1,668	0,522	3,786	1,478
T1	d1	2	1,775	0,544	3,592	1,416
T1	d1	3	1,812	0,438	3,445	1,456
T1	d1	3	1,660	0,568	3,803	1,292
T1	d1	3	1,723	0,565	3,947	1,496
T1	d1	4	1,695	0,413	3,734	1,207
T1	d1	4	1,342	0,627	3,622	1,401
T1	d1	4	1,550	0,711	3,769	1,260
T1	d2	1	2,287	1,236	5,605	2,027
T1	d2	1	2,123	1,146	5,686	2,054
T1	d2	1	2,008	1,105	5,652	1,883
T1	d2	2	2,133	1,190	5,786	1,896
T1	d2	2	1,951	1,069	5,566	2,072
T1	d2	2	2,313	1,144	5,510	2,312
T1	d2	3	2,145	1,152	5,670	2,283
T1	d2	3	2,163	1,160	5,933	2,201
T1	d2	3	2,154	1,140	5,527	2,000
T1	d2	4	2,016	1,176	5,700	2,000
T1	d2	4	2,123	1,396	5,600	2,184
T1	d2	4	1,965	1,005	5,758	2,305
T2	d1	1	3,204	1,288	4,130	1,754
T2	d1	1	3,180	1,473	4,328	1,867
T2	d1	1	3,212	1,422	4,386	1,886
T2	d1	2	2,937	1,546	4,056	1,606
T2	d1	2	2,576	1,268	4,377	1,687
T2	d1	2	2,753	1,297	4,134	1,916
T2	d1	3	2,580	1,281	4,004	1,840
T2	d1	3	2,674	1,282	4,182	1,808
T2	d1	3	2,584	1,270	4,039	1,806
T2	d1	4	2,906	1,294	4,257	1,889
T2	d1	4	2,801	1,263	4,238	1,925
T2	d1	4	2,793	1,167	4,282	1,985
T2	d2	1	2,881	1,298	7,604	3,830
T2	d2	1	2,985	1,314	6,849	3,276
T2	d2	1	2,885	1,355	7,571	3,515
T2	d2	2	2,844	1,470	7,196	3,586
T2	d2	2	2,841	1,415	7,587	3,906
T2	d2	2	3,137	1,350	7,894	2,922
T2	d2	3	3,374	1,444	7,318	3,376
T2	d2	3	3,017	1,325	7,528	3,807
T2	d2	3	3,376	1,399	7,752	3,896
T2	d2	4	3,159	1,382	7,464	3,976
T2	d2	4	2,810	1,372	7,688	3,478
T2	d2	4	3,036	1,328	7,227	3,706

**Tableau G-3-3':** Récapitulatif des rendements en MV et MS en fonction de la technique et la dose de semis de bersim

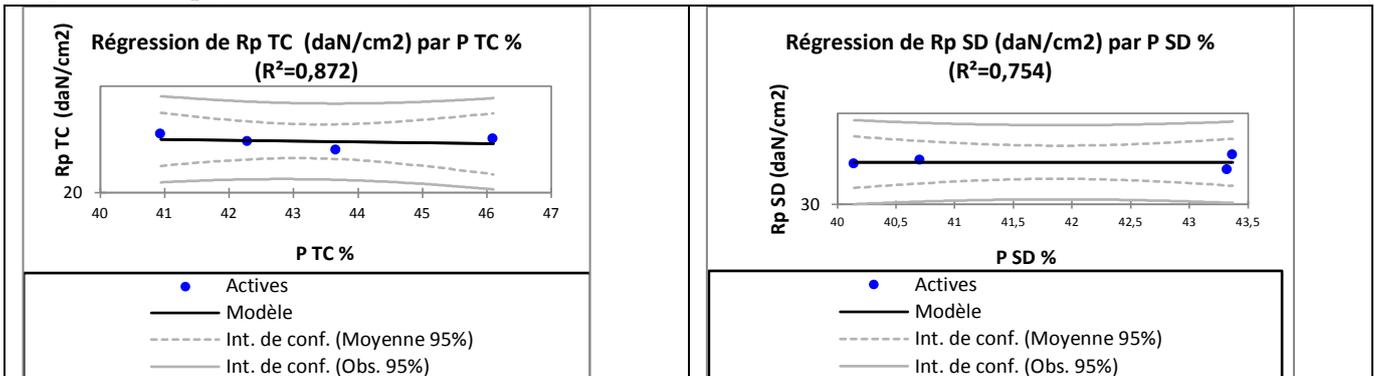
Techniques	Rendement en MV(t/ha)		Rendement en MS(t/ha)	
	Coupe n°1	Coupe n°2	Coupe n°1	Coupe n°2
Technique conventionnelle Dose 1	0,51	1,59	1,35	3,74
Technique conventionnelle Dose 2	1,16	2,11	2,10	5,66
Semis direct dose1	1,32	2,85	1,83	4,20
Semis direct dose2	1,37	3,02	3,60	7,47

Figure A-1 :  $R_p$  (daN/cm<sup>2</sup>)=f(H (%))-sorgho fourragerFigure A-2 :  $R_p$  (daN/cm<sup>2</sup>)=f(H (%))-blé durFigure A-3:  $R_p$  (daN/cm<sup>2</sup>)=f(H (%))-bersim

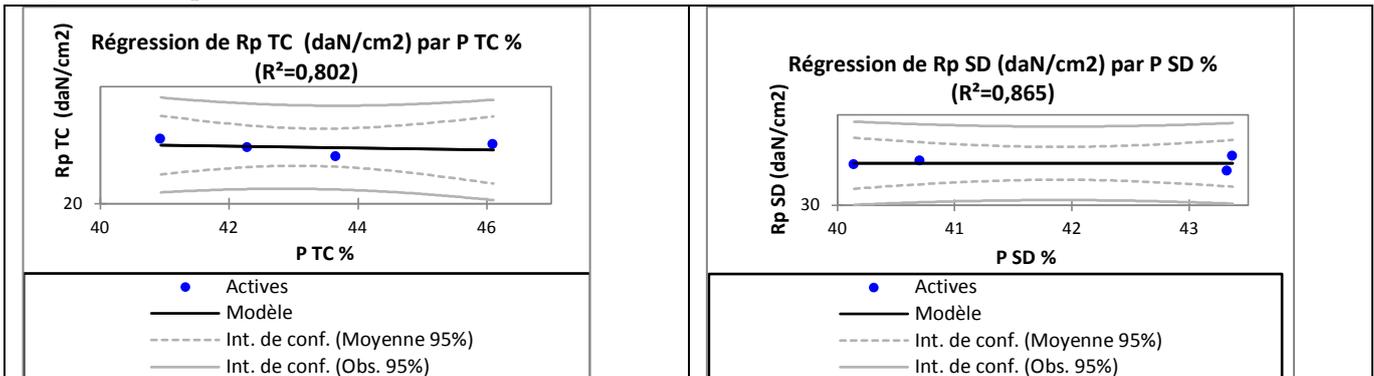
**Figure B-1:** Rp (daN/cm<sup>2</sup>)=f(P (%))-Sorgho fourrager



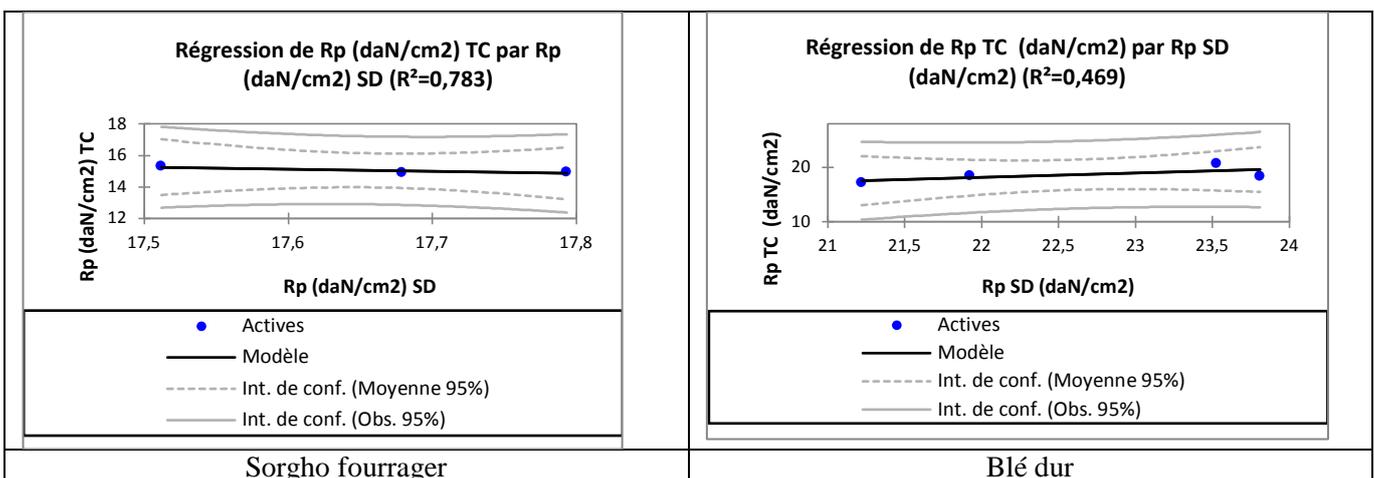
**Figure B-2:** Rp (daN/cm<sup>2</sup>)=f(P (%))-Blé dur

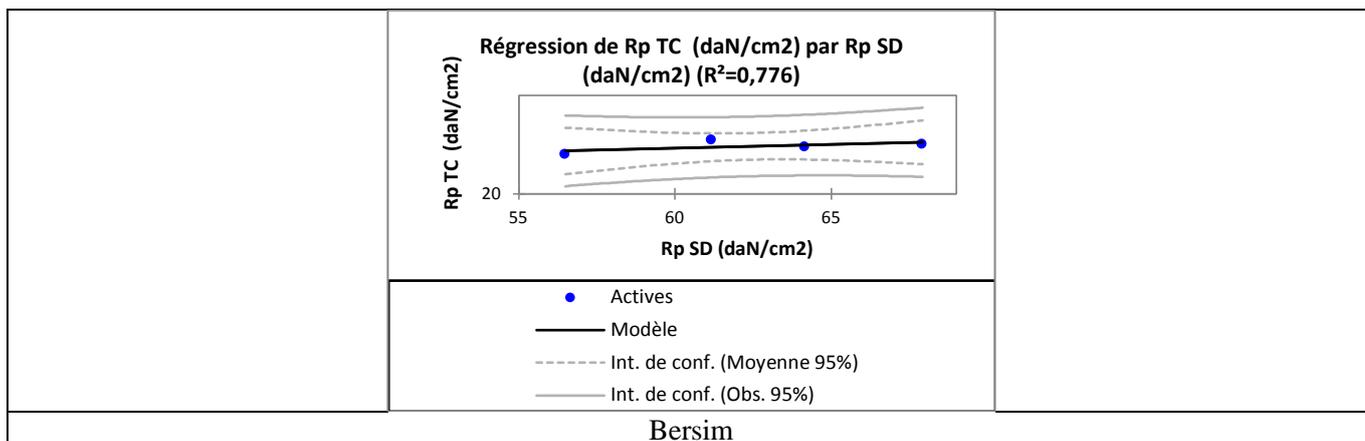


**Figure B-3:** Rp (daN/cm<sup>2</sup>)=f(P (%))-bersim

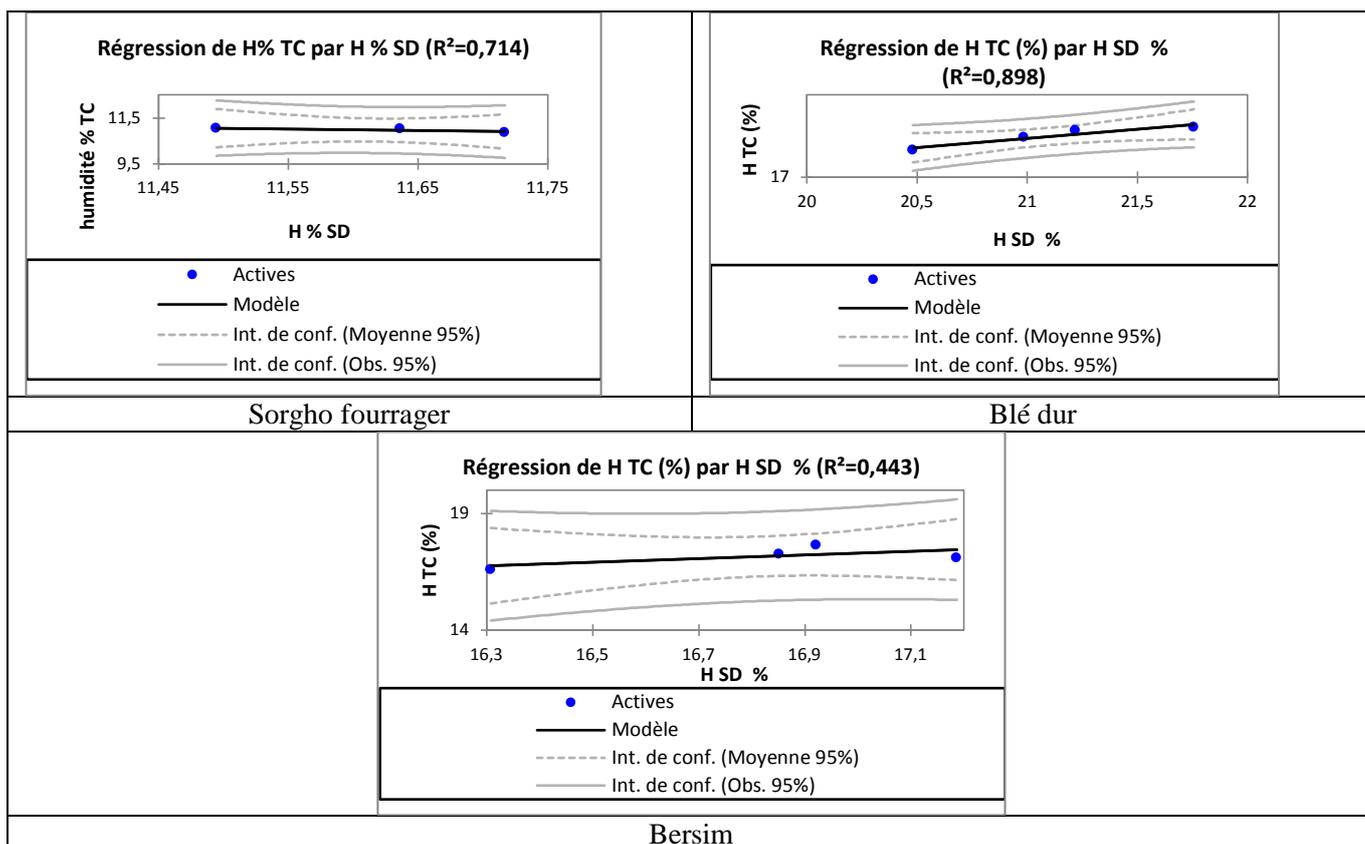


**Figure C-1 :** Rp (TC)=f( Rp (SD))

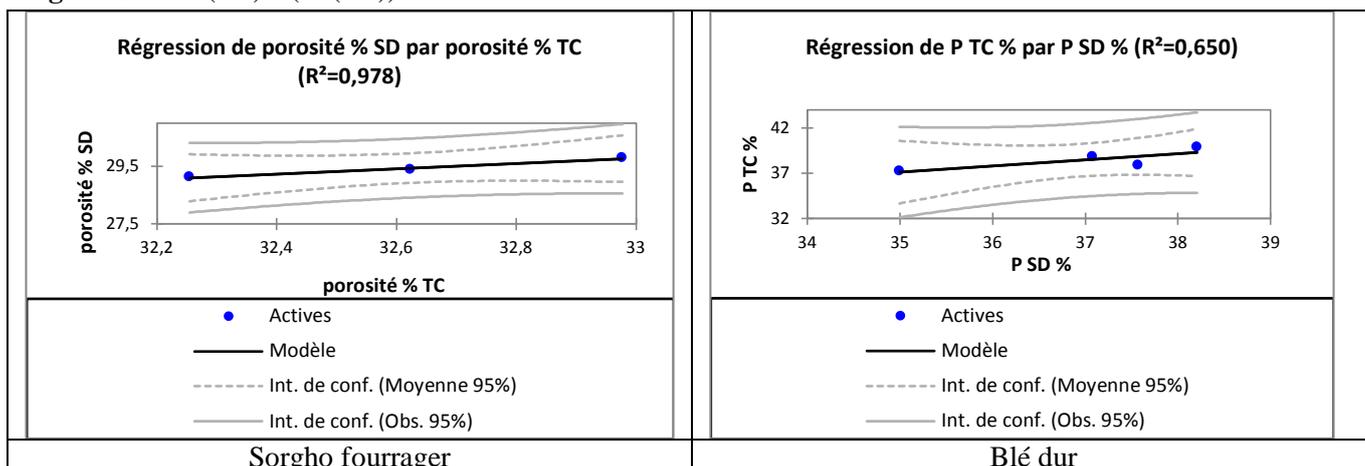




**Figure C-2 : H (TC)=f( H (SD))**



**Figure C-3 : P (TC)=f( P (SD))**



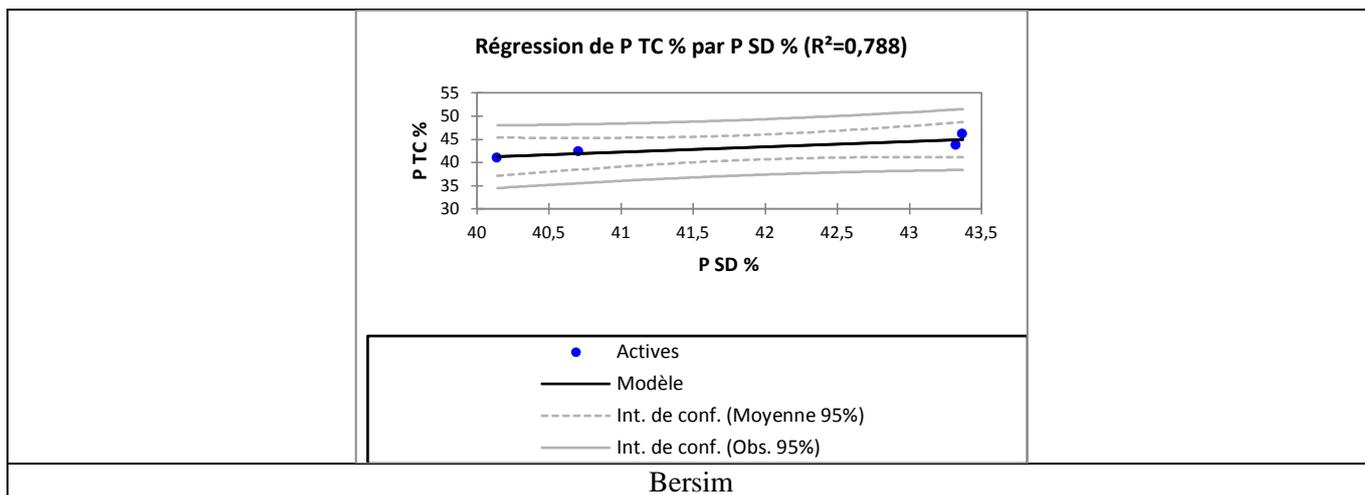


Figure D-1 : Nbr plants/m<sup>2</sup> =f(Dr)-sorgho fourrager

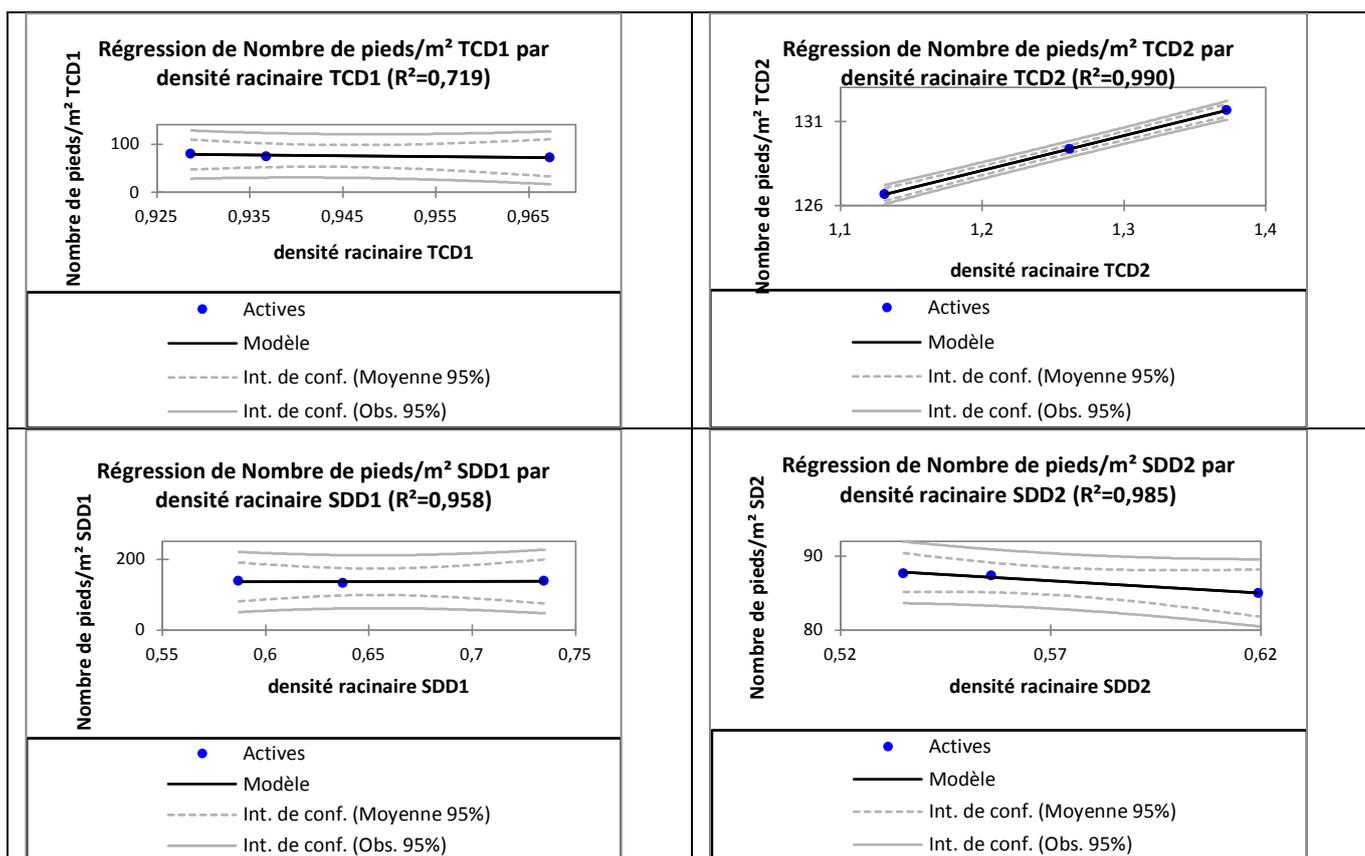
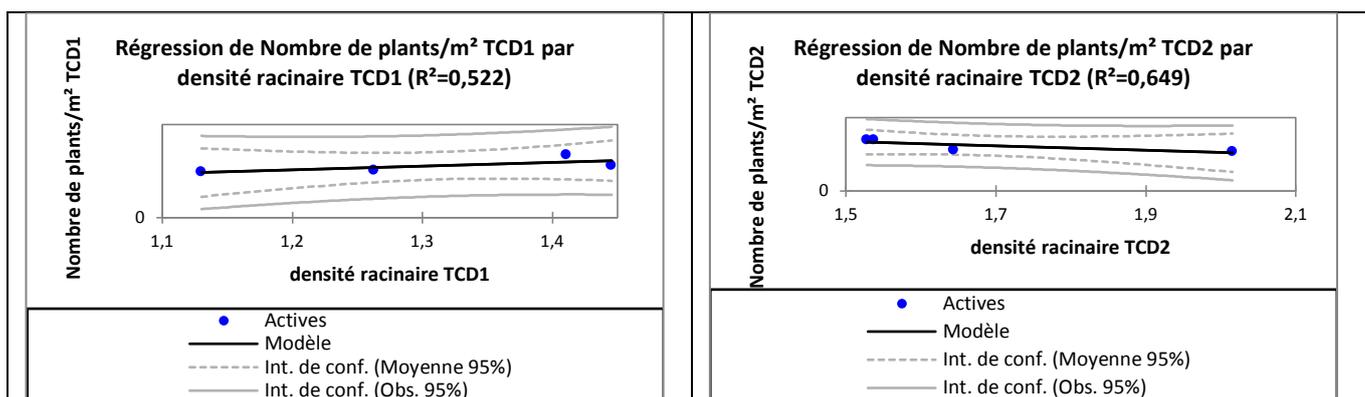


Figure D-2 : Nbr plants/m<sup>2</sup> =f(Dr)-blé dur



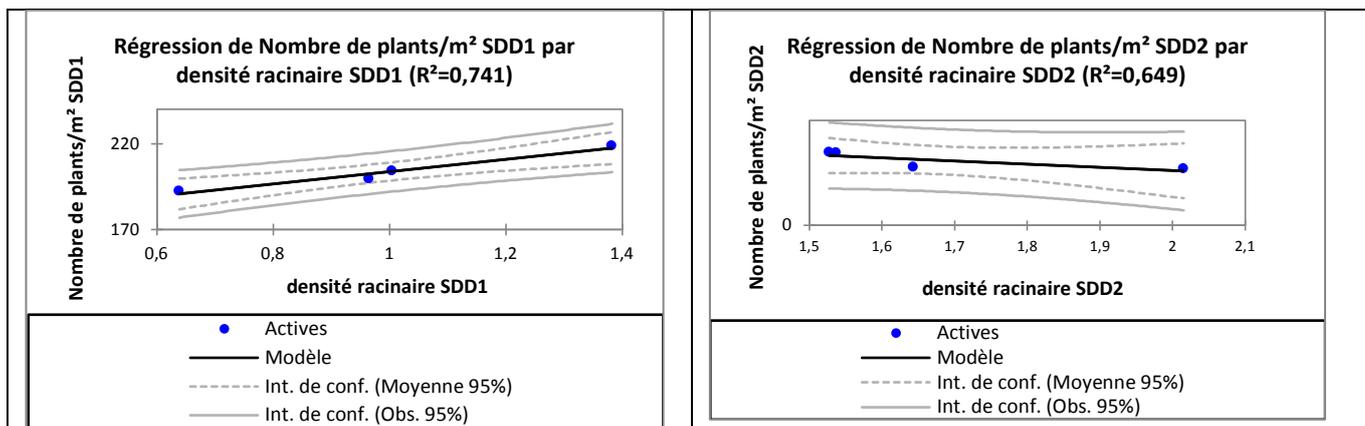


Figure D-3 : Nbr plants/m<sup>2</sup> =f(Dr)-Bersim

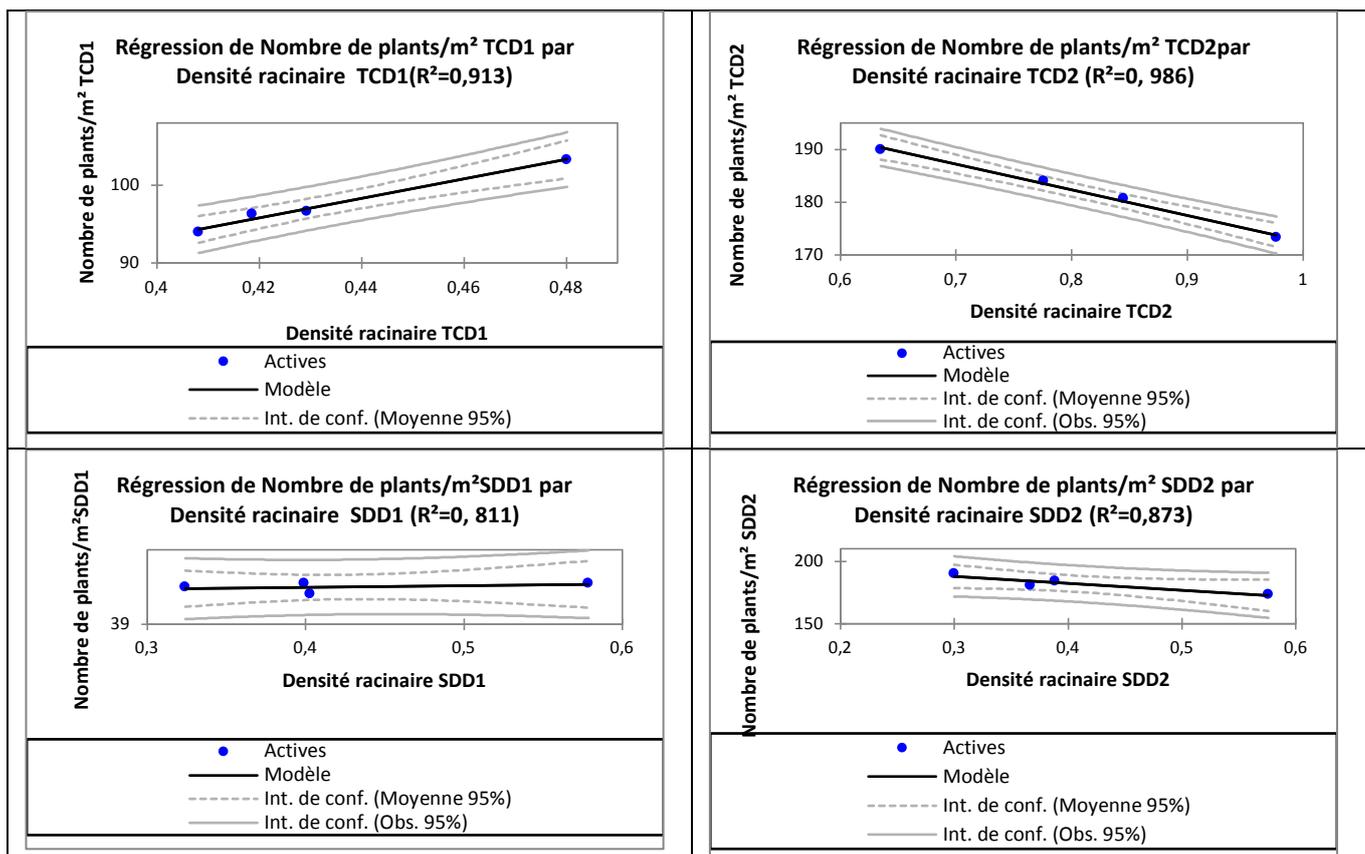
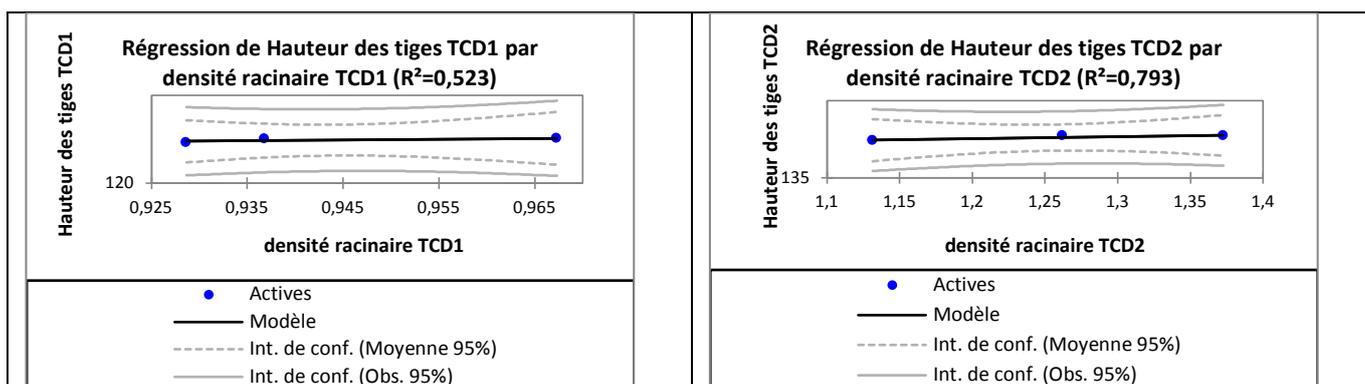
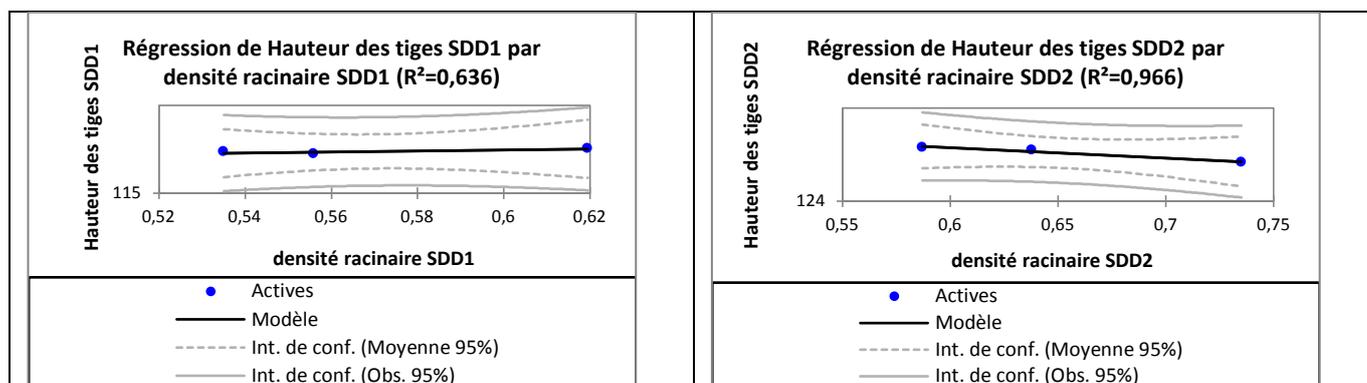
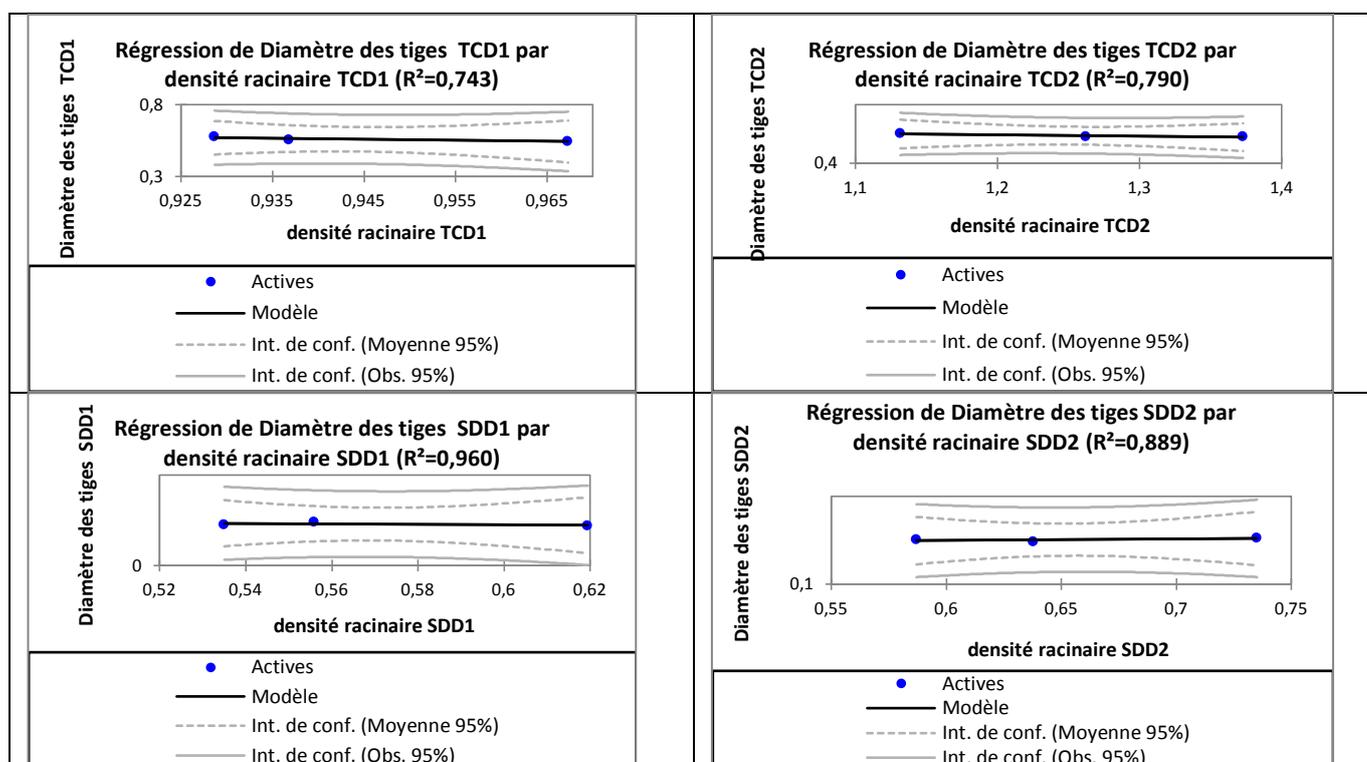
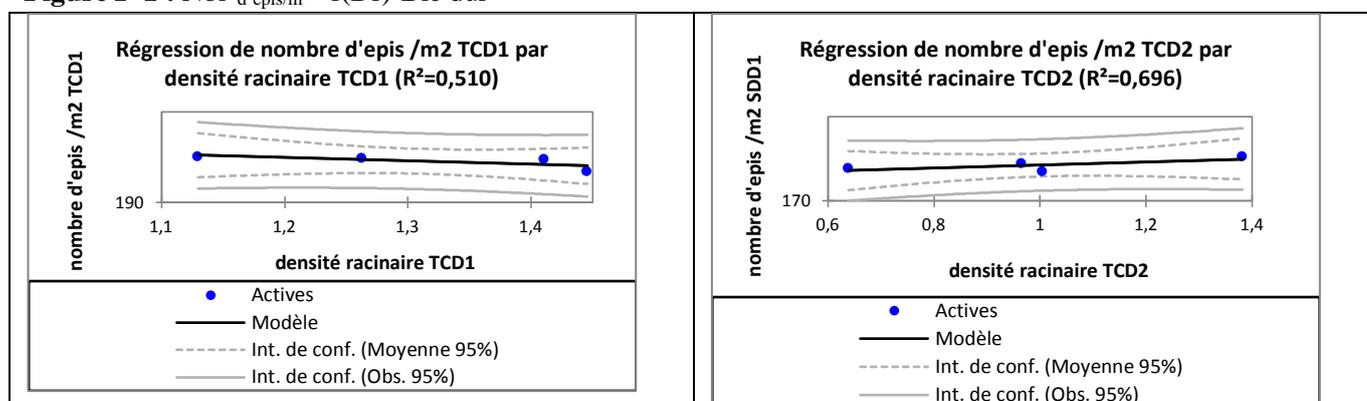


Figure E-1 : H tiges =f(Dr) du sorgho fourrager



Figure E-2 :  $D_{tiges} = f(D_r)$  du sorgho fourragerFigure F-1 :  $Nbr_{d'epis/m^2} = f(D_r)$ -Blé dur

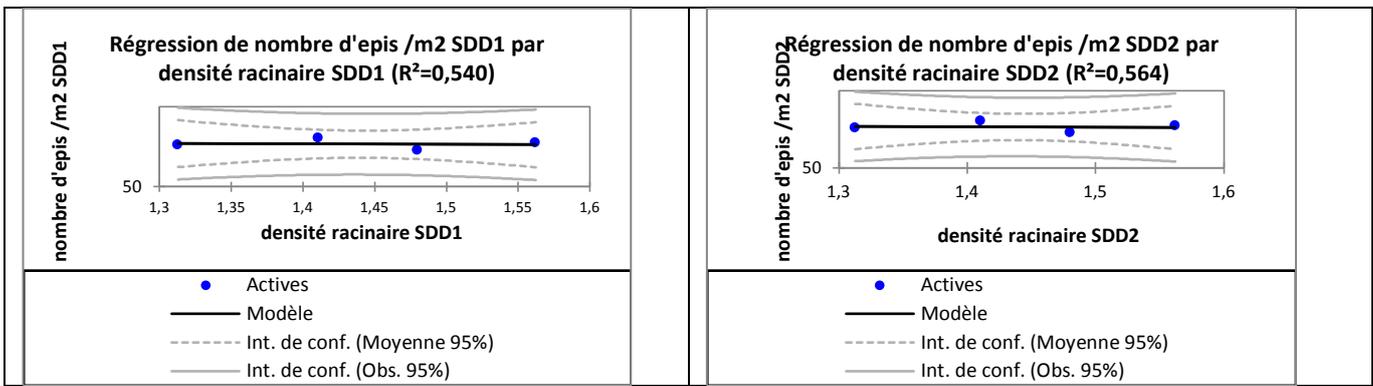


Figure F-2 : PMG =f(Dr)-blé dur

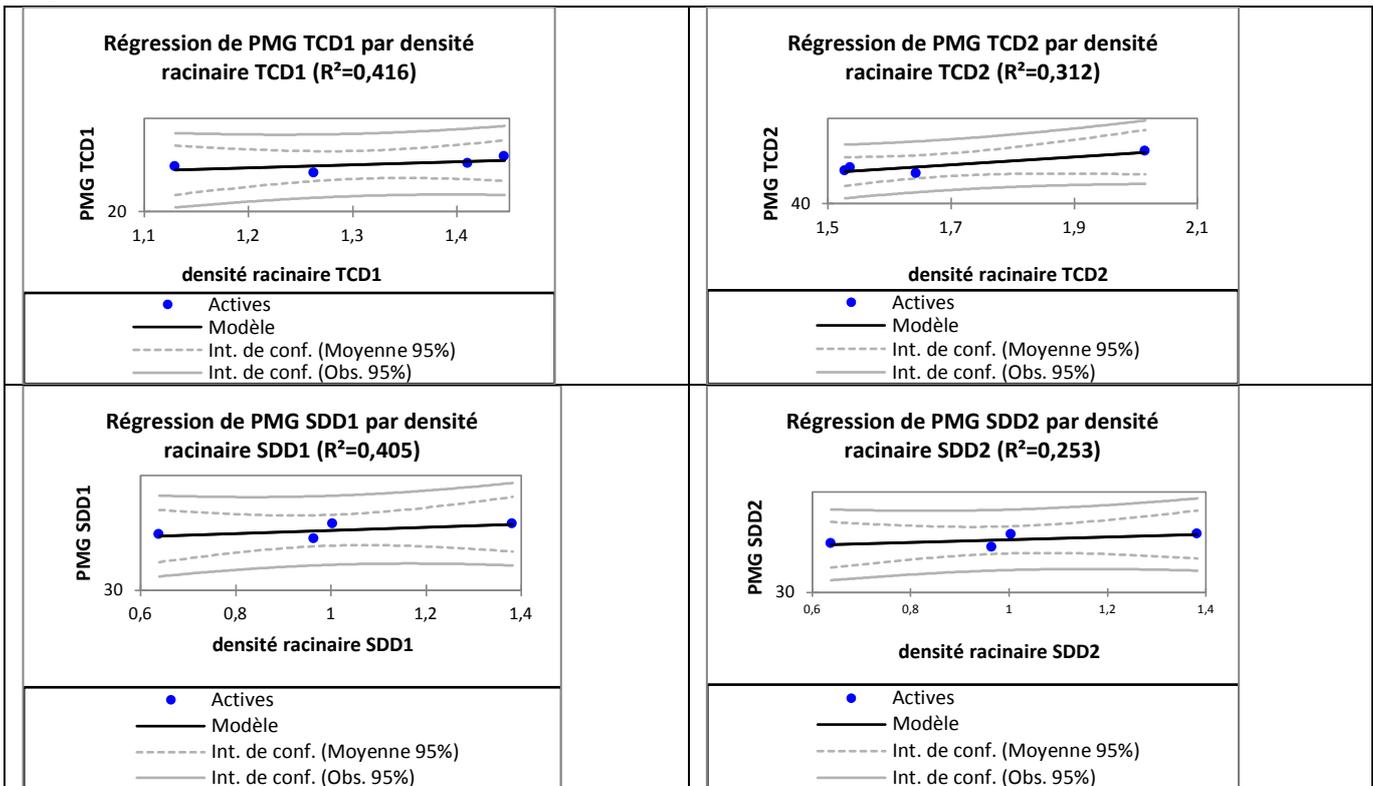
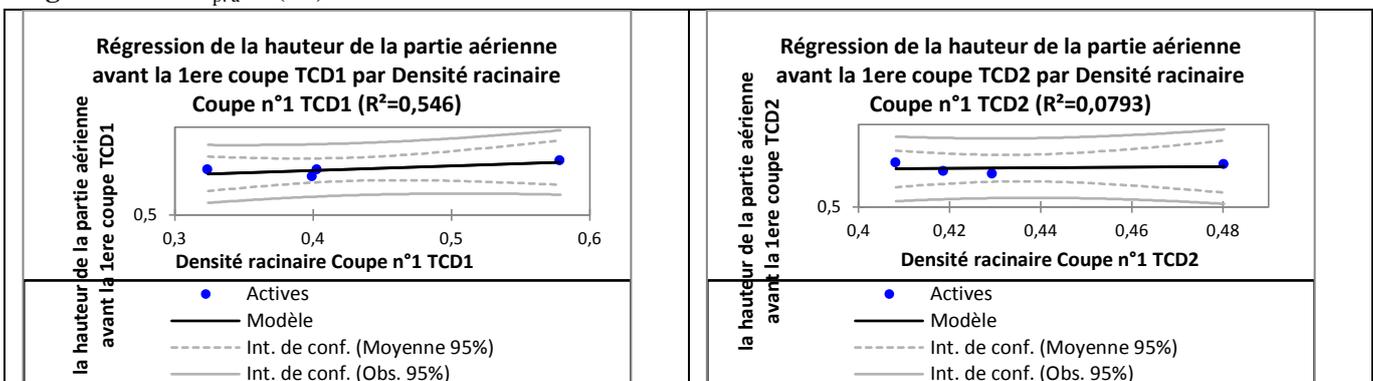
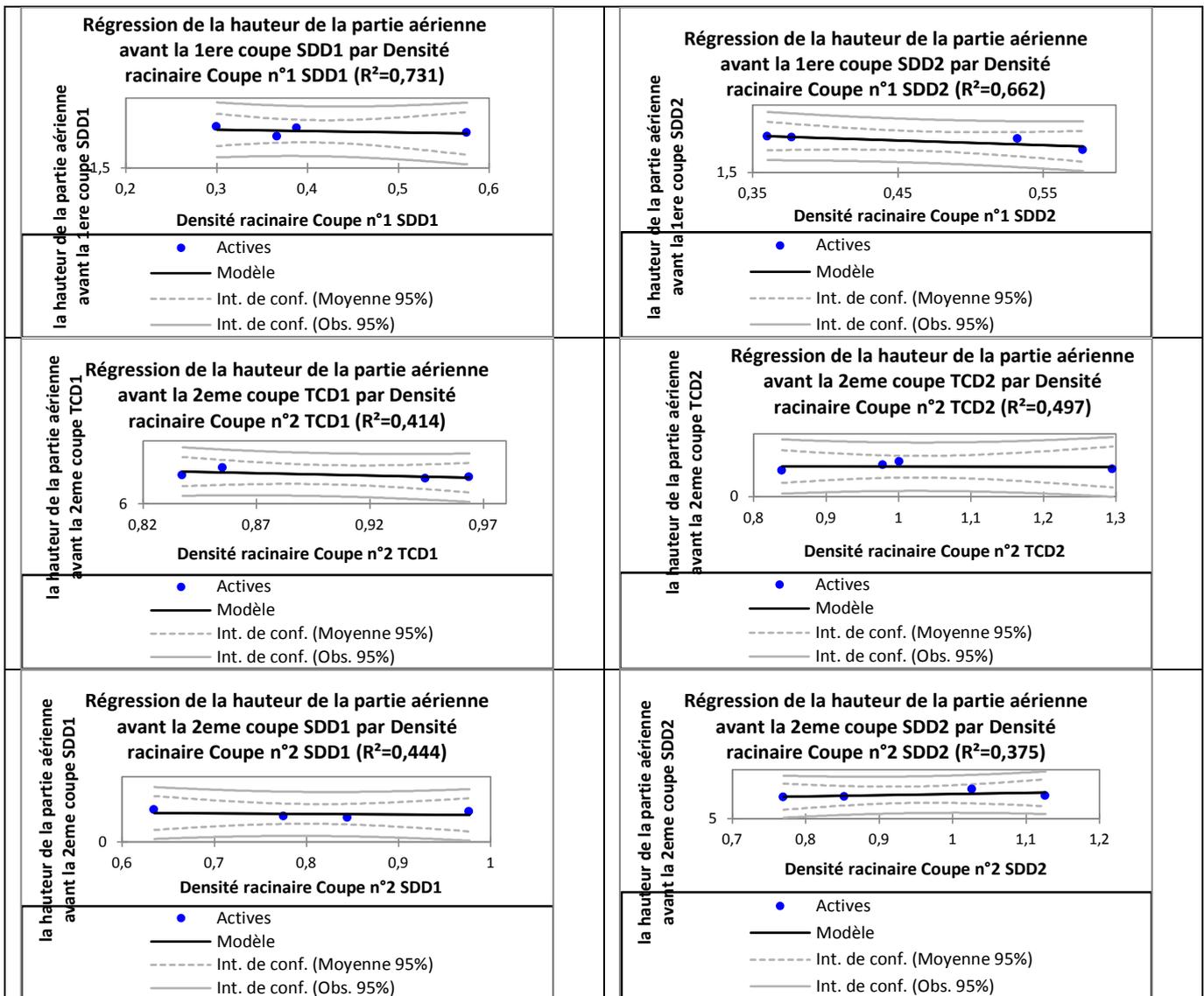
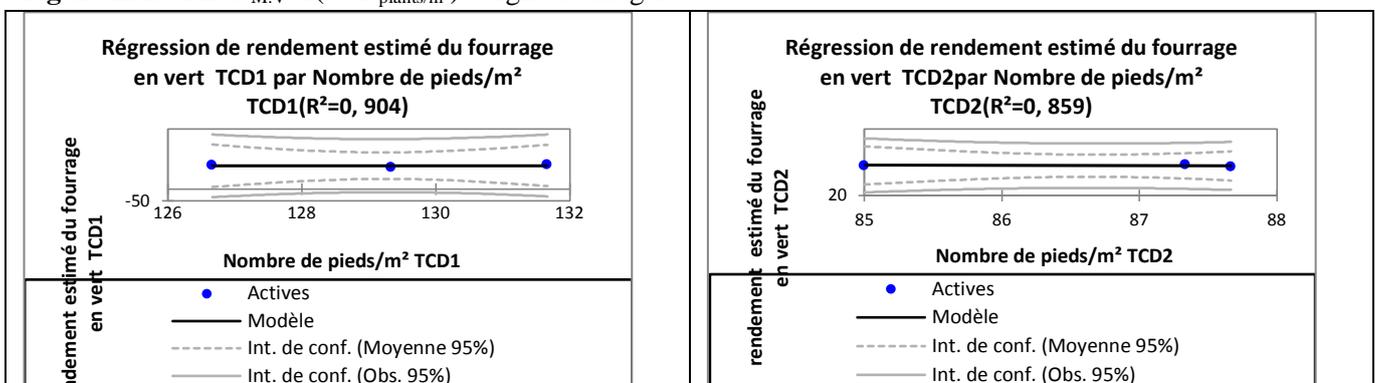
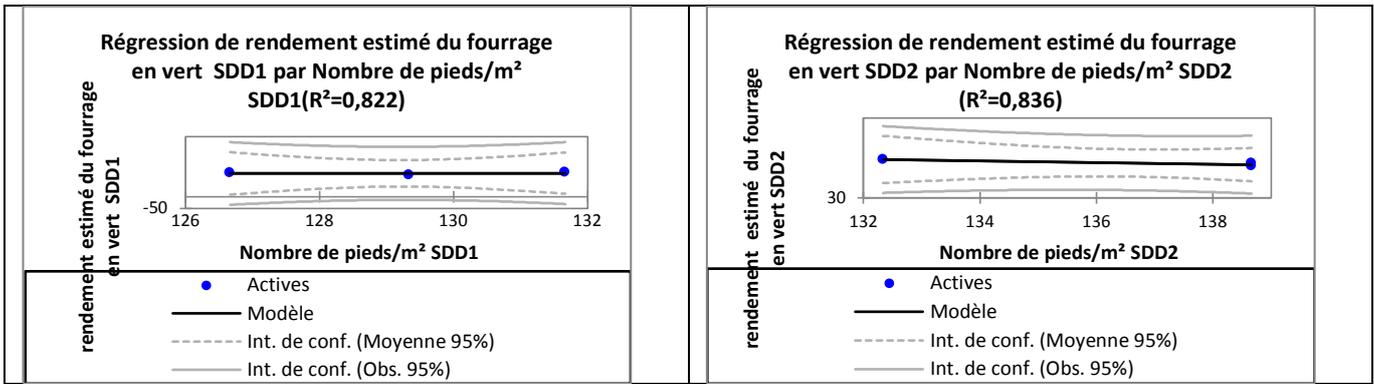


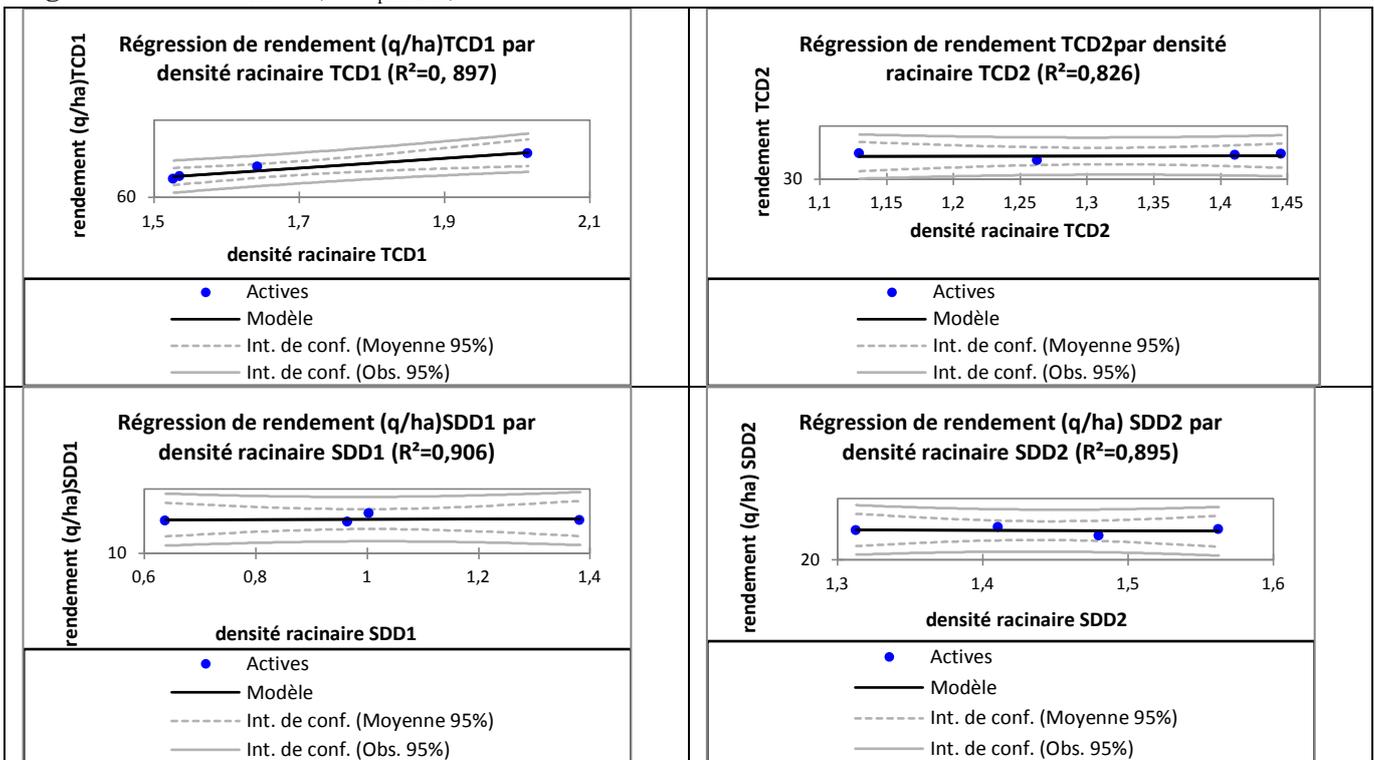
Figure G-1 : H<sub>p.a</sub> =f(Dr)-bersim



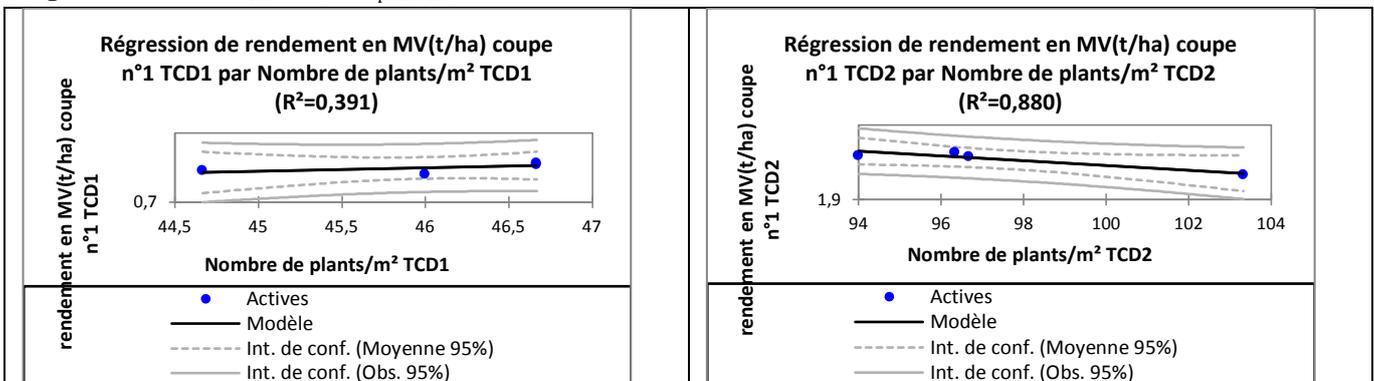
Figure H-1 :  $RDT_{M.V} = f(\text{Nbr}_{\text{plants}/m^2})$  - sorgho fourrager



**Figure H-2 : RDT<sub>M.V</sub>=f(Nbr<sub>plants/m<sup>2</sup></sub>)-Blé dur**



**Figure H-3 : RDT<sub>M.V</sub>=f(Nbr<sub>plants/m<sup>2</sup></sub>)-bersim**



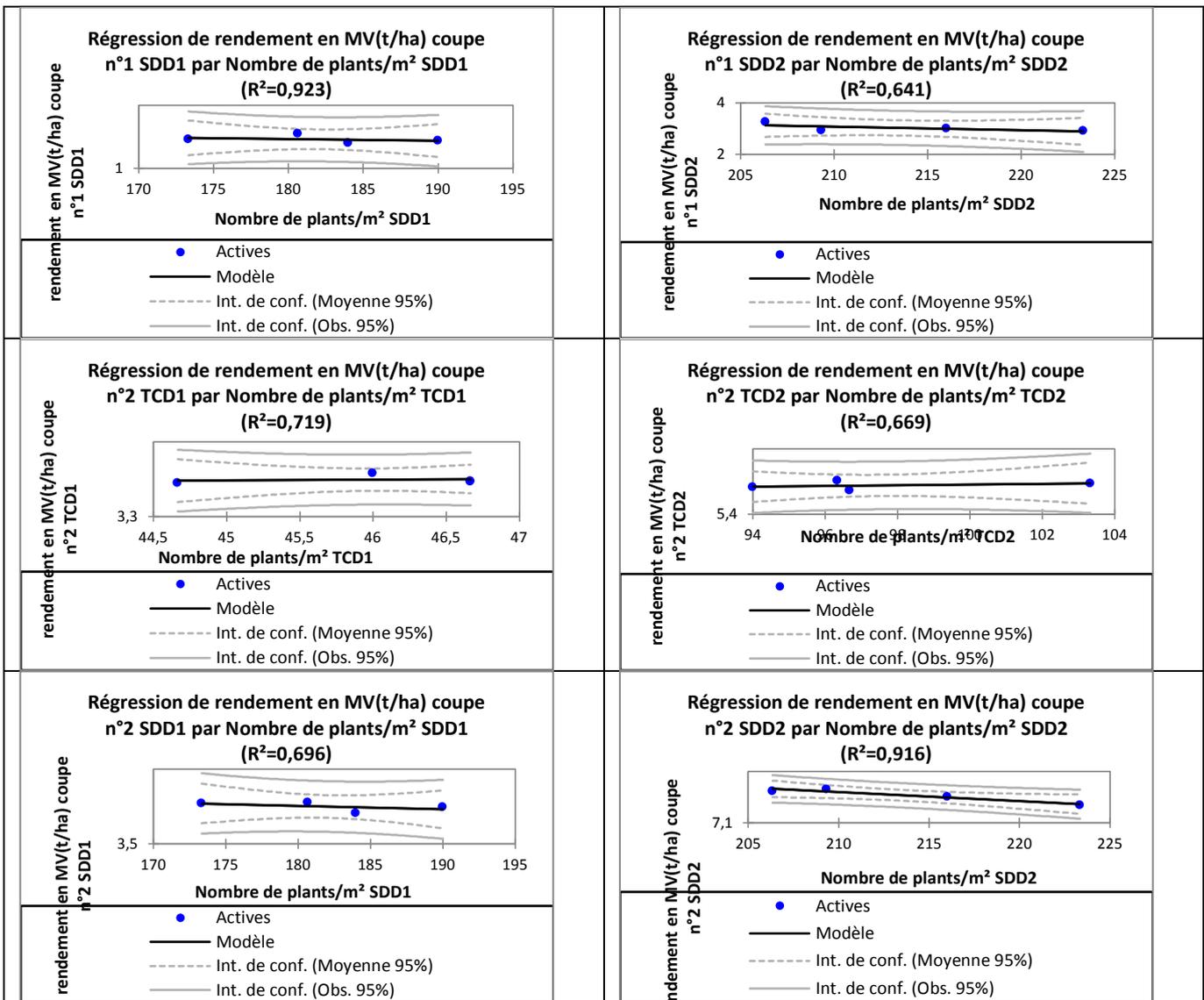
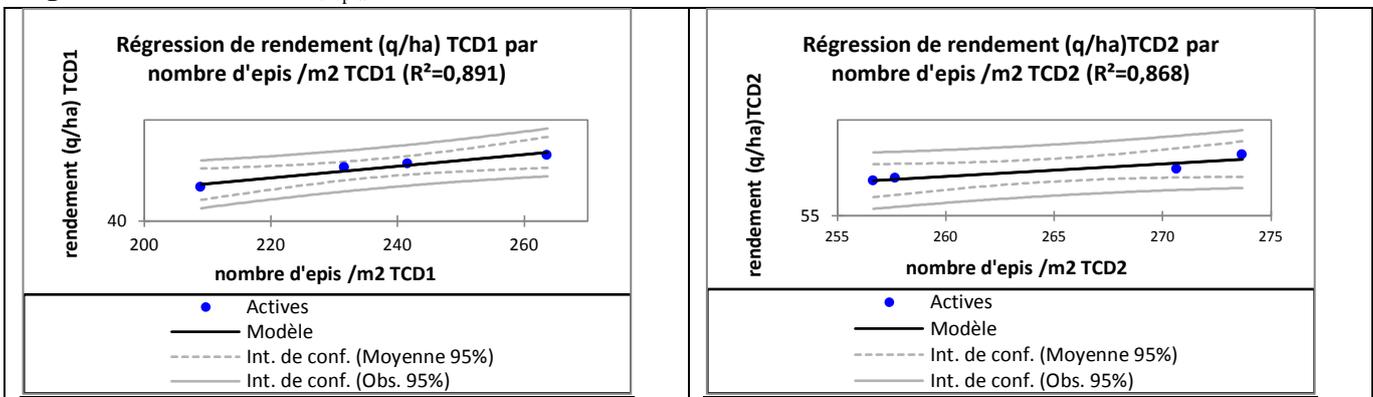
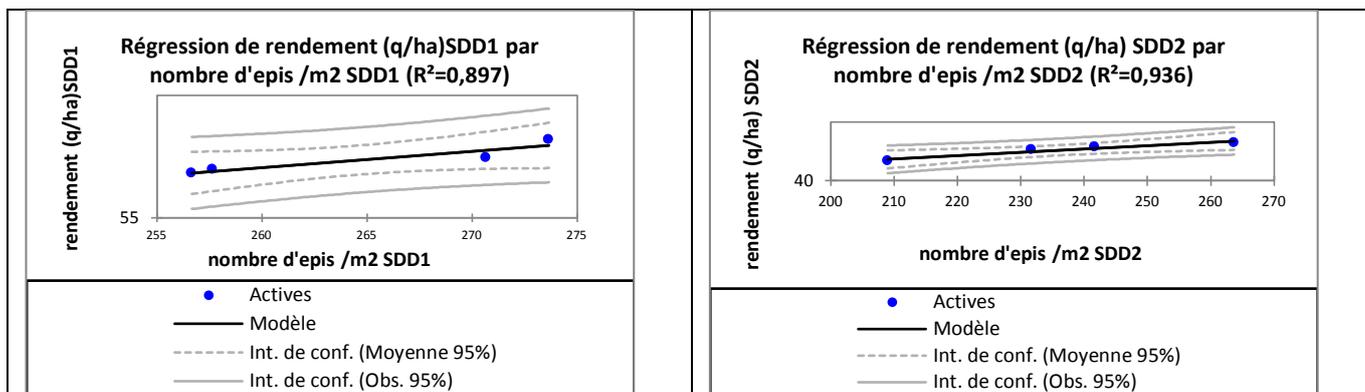
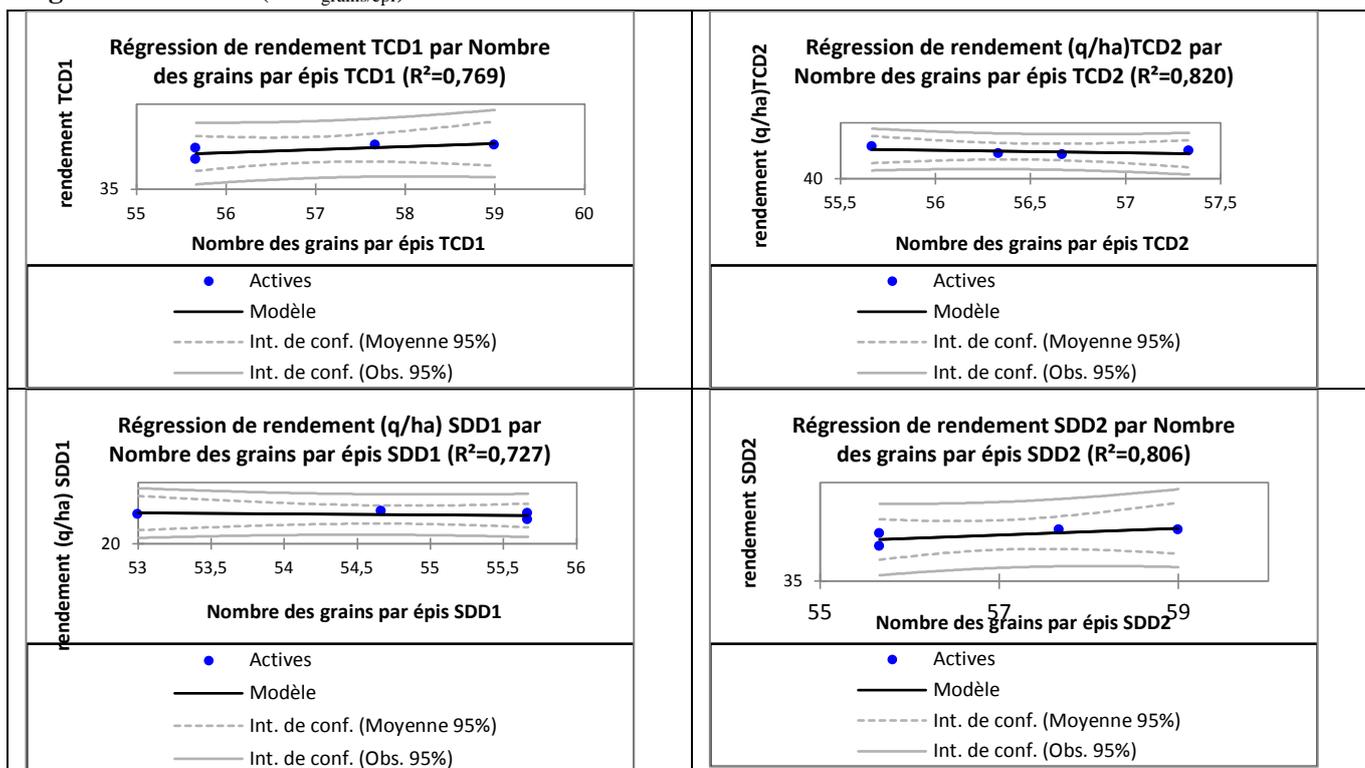


Figure I-1 : RDT=f(Nbr d'épis/m<sup>2</sup>) –blé dur

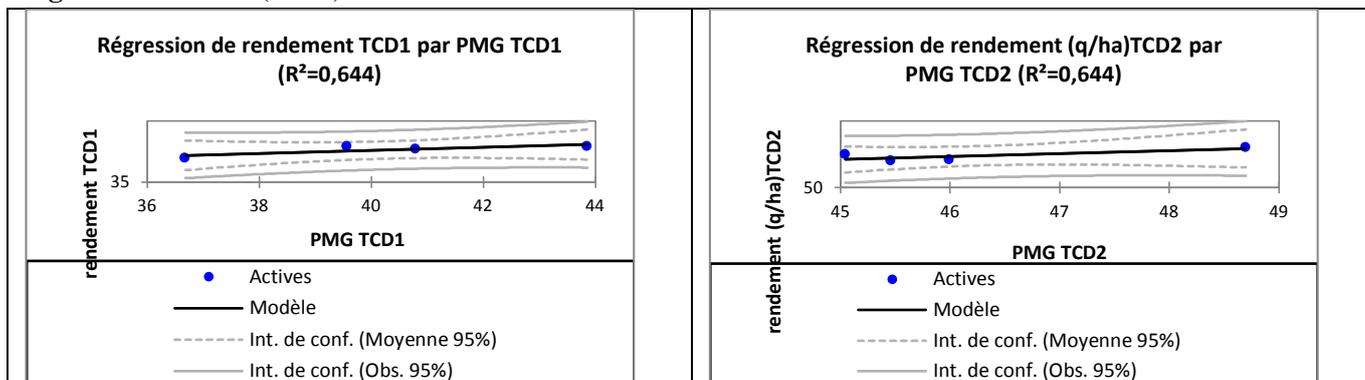




**Figure I-2 : RDT=f(Nbr<sub>grains/épi</sub>)-blé dur**



**Figure I-3: RDT= f(PMG)**



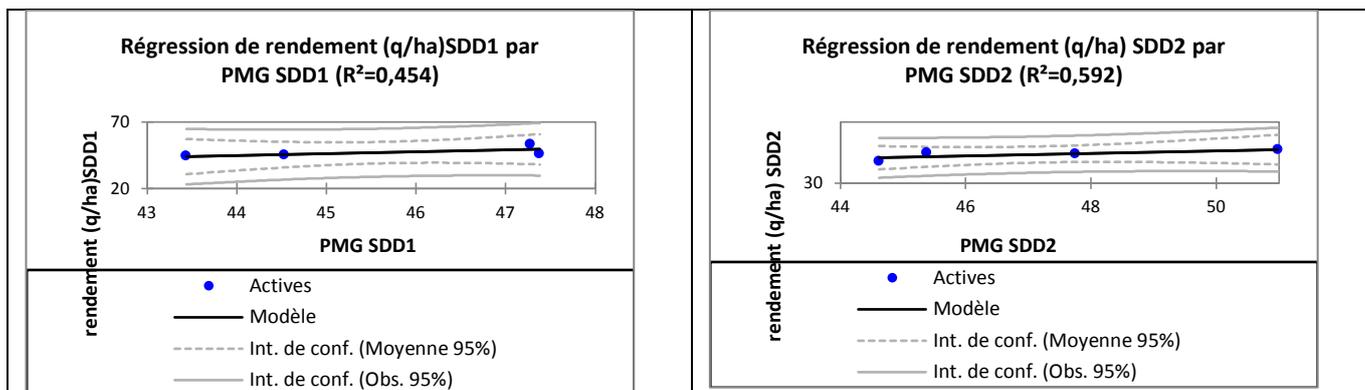


Figure J-1: RDT  $M.V=f(Dr)$ sorgho fourager

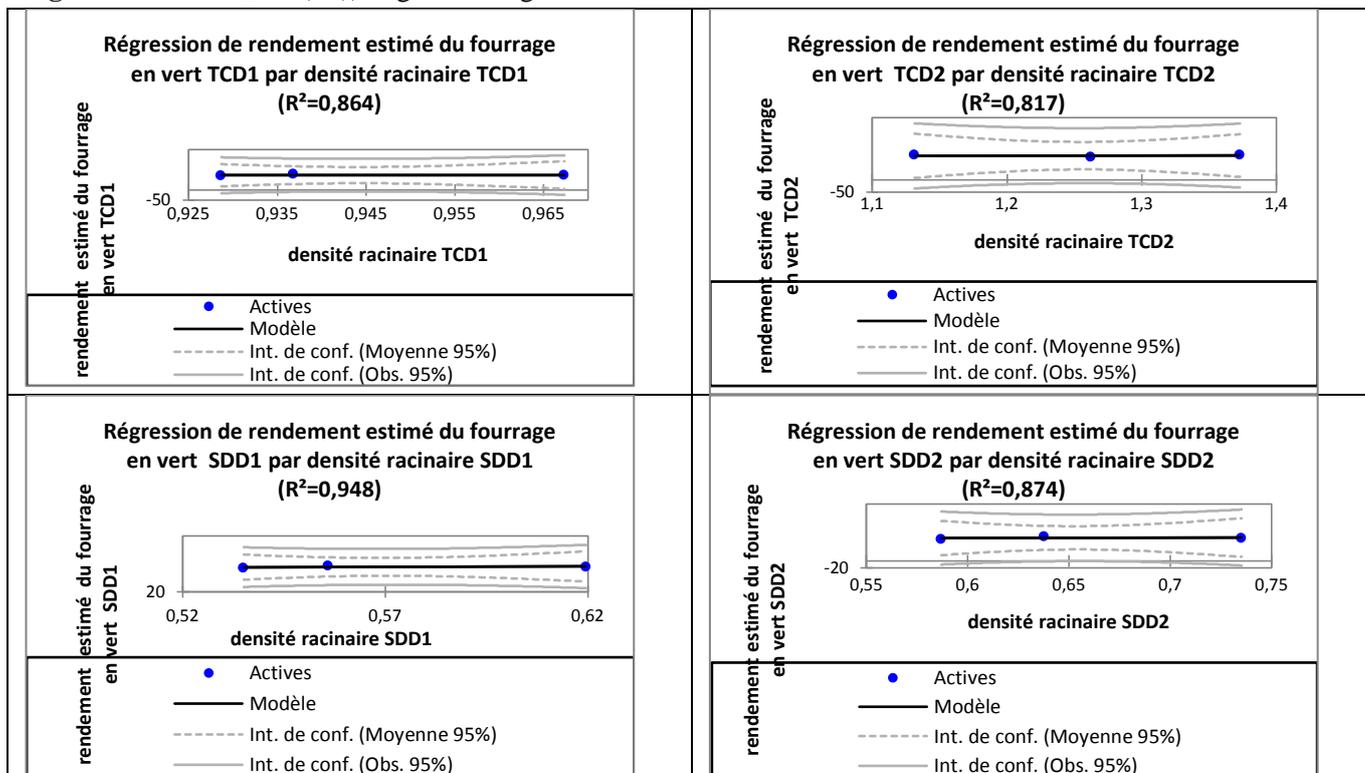
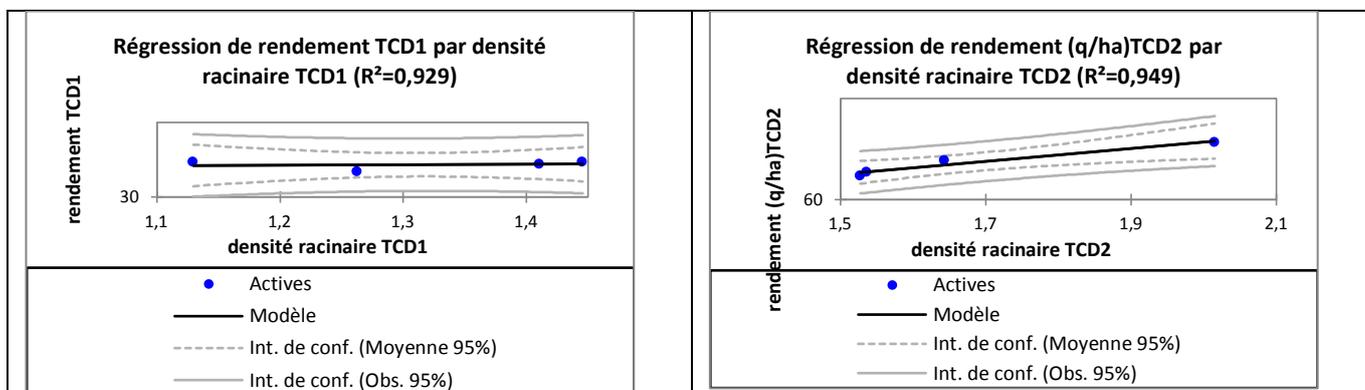


Figure J-2: RDT  $=f(Dr)$ -blé dur



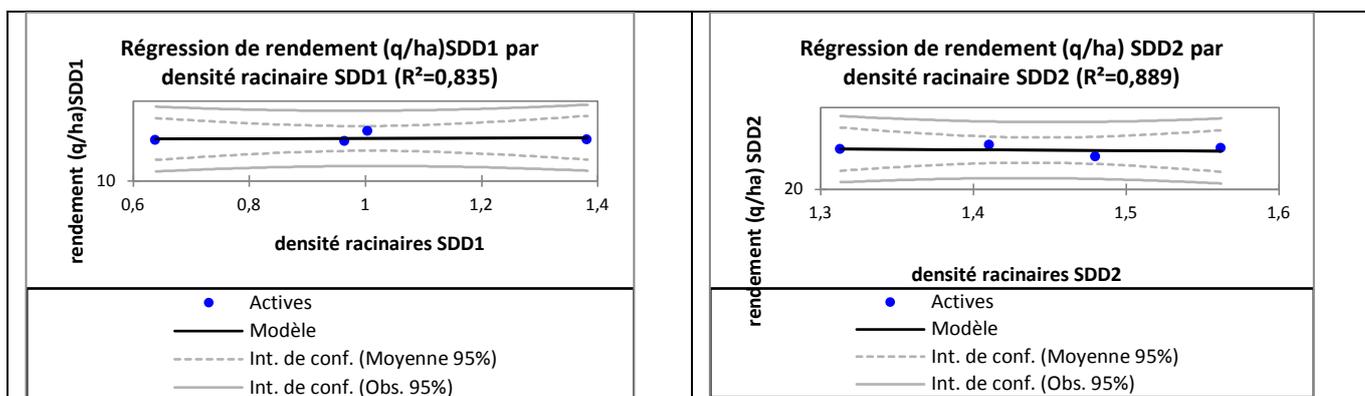
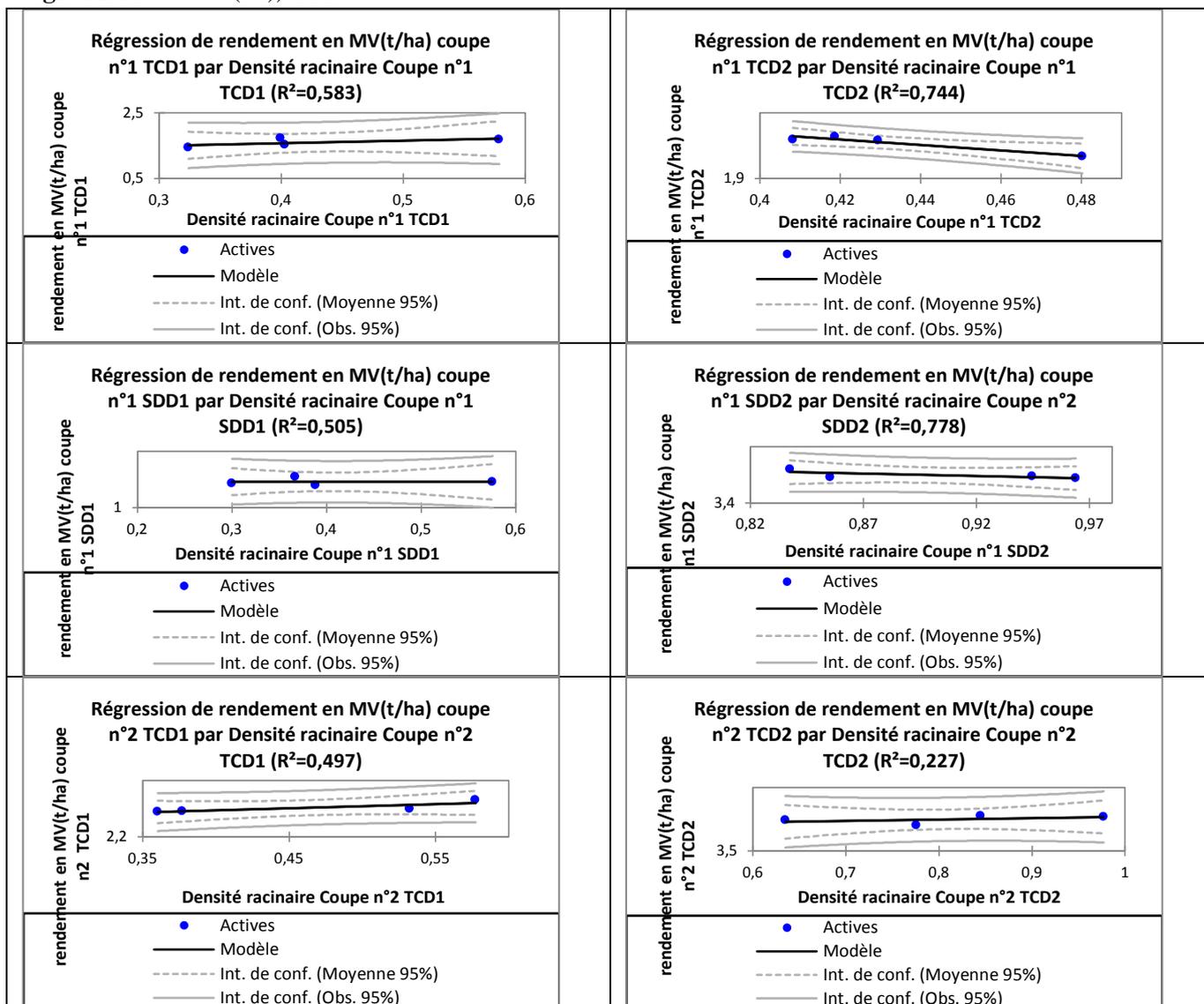
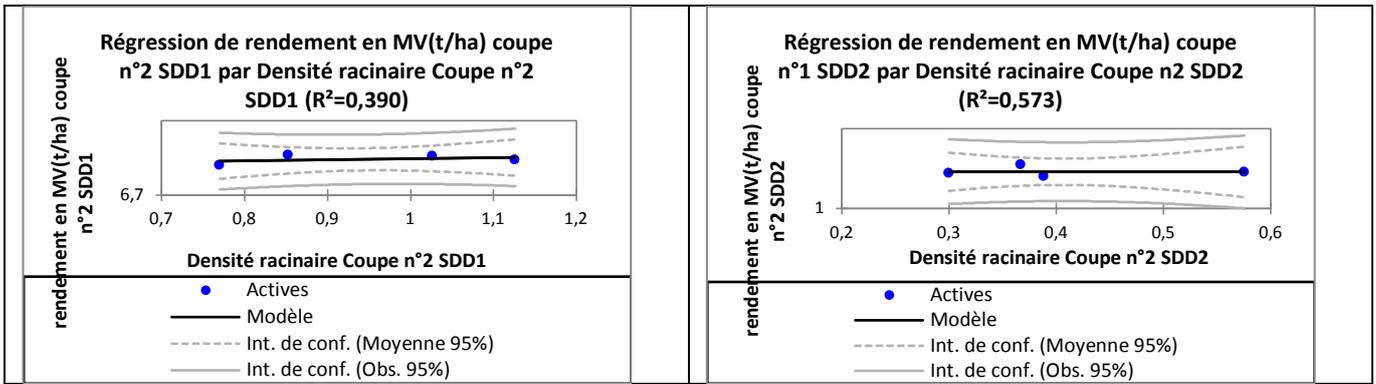
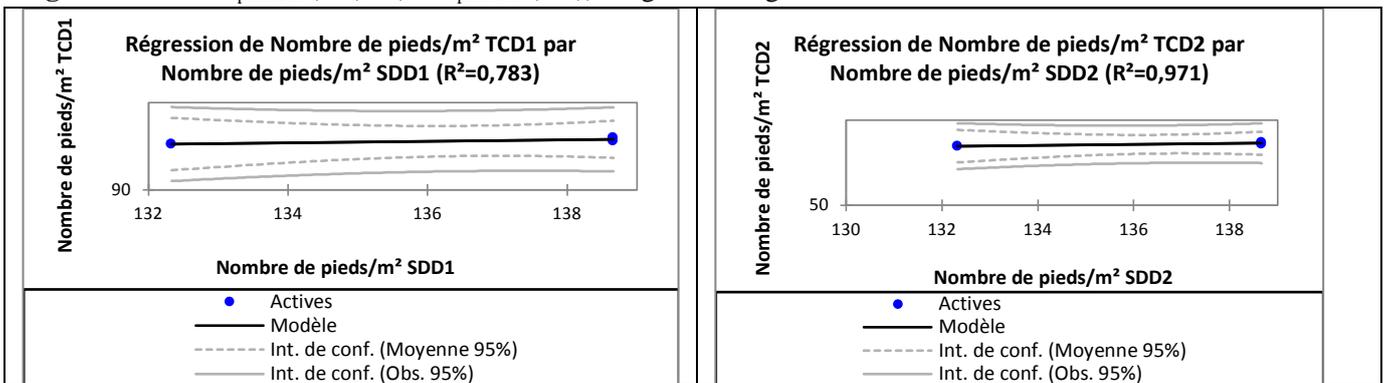


Figure J-3: RDT =f(Dr))-bersim

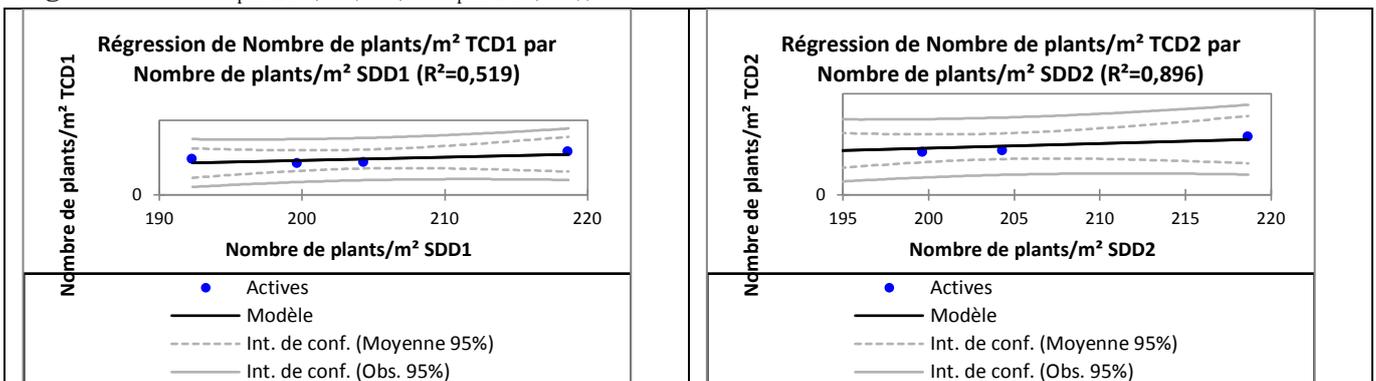




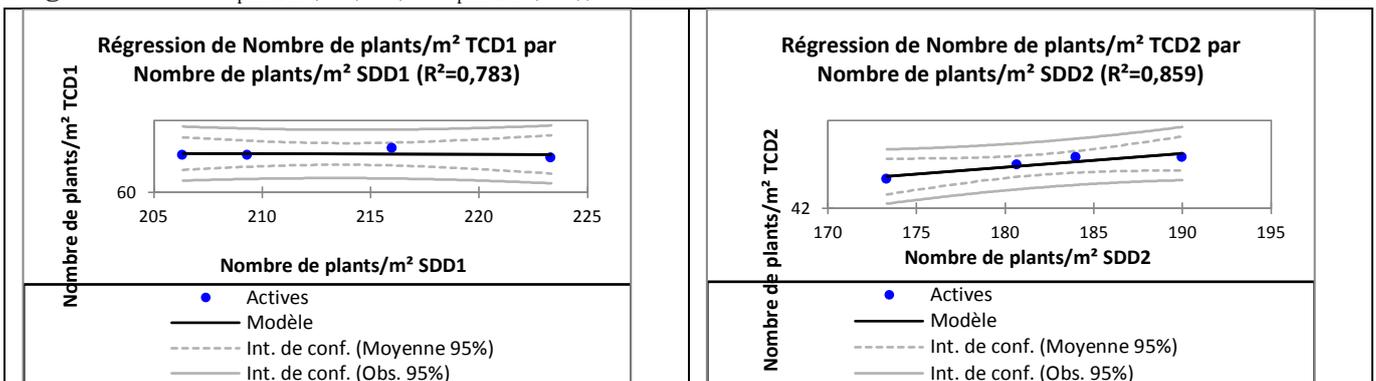
**Figure K-1 :**  $Nbr_{plants/m^2}(TC)=f(Nbr_{plants/m^2}(SD))$ -sorgho fourrager



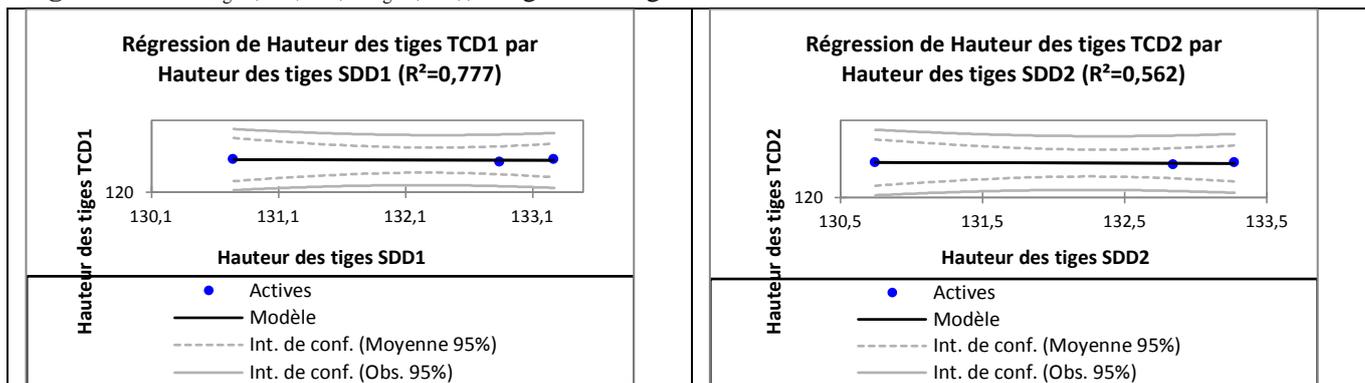
**Figure K-2 :**  $Nbr_{plants/m^2}(TC)=f(Nbr_{plants/m^2}(SD))$ -blé dur



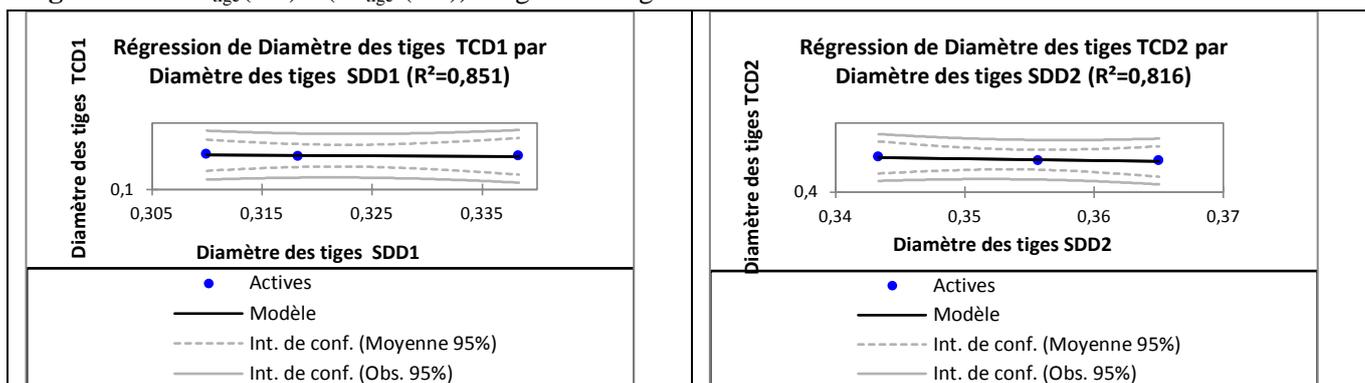
**Figure K-3 :**  $Nbr_{plants/m^2}(TC)=f(Nbr_{plants/m^2}(SD))$ -bersim



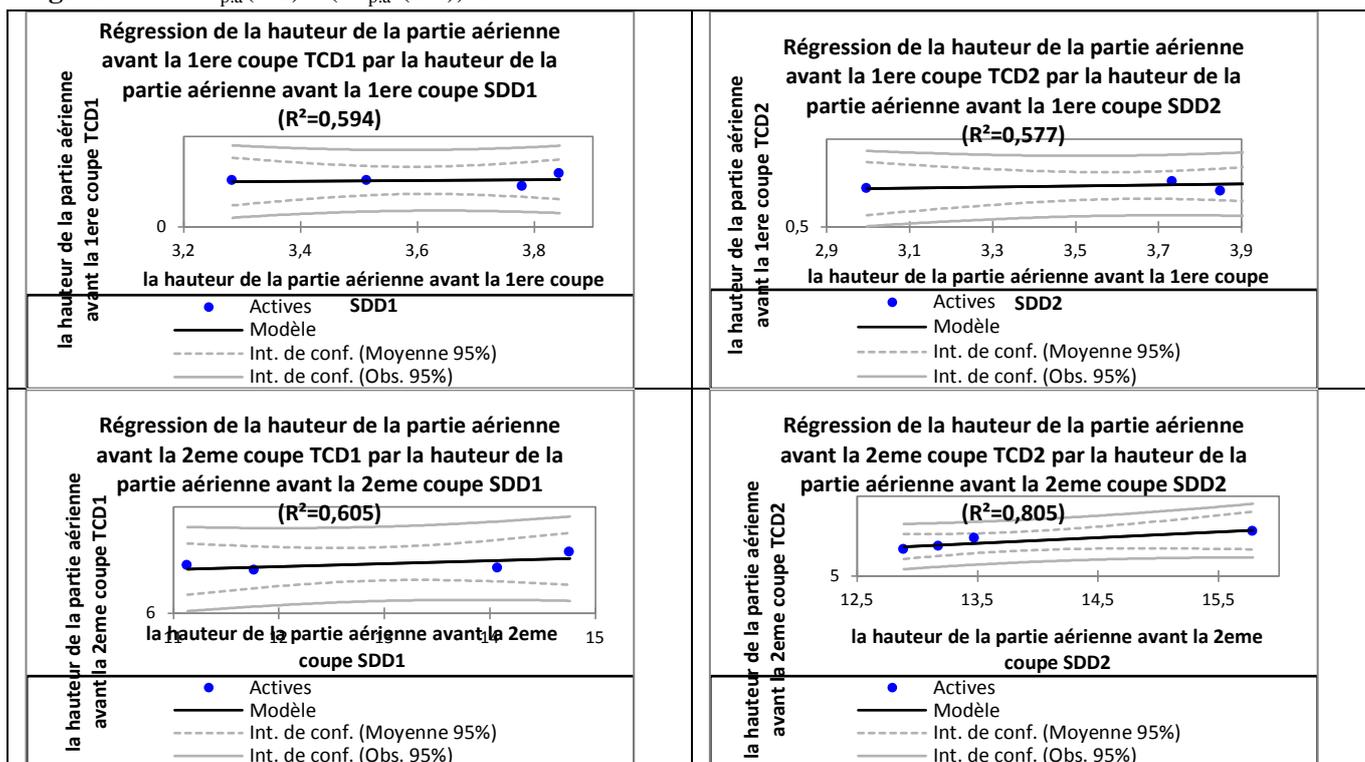
**Figure L-1 :  $H_{tige}(TC)=f(H_{tige}(SD))$ -sorgho fourrager**



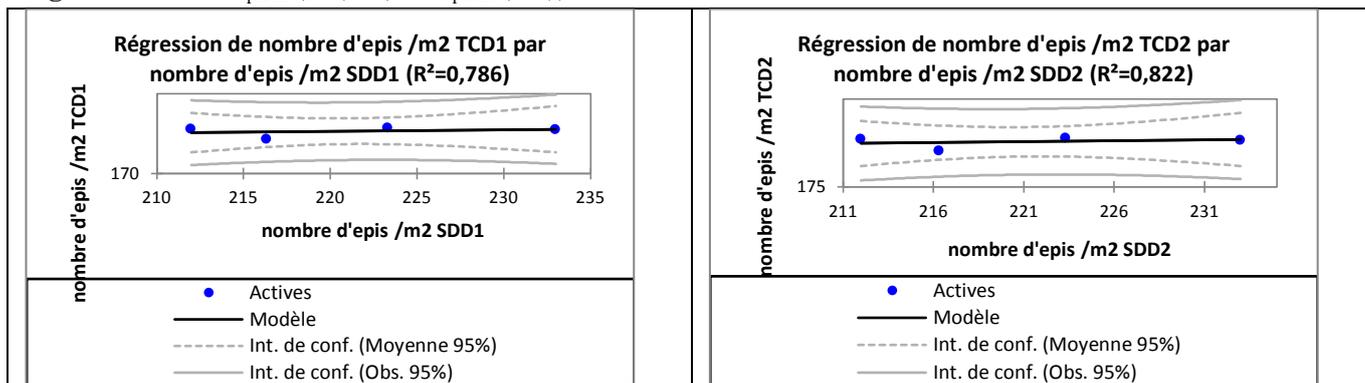
**Figure L-2 :  $D_{tige}(TC)=f(D_{tige}(SD))$ -sorgho fourrager**



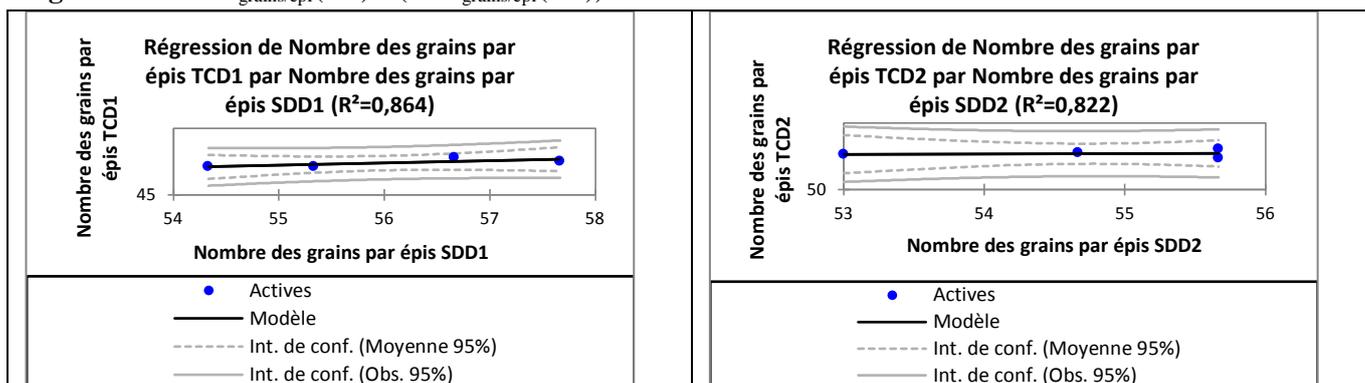
**Figure M-1 :  $H_{p.a}(TC)=f(H_{p.a}(SD))$ -bersim**



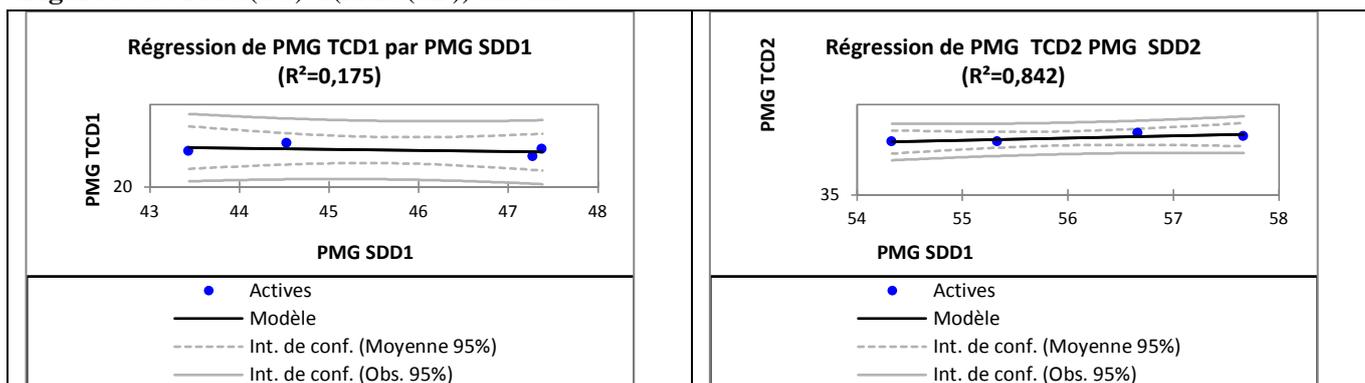
**Figure N-1 :**  $Nbr_{\text{épis}/m^2}(TC)=f(Nbr_{\text{épis}/m^2}(SD))$ -blé dur



**Figure N-2 :**  $Nbr_{\text{grains}/\text{épi}}(TC)=f(Nbr_{\text{grains}/\text{épi}}(SD))$ -blé dur



**Figure N-3 :**  $PMG(TC)=f(PMG(SD))$ -blé dur



**Figure O-1 :**  $Dr(TC)=f(Dr(SD))$ -Sorgho fourrager

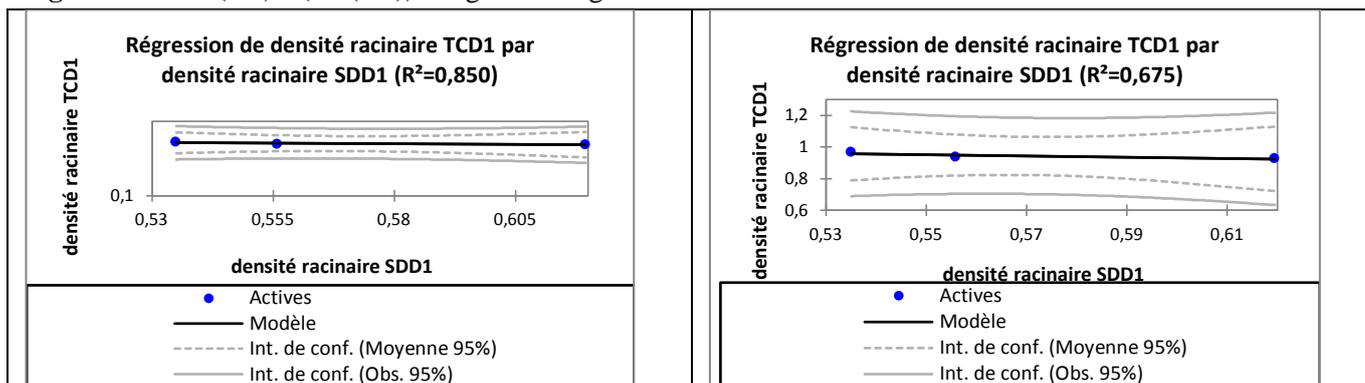


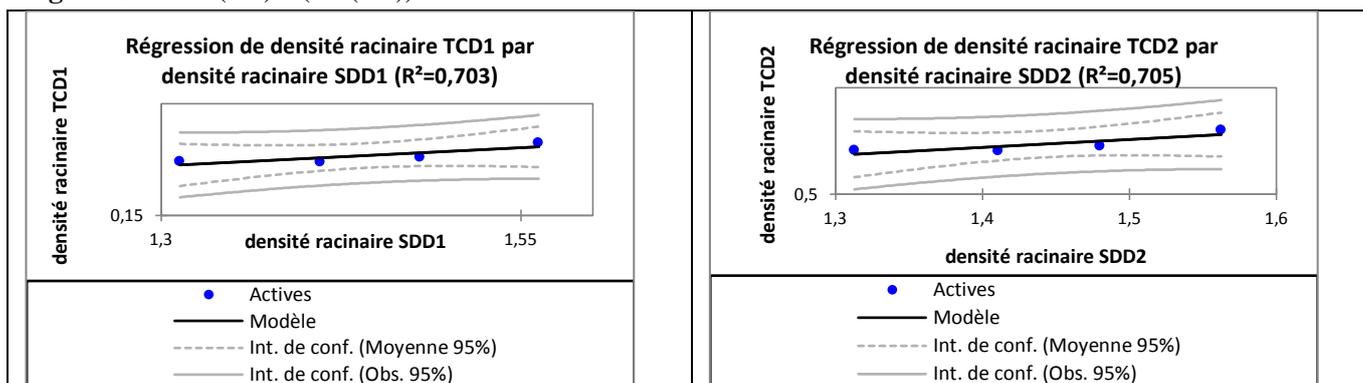
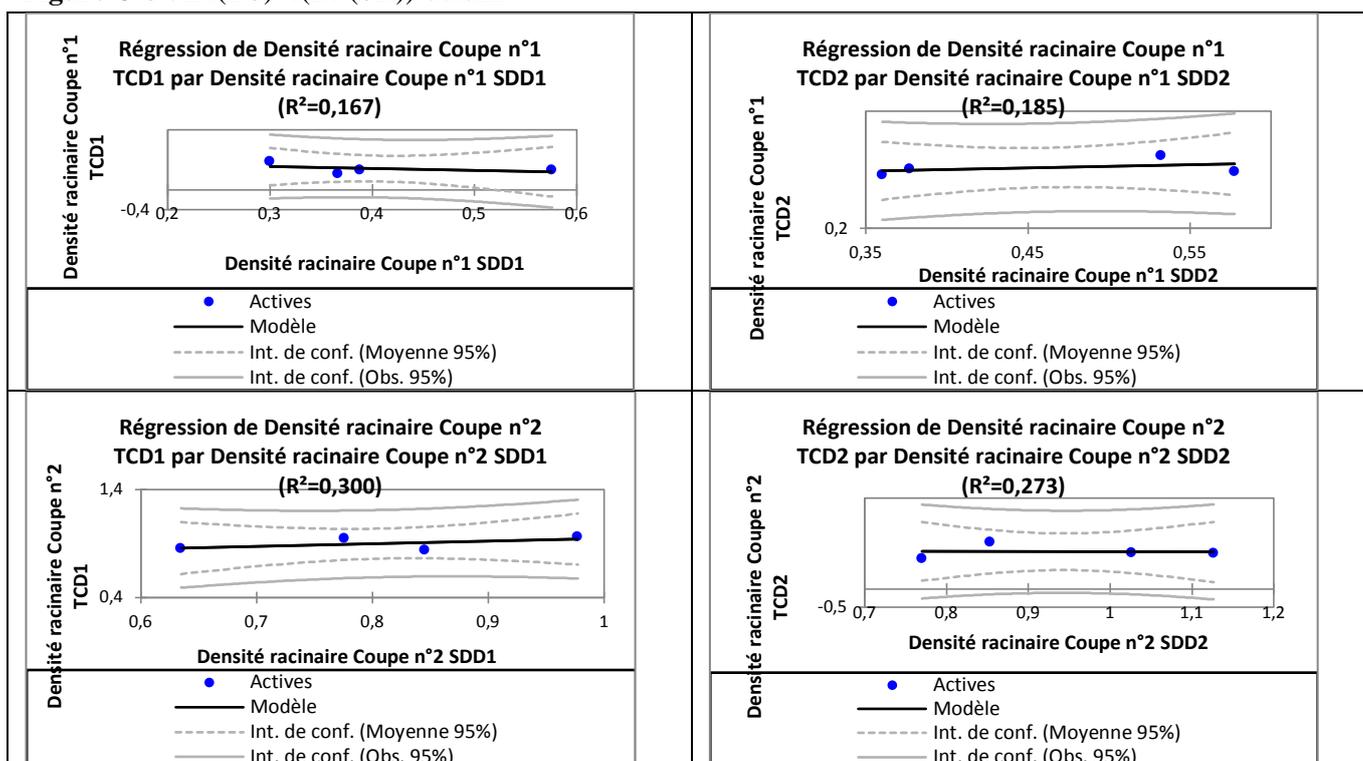
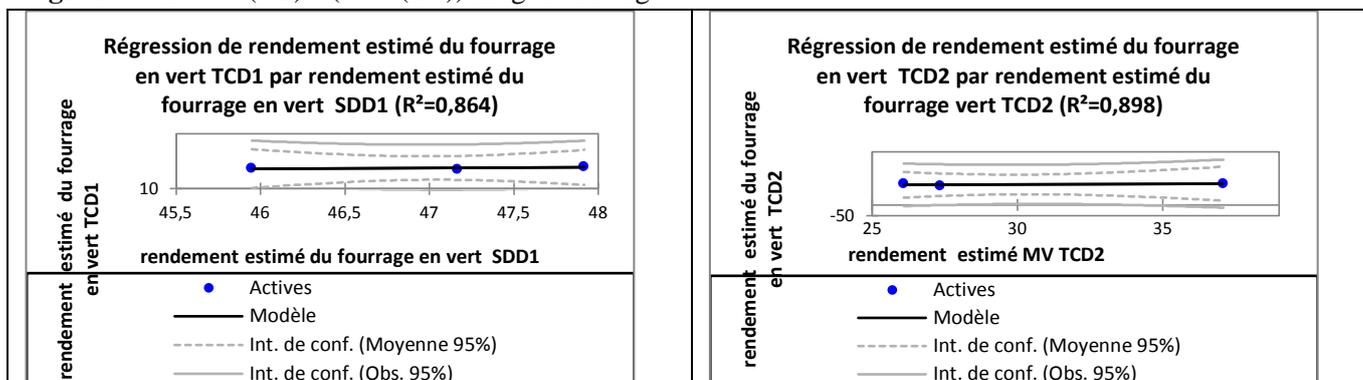
Figure O-2 :  $Dr(TC)=f(Dr(SD))$ -blé durFigure O-3 :  $Dr(TC)=f(Dr(SD))$ -bersimFigure P-1 :  $RDT(TC)=f(RDT(SD))$ -sorgho fourrager

Figure P-2 : RDT(TC)=f(RDT(SD))-blé dur

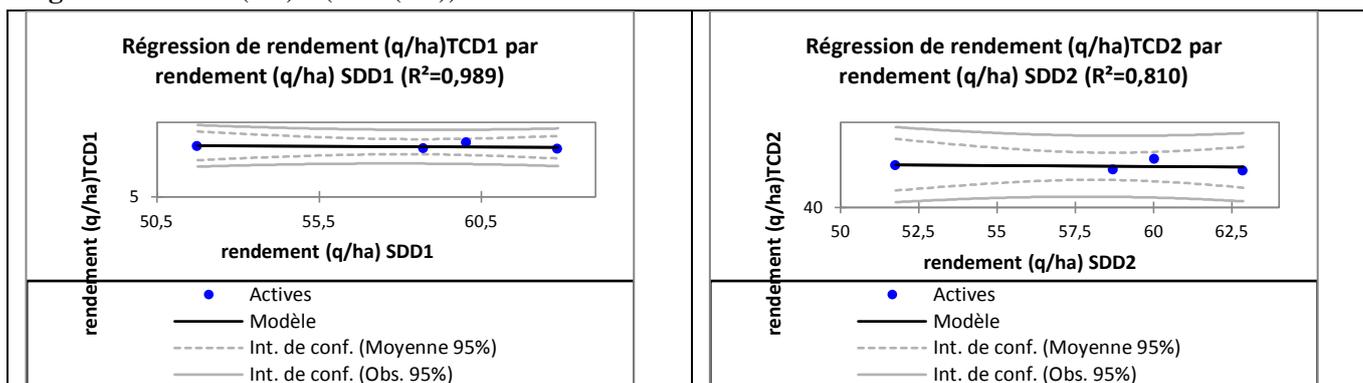


Figure P-3 : RDT(TC)=f(RDT(SD))-bersim

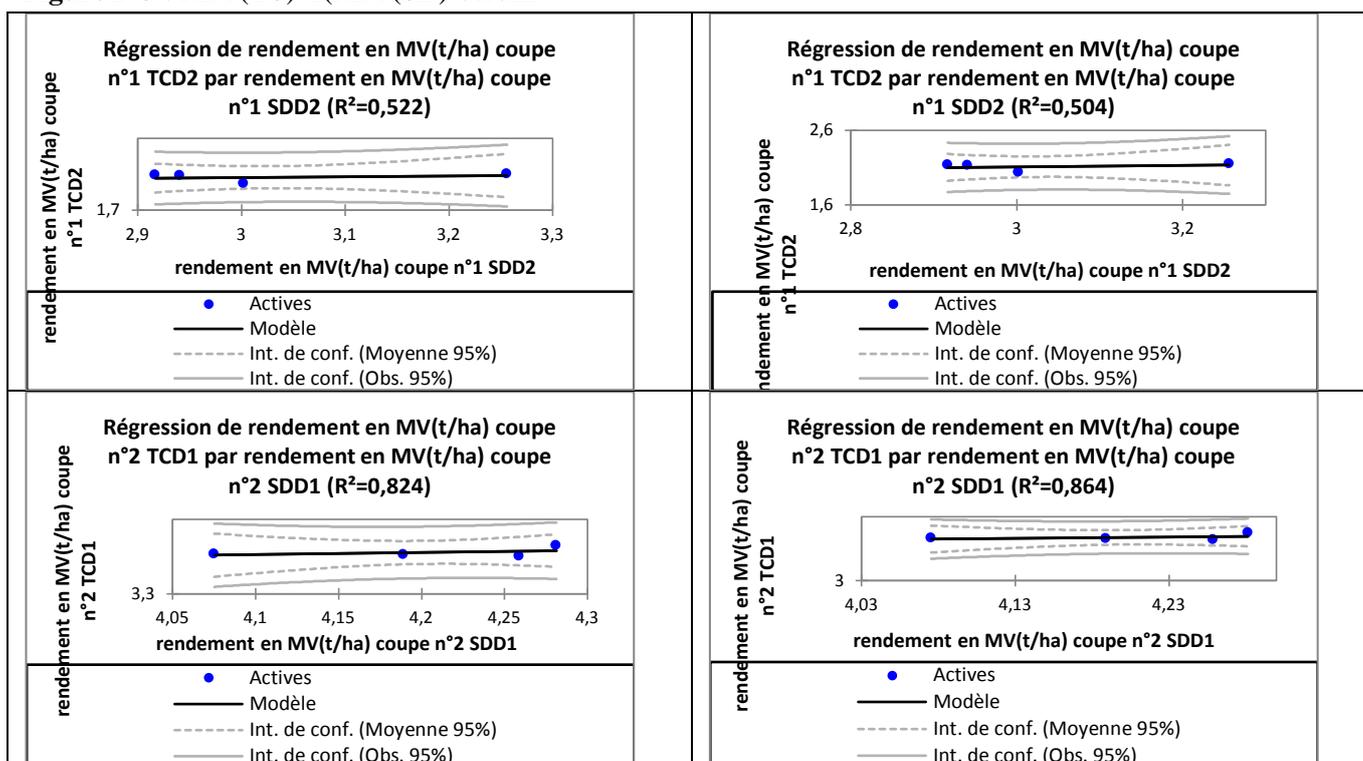


Tableau H-1: Tableau comparatif entre le rendement mesuré et le rendement calculé-TC- sorgho fourrager

Dose de semis (kg/m <sup>2</sup> )	L'accélération terrestre (m/s <sup>2</sup> )	Densité racinaire (kg/m <sup>3</sup> )	Rp (N/m <sup>2</sup> )	Hauteur des tiges (m)	Rendement en MV mesuré (kg/m <sup>2</sup> )	Rendement en MV calculé (kg/m <sup>2</sup> )	Rdt calculé / Rdt mesuré
0,0025	9,80665	0,89	1510544,24	1,61	6,99	269,81	38,60
0,0025	9,80665	0,87	1446267,69	1,63	7,45	260,56	34,97
0,0025	9,80665	1,03	1525259,01	1,62	6,71	233,58	34,81
0,0025	9,80665	0,98	1494726,18	1,67	7,71	233,69	30,31
0,0025	9,80665	0,87	1460606,49	1,64	7,43	262,03	35,29
0,0025	9,80665	1,06	1517465,57	1,67	7,03	219,52	31,25
0,0025	9,80665	0,78	1528085,27	1,63	7,59	305,67	40,30
0,0025	9,80665	0,94	1532382,57	1,65	7,84	251,64	32,10
0,0025	9,80665	1,09	1532353,61	1,68	8,06	213,46	26,48
0,0035	9,80665	1,20	1510544,24	1,59	9,59	280,86	29,29
0,0035	9,80665	1,36	1446267,69	1,58	8,51	240,80	28,30
0,0035	9,80665	1,22	1525259,01	1,53	9,32	290,63	31,18
0,0035	9,80665	1,20	1494726,18	1,54	10,56	288,10	27,28

0,0035	9,80665	1,08	1460606,49	1,52	9,56	317,41	33,20
0,0035	9,80665	1,11	1517465,57	1,56	9,76	310,62	31,83
0,0035	9,80665	1,15	1528085,27	1,58	9,48	299,14	31,55
0,0035	9,80665	1,40	1532382,57	1,54	10,89	254,21	23,34
0,0035	9,80665	1,57	1532353,61	1,58	10,10	220,50	21,83
<b>coefficient de correction TC</b>							<b>31,22</b>

**Tableau H-2:** Tableau comparatif entre le rendement mesuré et le rendement calculé-SD- sorgho fourrager

Dose de semis (kg/m <sup>2</sup> )	L'accélération terrestre (m/s <sup>2</sup> )	Densité racinaire (kg/m <sup>3</sup> )	Rp (N/m <sup>2</sup> )	La hauteur des tiges (m)	Rendement en MV mesuré (kg/m <sup>2</sup> )	Rendement en MV calculé (kg/m <sup>2</sup> )	Rdt calculé / Rdt mesuré
0,0025	9,80665	0,61	1781264,86	1,39	4,93	532,10	108,04
0,0025	9,80665	0,61	1784735,90	1,38	5,20	543,78	104,57
0,0025	9,80665	0,64	1771946,80	1,37	4,03	516,51	128,32
0,0025	9,80665	0,45	1745665,91	1,36	4,24	725,37	171,08
0,0025	9,80665	0,54	1805562,16	1,35	4,80	635,40	132,38
0,0025	9,80665	0,62	1752442,94	1,38	4,75	524,44	110,53
0,0025	9,80665	0,63	1746058,29	1,36	4,53	515,45	113,91
0,0025	9,80665	0,63	1747236,37	1,34	5,00	530,36	106,07
0,0025	9,80665	0,41	1760232,03	1,35	4,85	813,07	167,64
0,0035	9,80665	0,78	1781264,86	1,30	6,16	628,06	101,96
0,0035	9,80665	0,66	1784735,90	1,31	6,68	732,07	109,59
0,0035	9,80665	0,77	1771946,80	1,31	6,58	632,04	96,05
0,0035	9,80665	0,66	1745665,91	1,32	7,10	713,18	100,42
0,0035	9,80665	0,61	1805562,16	1,35	6,52	778,73	119,44
0,0035	9,80665	0,64	1752442,94	1,32	6,95	744,71	107,15
0,0035	9,80665	0,70	1746058,29	1,30	6,43	683,46	106,29
0,0035	9,80665	0,51	1747236,37	1,33	6,11	927,20	151,75
0,0035	9,80665	0,55	1760232,03	1,37	6,09	828,43	136,03
<b>Coefficient de correction SD</b>							<b>120,62</b>

**Tableau H-3:** Tableau comparatif entre le rendement mesuré et le rendement calculé-TC- Bersim

Ds (kg/m <sup>2</sup> )	g (m/s <sup>2</sup> )	Dr (kg/m <sup>3</sup> )	Rp (N/m <sup>2</sup> )	H p.a (m)	Rdt en MV mesuré (kg/m <sup>2</sup> )	Rdt en MV calculé (kg/m <sup>2</sup> )	Rdt calculé / Rdt mesuré
0,0015	9,80665	0,837	5112500	0,098	0,382	9578,58	25095,83
0,0015	9,80665	1,045	4862500	0,087	0,393	8206,47	20902,87
0,0015	9,80665	0,630	5143750	0,118	0,373	10576,74	28368,05
0,0015	9,80665	1,010	4278125	0,121	0,380	5340,53	14061,43
0,0015	9,80665	0,900	4300000	0,108	0,379	6743,66	17812,11
0,0015	9,80665	0,656	4625000	0,106	0,359	10221,77	28457,04
0,0015	9,80665	0,966	5012500	0,115	0,344	6904,75	20043,98
0,0015	9,80665	1,028	4659375	0,099	0,380	7008,82	18428,75
0,0015	9,80665	0,839	4971875	0,076	0,395	12006,50	30417,76
0,0015	9,80665	1,781	5915625	0,095	0,373	5324,49	14261,00
0,0015	9,80665	0,655	4718750	0,101	0,362	10924,12	30157,13
0,0015	9,80665	0,455	5275000	0,099	0,377	17878,60	47438,45
0,0025	9,80665	0,751	5112500	0,115	0,560	15105,37	26950,77
0,0025	9,80665	0,870	4862500	0,095	0,569	14928,35	26252,72
0,0025	9,80665	0,896	5143750	0,100	0,565	14649,60	25919,32
0,0025	9,80665	1,237	4278125	0,115	0,579	7638,01	13200,85
0,0025	9,80665	1,714	4300000	0,120	0,557	5317,56	9553,65
0,0025	9,80665	0,935	4625000	0,094	0,551	13401,73	24320,79
0,0025	9,80665	1,261	5012500	0,145	0,567	7001,25	12348,75
0,0025	9,80665	1,059	4659375	0,135	0,593	8312,99	14010,97
0,0025	9,80665	0,684	4971875	0,139	0,553	13317,22	24093,97

0,0025	9,80665	1,000	5915625	0,143	0,570	10531,18	18475,75
0,0025	9,80665	1,037	4718750	0,121	0,560	9557,24	17067,72
0,0025	9,80665	0,900	5275000	0,115	0,576	13041,98	22651,76
<b>Coefficient de correction</b>							<b>22095,48</b>

**Tableau H-4:** Tableau comparatif entre le rendement mesuré et le rendement calculé-SD- Bersim

Ds (kg/m <sup>2</sup> )	g (m/s <sup>2</sup> )	Dr (kg/m <sup>3</sup> )	Rp (N/m <sup>2</sup> )	H p.a (m)	Rdt en MV estimé (kg/m <sup>2</sup> )	Rdt en MV calculé (kg/m <sup>2</sup> )	Rdt calculé / Rdt estimé
0,0015	9,80665	0,610	6796875	0,121	0,413	14141,24	34243,62
0,0015	9,80665	1,271	6571875	0,103	0,433	7716,37	17828,96
0,0015	9,80665	0,654	7006250	0,111	0,439	14766,63	33664,58
0,0015	9,80665	0,615	6059375	0,158	0,406	9557,38	23561,23
0,0015	9,80665	0,825	6040625	0,152	0,438	7352,91	16799,74
0,0015	9,80665	0,465	4850000	0,133	0,413	12029,67	29099,34
0,0015	9,80665	0,730	7978125	0,081	0,400	20649,12	51566,08
0,0015	9,80665	0,756	5509375	0,124	0,418	9014,35	21557,19
0,0015	9,80665	0,842	5762500	0,148	0,404	7057,35	17472,16
0,0015	9,80665	0,889	6671875	0,143	0,426	8004,51	18802,30
0,0015	9,80665	1,080	5956250	0,141	0,424	5991,25	14138,30
0,0015	9,80665	0,962	5725000	0,138	0,428	6590,48	15391,13
0,0025	9,80665	1,005	6796875	0,147	0,760	11699,07	15384,61
0,0025	9,80665	0,703	6571875	0,117	0,685	20318,73	29667,57
0,0025	9,80665	0,602	7006250	0,122	0,757	24333,72	32139,85
0,0025	9,80665	1,172	6059375	0,139	0,720	9491,09	13189,40
0,0025	9,80665	0,663	6040625	0,116	0,759	19956,22	26302,49
0,0025	9,80665	0,724	4850000	0,140	0,789	12193,67	15447,54
0,0025	9,80665	1,494	7978125	0,134	0,732	10149,03	13869,34
0,0025	9,80665	1,110	5509375	0,202	0,753	6267,79	8325,53
0,0025	9,80665	0,475	5762500	0,138	0,775	22482,84	29001,13
0,0025	9,80665	1,181	6671875	0,188	0,746	7674,71	10281,75
0,0025	9,80665	0,915	5956250	0,125	0,769	13333,99	17342,99
0,0025	9,80665	1,283	5725000	0,092	0,723	12340,99	17076,70
<b>coefficient de correction SD</b>							<b>21756,40</b>

**Tableau H-5:** Tableau comparatif entre le rendement mesuré et le rendement calculé-TC- Blé dur

Gr	PMG	Dr	Rdt mesuré	Rp (daN/cm <sup>2</sup> )	Ds (kg/m <sup>2</sup> )	Rdt calculé	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_3$	$\ln\pi_1$	$\ln\pi_2$	$\ln\pi_3$	Rdt mesuré / Rdt calculé
13475	0,035	1,202	0,475	1917459,909	0,016	0,487	29,70	411,41	12450,64	3,39	6,02	9,43	0,98
13860	0,039	1,244	0,534	1700334,514	0,016	0,543	33,40	324,42	14562,36	3,51	5,78	9,59	0,98
14250	0,036	1,342	0,516	1902133,410	0,016	0,514	32,24	376,01	15926,21	3,47	5,93	9,68	1,00
13420	0,045	1,402	0,609	2084419,548	0,016	0,540	38,06	349,02	21791,63	3,64	5,86	9,99	1,13
13395	0,043	1,371	0,579	2056148,003	0,016	0,529	36,17	362,25	19836,64	3,59	5,89	9,90	1,09
13145	0,043	1,563	0,565	2062123,656	0,016	0,531	35,31	372,19	25625,73	3,56	5,92	10,15	1,06
15433	0,038	0,973	0,588	1713287,768	0,016	0,547	36,75	297,12	8811,07	3,60	5,69	9,08	1,07
13805	0,040	0,991	0,547	1711190,783	0,016	0,534	34,21	318,79	9502,88	3,53	5,76	9,16	1,03
15128	0,041	1,426	0,620	1743759,593	0,016	0,584	38,73	286,96	20325,63	3,66	5,66	9,92	1,06
13365	0,040	1,356	0,529	1880420,871	0,016	0,525	33,08	362,30	17783,83	3,50	5,89	9,79	1,01
13695	0,041	1,440	0,556	1835079,979	0,016	0,546	34,75	336,55	20549,94	3,55	5,82	9,93	1,02
14307	0,042	1,436	0,617	1806342,795	0,016	0,570	38,55	305,08	21255,09	3,65	5,72	9,96	1,08
15064	0,048	1,667	0,722	1917459,909	0,018	0,678	40,12	270,75	22852,06	3,69	5,60	10,04	1,07
15846	0,041	1,634	0,654	1700334,514	0,018	0,676	36,31	265,26	18890,88	3,59	5,58	9,85	0,97
15635	0,046	1,629	0,718	1902133,410	0,018	0,675	39,91	269,98	20919,87	3,69	5,60	9,95	1,06
13932	0,046	1,555	0,644	2084419,548	0,018	0,617	35,80	329,87	19167,65	3,58	5,80	9,86	1,04
15399	0,048	1,564	0,743	2056148,003	0,018	0,661	41,29	282,07	20254,35	3,72	5,64	9,92	1,12

14224	0,043	1,491	0,618	2062123,656	0,018	0,604	34,35	340,08	16576,11	3,54	5,83	9,72	1,02
14742	0,045	2,146	0,670	1713287,768	0,018	0,707	37,21	260,86	35867,71	3,62	5,56	10,49	0,95
15846	0,049	2,027	0,776	1711190,783	0,018	0,751	43,11	224,87	34488,73	3,76	5,42	10,45	1,03
15120	0,052	1,873	0,782	1743759,593	0,018	0,743	43,43	227,47	31105,80	3,77	5,43	10,35	1,05
13662	0,042	1,506	0,579	1880420,871	0,018	0,611	32,16	331,25	16483,32	3,47	5,80	9,71	0,95
15219	0,047	1,536	0,713	1835079,979	0,018	0,679	39,63	262,33	18969,17	3,68	5,57	9,85	1,05
14750	0,047	1,540	0,687	1806342,795	0,018	0,677	38,18	264,91	19169,62	3,64	5,58	9,86	1,02
<b>Coefficient de correction TC</b>													<b>1,036</b>

**Tableau H-6:** Tableau comparatif entre le rendement mesuré et le rendement calculé-SD- Blé dur

Gr	PMG	Dr	Rdt mesuré (q/ha)	Rp (daN/cm <sup>2</sup> )	Ds (kg/m <sup>2</sup> )	rdt calculé	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_3$	$\ln\pi_1$	$\ln\pi_2$	$\ln\pi_3$	Rdt mesuré / Rdt calculé
12006	0,046	0,939	0,547	2350433,491	0,016	0,456	34,18	438,27	9796,92	3,53	6,08	9,19	1,20
11502	0,049	0,952	0,530	2379170,676	0,016	0,459	33,10	433,56	10767,59	3,50	6,07	9,28	1,15
11016	0,048	1,123	0,525	2413016,693	0,016	0,449	32,79	468,96	14668,42	3,49	6,15	9,59	1,17
13481	0,047	0,579	0,512	2399771,763	0,016	0,469	32,02	387,04	3843,00	3,47	5,96	8,25	1,09
11169	0,046	0,653	0,422	2319780,494	0,016	0,442	26,40	461,72	4778,17	3,27	6,13	8,47	0,96
12749	0,041	0,684	0,420	2338938,617	0,016	0,443	26,28	458,30	4667,11	3,27	6,13	8,45	0,95
11880	0,042	0,941	0,402	2174242,619	0,016	0,454	25,11	441,93	9131,95	3,22	6,09	9,12	0,88
12992	0,045	0,975	0,466	2063061,644	0,016	0,491	29,15	358,72	10470,64	3,37	5,88	9,26	0,95
13108	0,043	0,980	0,463	2128837,867	0,016	0,478	28,94	385,59	10070,60	3,37	5,95	9,22	0,97
11526	0,046	1,569	0,443	2282741,456	0,016	0,467	27,69	436,66	27808,80	3,32	6,08	10,23	0,95
12474	0,048	1,332	0,467	2192698,277	0,016	0,491	29,17	374,06	20771,58	3,37	5,92	9,94	0,95
14762	0,048	1,244	0,472	2101383,927	0,016	0,528	29,52	302,54	18137,35	3,38	5,71	9,81	0,89
11880	0,042	1,445	0,497	2350433,491	0,018	0,500	27,60	482,42	14972,77	3,32	6,18	9,61	0,99
11550	0,049	1,513	0,562	2379170,676	0,018	0,523	31,20	431,94	19096,60	3,44	6,07	9,86	1,07
11388	0,043	1,482	0,494	2413016,693	0,018	0,496	27,47	497,63	16350,45	3,31	6,21	9,70	1,00
12220	0,048	1,147	0,590	2399771,763	0,018	0,525	32,80	414,43	10907,85	3,49	6,03	9,30	1,12
12705	0,051	1,348	0,647	2319780,494	0,018	0,554	35,97	365,36	15879,42	3,58	5,90	9,67	1,17
11908	0,044	1,443	0,524	2338938,617	0,018	0,511	29,10	455,41	15708,36	3,37	6,12	9,66	1,02
12428	0,044	1,675	0,542	2174242,619	0,018	0,535	30,12	408,98	20982,79	3,41	6,01	9,95	1,01
14520	0,042	1,546	0,614	2063061,644	0,018	0,568	34,13	342,44	17345,49	3,53	5,84	9,76	1,08
13420	0,050	1,466	0,645	2128837,867	0,018	0,581	35,82	322,17	18496,21	3,58	5,78	9,83	1,11
15840	0,051	1,403	0,611	2282741,456	0,018	0,605	33,94	287,02	17279,31	3,52	5,66	9,76	1,01
13624	0,053	1,366	0,610	2192698,277	0,018	0,587	33,90	311,83	16837,39	3,52	5,74	9,73	1,04
13780	0,049	1,463	0,665	2101383,927	0,018	0,584	36,92	316,58	18032,18	3,61	5,76	9,80	1,14
<b>Coefficient de correction SD</b>													<b>1,037</b>

## Résumé :

Ce travail, rentre dans le cadre d'un programme de recherche sur la problématique de l'introduction de techniques culturales simplifiées en Algérie au niveau du laboratoire Maitrise de l'eau en agriculture de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et l'ITGC.

L'objectif était d'analyser les effets du travail du sol et du semis direct sur l'évolution de l'état structural du sol, et les conséquences sur le développement racinaire et le rendement de cultures afin d'établir un modèle mathématique qui permet de quantifier le rendement des cultures en relation avec les paramètres physico-mécanique du sol et les différents facteurs liés aux cultures.

Les résultats des essais comparatifs entre le travail conventionnel du sol et le semis direct sur différentes cultures ont montré clairement que la technique de travail utilisée a un effet certain sur l'évolution des paramètres du sol; teneur en humidité, porosité et résistance pénétrométrique.

En effet, la conservation en eau dans le sol est meilleure avec le semis direct, La porosité est par contre plus importante avec le travail conventionnel du sol. Pour ce qui est de la résistance pénétrométrique, le sol est plus résistant avec le semis direct.

Les résultats montrent un meilleur développement du système racinaire avec le travail conventionnel par rapport au semis direct.

Pour ce qui est du rendement en vert et en sec du sorgho fourrager il est nettement supérieur avec le travail conventionnel ou on enregistre un rendement vert/sec atteignant en moyenne 97,52/50,35 t/ha pour une dose de semis de 35 kg/ha contre une moyenne de 65,13/28 t/ha avec le semis direct semées à la même dose, soit une différence de rendement de plus de 32,39/22,35 t/ha entre les deux techniques.

De même concernant le rendement en grains du blé dur, il est meilleure au niveau du travail conventionnel, car permettant un meilleur développement racinaire, une meilleure porosité et une résistance pénétrométrique favorable.

Par contre, la deuxième coupe du bersim montre un meilleur rendement avec le semis direct.

Afin de confirmer et modéliser les résultats, une analyse dimensionnelle a été effectuée pour quantifier les rendements de cultures en relation avec les différents paramètres étudiés. Cette analyse a permis d'établir les modèles suivantes :

Pour les cultures fourragères (sorgho et bersim) :

$$RDT = \frac{Rp \cdot Ds}{10 \cdot \alpha \cdot Dr \cdot H}$$

Avec :

Cultures	Technique conventionnelle	Semis direct
Sorgho fourrager	$\alpha_{S(TC)} : 31,22$	$\alpha_{S(SD)} : 120,62$
Bersim	$\alpha_{B(TC)} : 22095,48$	$\alpha_{B(SD)} : 21756,40$

Pour la culture du blé dur :

➤ **Technique conventionnelle**

$$RDT_{TC} = 565,42 \cdot Rp^{-0,42} \cdot Dr^{0,12} \cdot PMG^{0,48} \cdot Ds^{0,82} \cdot Gr^{0,42}$$

➤ **Semis direct**

$$RDT_{SD} = 482,47 \cdot Rp^{-0,36} \cdot Dr^{0,04} \cdot PMG^{0,38} \cdot Ds^{0,94} \cdot Gr^{0,36}$$

**Mots clés :** Cultures fourragères; Semis direct, Système racinaire; Rendement; Modélisation

## Abstract ;

This work carried out is part of a research program in direct seeding or zero tillage system to introduce in Algeria led by university laboratory of Water Control in Agriculture at the high national school of agronomy ENSA and Technical institute of field crops ITGC.

The objective was to analyze the effects of tillage and direct seeding on structural state of the soil, and the consequences on root development and crop yield, to find the relationship between the physical and mechanical parameters of the soil and crop parameters in a mathematical model to quantify crop yields.

The results of comparative trials between conventional tillage and zero tillage on different crops, have clearly shown that the tillage technique used has a definite effect on the different soil parameters; humidity content, porosity and penetrometer resistance

Indeed, the water conservation in the soil is better with direct seeding, Porosity is against more important with conventional tillage. However for penetrometer resistance, the soil is more resistant with direct seeding.

The results show a better development of the root system in different crops with conventional tillage compared to direct seeding.

As for the green and dry yield of fodder sorghum, it is significantly higher with conventional tillage where the green / dry yield averaging 97.52 / 50.35 t / ha for a seeding rate of 35 kg / ha, against an average of 65.13 / 28 t / ha with direct seeding sown at the same dose, this represents a difference in yield greater than 32.39 / 22.35 t / ha between the two techniques.

Likewise on grain yield of durum wheat, it is better with conventional tillage, because allowing better root development, better porosity and a favorable resistance penetrometer

By cons, the second cut of bersim shows a better yield with direct seeding.

In order to confirm and model the results, a dimensional analysis was performed to quantify crop yields in relation to the different parameters studied. This analysis established the following models:

For forage crops (sorghum and bersim):

$$\text{Yield} = \frac{\text{Rp. Ds}}{10. \alpha. \text{Dr. H}}$$

With :

Crops	Conventional tillage TC	Direct seeding SD
Forage Sorghum	$\alpha_{S(TC)} : 31,22$	$\alpha_{S(SD)} : 120,62$
Bersim	$\alpha_{B(TC)} : 22095,48$	$\alpha_{B(SD)} : 21756,40$

For durum wheat crops:

➤ **Conventional tillage**

$$\text{Yield}_{TC} = 565,42. \text{Rp}^{-0,42} . \text{Dr}^{0,12} . \text{TGW}^{0,48} . \text{Ds}^{0,82} . \text{Gr}^{0,42}$$

➤ **Direct seeding**

$$\text{Yield}_{SD} = 482,47. \text{Rp}^{-0,36} . \text{Dr}^{0,04} . \text{TGW}^{0,38} . \text{Ds}^{0,94} . \text{Gr}^{0,36}$$

**Key word:** forage crops; direct seeding; root system; yield; modeling.

## ملخص:

هذا العمل جزء من برنامج بحثي حول مشكلة إدخال تقنيات الزراعة المبسطة في الجزائر في مختبر إدارة المياه في الزراعة بالمدرسة الوطنية العليا للفلاحة و المعهد التقني للزراعات الواسعة.

كان الهدف هو تحليل آثار الحراثة والبذر المباشر على تطور الحالة الهيكلية للتربة ، والعواقب المترتبة على تطور الجذر والمحصول وهذا لإنشاء نموذج رياضي يمكّن من تقدير كمية المحصول الزراعي و علاقته مع المعايير الفيزيوميكانيكية للتربة والعوامل المختلفة المتعلقة بالمحاصيل.

أظهرت نتائج المقارنة بين الحراثة التقليدية والبذر المباشر على المحاصيل المختلفة أن تقنية العمل المستخدمة لها تأثير محدد على تطور معايير التربة ؛ محتوى الرطوبة ، المسامية ومقاومة اختراق.

في الواقع ، فإن الحفاظ على المياه في التربة يكون أفضل من خلال البذر المباشر ، حيث تعد المسامية أكثر أهمية في الزراعة التقليدية للتربة ، أما من حيث المقاومة للنفاذية ، فإن التربة أكثر مقاومة عند البذر المباشر.

تظهر النتائج تطوراً أفضل لنظام الجذر مع العمل التقليدي مقارنة بالبذر المباشر.

المحصول الأخضر والجاف للذرة الرفيعة أعلى بشكل ملحوظ مع العمل التقليدي ، أو المحصول الأخضر / الجاف يبلغ متوسطه 97.52 / 50.35 طن / هكتار بجرعة البذر تبلغ 35 كجم / هكتار مقابل 65.13 / 28 طن / هكتار في المتوسط مع البذر المباشر بنفس الجرعة ، وفرق العائد أكثر من 32.39 / 22.35 طن / هكتار بين الطريقتين.

وبالمثل ، بالنسبة لمحصول الحبوب من القمح الصلب ، فهو أفضل في العمل التقليدي لأنه يسمح بتطوير أفضل للجذر ، ومسامية أفضل ومقاومة لاختراق جيدة.

من ناحية أخرى ، فإن القطع الثاني من البرسيم يظهر عائداً أفضل بالبذر المباشر.

من أجل تأكيد وصياغة النتائج ، تم إجراء تحليل لتقدير كمية المحصول الزراعي للمحاصيل و علاقته مع المعلمات المختلفة ، من خلاله أنشأت هذه النماذج التالية:  
للمحاصيل العلفية (الذرة الرفيعة والبرسيم):

$$\frac{Rp \cdot Ds}{10 \cdot \alpha \cdot Dr \cdot H} = \text{المحصول}$$

مع :

المحاصيل	البذر المباشر	العمل التقليدي
الذرة الرفيعة	$\alpha_{S(SD)} : 120,62$	$\alpha_{S(TC)} : 31,22$
البرسيم	$\alpha_{B(SD)} : 21756,40$	$\alpha_{B(TC)} : 22095,48$

للقمح الصلب :

➤ العمل التقليدي

$$\text{المحصول}_{TC} = 565,42 \cdot Rp^{-0,42} \cdot Dr^{0,12} \cdot PMG^{0,48} \cdot Ds^{0,82} \cdot Gr^{0,42}$$

➤ البذر المباشر

$$\text{المحصول}_{SD} = 482,47 \cdot Rp^{-0,36} \cdot Dr^{0,04} \cdot PMG^{0,38} \cdot Ds^{0,94} \cdot Gr^{0,36}$$

الكلمات الرئيسية : المحاصيل العلفية ، البذر المباشر ، النظام الجذري ، المحصول ، التصميم.