



N° d'ordre :

UNIVERSITE DE Mohamed Boudiaf M'SILA
FACULTE DES SCIENCES

Département des Sciences Agronomiques

THESE

**Présentée pour l'obtention du diplôme de
DOCTORAT 3ème cycle (LMD)
Spécialité : Production et Amélioration des Plantes**

Option :

**Par :
Assya CHOUTER**

SUJET

**EFFET DE LA ROTATION CULTURALE SUR LA BIODIVERSITÉ
AGRICOLE ET LA DURABILITÉ EN TECHNIQUE SEMIS DIRECT ET
CONVENTIONNELLE EN ZONE SEMI-ARIDE**

Soutenu publiquement le 12/04 /2025

Devant le jury composé de :

**KHALDI Mourad
BENNIU Ramdane
BENKHERBACHE Nadjat
HARIZIA Abdelkader
CHAKER HOUD Kahina**

**Professeur (Univ. de M'sila)
Professeur (univ. de M'sila)
Professeur (univ. de M'sila)
Professeur (univ. de Mascara)
Professeur (univ. d'Etarf)**

**Président
Rapporteur
Examinatrice
Examinateur
Examinatrice**

Promotion : 20 /20 .

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier **Dieu, Le Tout Puissant**, pour m'avoir donné le courage, la force et la volonté nécessaires à la réalisation de ce travail. Sans sa miséricorde, ce travail n'aurait pas abouti.

Je remercie en premier lieu **le Professeur BENNIOU Ramdane**, mon directeur de thèse, pour ses enseignements, ses conseils avisés, nos discussions enrichissantes, ainsi que pour sa disponibilité et son écoute tout au long de ces années.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude envers **le Professeur Mourad KHALDI**, pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant le jury.

Je remercie également les **Professeurs Nadjat BENKHERBACHE, Abdelkader HARIZIA et Kahina CHAKER HOUD** pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner ce travail et de contribuer à son enrichissement.

Je remercie chaleureusement **Dr. SEBBANE Mahieddine**; Maître de conférence « A » à l'université de Bordj Bou Arreridj, pour son aide précieuse. Qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude.

Je souhaite également adresser de sincères remerciements à **Docteurs Fahima MECHIAH et à Noria SMAIL-SAADOUN** du laboratoire de ressources naturelles, FSB, UMMTO, Tizi-Ouzou, qui n'ont pas hésité à venir humblement à mon aide et qui ne m'ont jamais privé de leur savoir.

Je s'adresse mes vifs remerciements à **Mr. SOUALIL Nacer**, ingénieur de laboratoire de recherche « laboratoire d'amélioration et de développement de la production végétale et animale » de l'université Ferhat ABBAS Sétif-1, pour son aide précieuse.

J'adresse mes vifs remerciements à **Mr. ZERRARI Abbas**, délégué Fertil à Sétif, pour son aide, sa contribution et ses conseils.

Une thèse est aussi une aventure humaine. C'est pourquoi j'adresse mes vifs remerciements à toute l'équipe de l'ITGC de Sétif : le Directeur **Mr. Nasreddine LOUAHDI**, ainsi que les ingénieurs **Haroun BELGUET, Mourad TAIBI, Omar MHANI, Salima KHECHAB, Fatima MOHGUEN, Samir SELLOUM, Soufiane GUEMAZ et Nadhir HARKATI**, pour leur aide dans la réalisation du protocole expérimental et pour leur soutien, qui m'a fait sentir comme dans une deuxième famille au cours de ces dernières années.

J'exprime aussi mes remerciements à **Mr. HANNACHI Abderrahmane**, Chercheur à l'INRA, d'Algérie, unité de Sétif, pour son accueil, sa disponibilité, son intérêt pour ce travail et pour ses nombreux conseils avisés.

Mes vifs remerciements s'adressent aussi à **M^{me} LACHHEB Samira**, Ingénieur d'état en agronomie à la direction agricole de Sétif, pour son aide précieuse.

Je n'oublie pas de remercier vivement **M^{me} LABAD Ryma**, Maître de conférences « A » à ENSA-Alger-, pour son aide précieuse durant ces années.

Je remercie tous mes enseignants du département des sciences agronomiques de l'université Mohamed Boudiaf M'sila d'avoir participé à ma formation.

Enfin, je clos ces remerciements en dédiant cette thèse de Doctorat à **mes parents** et particulièrement à **ma mère**.

Assya CHOUTER

Résumé

L'agriculture conventionnelle, notamment par le labour, l'assolement blé/jachère et la monoculture, entraîne des problèmes tels que l'érosion des sols, la dégradation et la perte de biodiversité. En revanche, l'agriculture de conservation, qui favorise la diversification des cultures et la conservation des sols, présente des avantages agronomiques, environnementaux et économiques. Notre étude menée à l'Institut Technique des Grandes Cultures de Sétif sur trois campagnes (2016/17, 2017/17 et -2018/19) a évalué l'impact de la rotation culturale en semis direct par rapport au travail conventionnel sur la biodiversité et la durabilité agricole en zone semi-aride d'Algérie. Les résultats montrent que le semis direct favorise les mauvaises herbes vivaces, mais réduit leur densité et diversité en association avec la rotation des cultures. La diversité des champignons mycorhiziens n'a pas été significativement affectée par le système de travail du sol, mais est plus élevée en semis direct. Cependant, aucun ver de terre n'a été observé en raison des conditions climatiques. Le semis direct conserve mieux l'humidité du sol et améliore le taux de matière organique par rapport au travail conventionnel. Les cultures de blé et triticales sous travail conventionnel ont enregistré un poids de mille grains (PMG) plus élevés que celles en gestion conventionnelle, tandis que les légumineuses (lentille et pois fourrager) ont des valeurs de PMG élevées dans les parcelles soumises en semis direct (27,89 g et 66,6 g respectivement). Le rendement en grains des quatre cultures blé, triticales, lentille et pois fourrager incluses dans la rotation était élevé dans les parcelles sous gestion de semis direct (18,30 q/ha, 20,56 q/ha, 3,33 q/ha et 9,96 q/ha) que dans celles conduites en travail conventionnel (14,76 q/ha, 17,58 q/ha, 1,42 q/ha et 7,01 q/ha). En conclusion, la rotation en semis direct améliore les caractéristiques du sol, réduit la diversité des adventices, maintient la diversité mycorhizienne et augmente la productivité et la rentabilité des cultures dans les zones semi-arides.

Mots clés : non labour, travail conventionnel, rentabilité économique, céréale, légumineuse, biodiversité, durabilité, semi-aride.

Summary

Conventional agriculture (ploughing, wheat/fallow system) is associated with several problems such as soil erosion, soil degradation, reduced crop productivity and massive biodiversity loss in the semi-arid area. On the other hand, conservation agriculture based on non-disturbance of soil, retention of residues and crop diversification by crop rotation has important agronomic, environmental and economic advantages in semi-arid area. The experiment took place in the semi-arid region at the experimental station of the Technical Institute of Field Crops (ITGC-Sétif) during the 2016/2017, 2017/2018 and 2018/2019 agricultural seasons. The present study was conducted to compare the effect of diversified crop rotation conducted in direct seeding and conventional tillage on biodiversity and agricultural sustainability in the semi-arid area. Results show that direct seeding favours perennial weeds, but reduces the density and diversity weeds in association with crop rotation. The diversity of mycorrhizal fungi was not significantly affected by the tillage system, but is higher in direct seeding. However, no earthworms were observed due to weather conditions. No-till retains better soil moisture and improves organic matter levels compared to conventional tillage. Wheat and triticale crops under conventional work had a higher weight of 1000-seeds weight (43.70 g and 35.88 g per crop) than those under conventional management, while legumes (lentils and forage peas) have high 1000-seeds weight values in plots submitted to direct seeding (27.89 g and 66.6 g respectively). The seed yield of the four crops wheat, triticale, lentil and forage pea included in the rotation was high on plots under direct seeding management (18.30 q/ha; 20.56 q/ha; 3.33 q/ha and 9.96 q/ha respectively) those conducted in conventional tillage (14.76 q/ ha; 17.58 q/ ha; 1.42 q/ ha and 7.01 q/ ha respectively), with better economic results. In conclusion, direct seeding rotation improves soil characteristics, reduces weed diversity, maintains mycorrhizal diversity and increases crop productivity and profitability in semi-arid areas.

Keywords: no-till, conventional tillage, economic profitability, grain, legume, biodiversity, sustainability, semi-arid.

ملخص

ترتبط الزراعة التقليدية (الحرث و ترك الأرض بور) بعدة مشاكل مثل تآكل التربة و تدهورها ، وانخفاض إنتاجية المحاصيل، والفقدان الهائل للتنوع البيولوجي في المنطقة شبه القاحلة. ومن ناحية أخرى، فإن الزراعة المحافظة على الموارد القائمة على عدم اضطراب التربة والاحتفاظ بالبقايا ما بعد الحصاد وتنويع المحاصيل عن طريق دوران المحاصيل و هذه التقنية لها مزايا زراعية وبيئية واقتصادية هامة في المناطق القاحلة وشبه القاحلة. جرت التجربة في المحطة التجريبية للمعهد التقني للزراعات الواسعة بسطيف خلال المواسم الزراعية المتتالية 2016-2017 و 2017-2018 و 2018-2019. و قد أجريت هذه الدراسة لمقارنة أثر تنويع تناوب المحاصيل الذي أجري في تقنيتي البذر المباشر والحرث التقليدي المتعلقة على التنوع البيولوجي والاستدامة الزراعية في المنطقة شبه القاحلة. تظهر النتائج أن البذر المباشر يعزز نمو الأعشاب المعمرة. كما تقلل هذه التقنية جنباً إلى جنب مع دوران المحاصيل من كثافة وتنوع الأعشاب الضارة. في حين أن تناوب المحاصيل الذي يتم إجراؤه في الحرث التقليدي يزيد من تنوع و ثراء الأعشاب الضارة. بناء على النتائج المستخلصة من التجربة فإن مؤشرات التنوع الفطريات الشجرية لم تتأثر سواء بدوران المحاصيل أو بتقنية خدمة الأرض. بالرغم من هذا فإن تنوع الفطريات الشجرية أعلى في تقنية البذر المباشر. و نضيف أنه بسبب ارتفاع درجات الحرارة وعدم كفاية رطوبة التربة، لم نلاحظ وجود ديدان الأرض في المحاصيل التي تم إدخالها في التناوب، سواء في البذر المباشر أو في الحرث التقليدي. كما تظهر نتائج أن الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة أن البذر المباشر يتميز برطوبة عالية في التربة مقارنة بالحرثة التقليدية، وخاصة في المراحل الحرجة للمحاصيل. حسنت تقنية عدم الحرث المواد العضوية في التربة (1.84٪) مقارنة بالطريقة التقليدية (1.58٪). تظهر النتائج أيضاً أن الأرض تحت الحرث التقليدي تتميز بمقاومة اختراق التربة أقل و مسامية عالية مقارنة بالبذر المباشر. كما أن إدراج البقوليات في دوران المحاصيل يحسن خصوبة التربة ورطوبتها خصوصاً إذا اقترن بالبذر المباشر. من حيث الإنتاج، سجلت محاصيل الحبوب (القمح و تريتیکال) وزن الألف حبة كبير في الحرث التقليدي (43.70 غ و 35.88 غ على الترتيب)، في حين أن البقوليات (العدس و البازلاء العلفية) لها قيم عالية من وزن ألف حبة في البذر المباشر (27.89 غ و 66.6 غ على التوالي). وكان محصول البذور من المحاصيل الأربعة القمح و التريتیکال و العدس و البازلاء العلفية المدرجة في التناوب مرتفعاً في قطع الأراضي الخاضعة للبذر المباشر (18.30 قنطار في الهكتار ؛ 20.56 قنطار /هكتار ؛ 3.33 قنطار/ هكتار و 9.96 قنطار/ هكتار على التوالي) مقارنة بالمحاصيل تحت الحرث التقليدي (14.76 قنطار/ هكتار ؛ 17.58 قنطار/هكتار ؛ 1.42 قنطار/هكتار و 7.01 قنطار/هكتار بالترتيب). ومن وجهة النظر الاقتصادية، سجلت أفضل النتائج بالنسبة للمحاصيل الخاضعة لتقنية عدم الحرث من تلك التي تقوم على تقنية الحرث التقليدي. تشير هذه الدراسة إلى أن دوران المحاصيل المقترن بالبذر المباشر أدى إلى تحسين الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة، وتقليل كثافة وتنوع الأعشاب الضارة، والحفاظ على تنوع الفطريات الشجرية، وزيادة إنتاجية المحاصيل والربحية الاقتصادية في المنطقة شبه القاحلة.

الكلمات المفتاحية: الزرع المباشر، الحرث التقليدي، الربحية الاقتصادية، الحبوب، البقوليات، التنوع البيولوجي، الاستدامة الزراعية، شبه القاحلة.

Liste des tableaux

Chapitre I : La dynamique des mauvaises herbes sous l'effet des pratiques culturales en zone semi-aride, cas de la région de Sétif.

Tableau 01	Caractéristiques physico-chimiques du sol de site de l'expérimentation.	45
Tableau 02	Classification des relevés floristiques des adventices au cours de la campagne agricole 2016/17 chez les deux techniques de travail du sol.	51
Tableau 03	Classification des relevés floristiques des adventices au cours de la campagne agricole 2017/18 chez les deux techniques de travail du sol.	52
Tableau 04	Classification des relevés floristiques des adventices au cours de la campagne agricole 2019/19 chez les deux techniques de travail du sol.	53
Tableau 05	Contribution des mauvaises herbes (monocotylédones et dicotylédones) dans les trois campagnes agricoles fonction de types de travail du sol.	54
Tableau 06	Contribution des mauvaises herbes (monocotylédones et dicotylédones) selon les types de culture par campagnes agricole.	55
Tableau 07	Contribution des mauvaises herbes (monocotylédones et dicotylédones) en fonction des stades de développement des cultures.	55
Tableau 08	Effet du type de travail du sol (SD et TC) et les type de culture sur SDR (S1 -2016/17)	57
Tableau 09	Effet du type de travail du sol (SD et TC) et les type de culture sur SDR (S2 -2016/17)	57
Tableau 10	Effet du type de travail du sol (SD et TC) et les type de culture sur SDR (S3 -2016/17)	58
Tableau 11	Effet du type de travail du sol (SD et TC) et les type de culture sur SDR (S1-2017/18)	58
Tableau 12	Effet du type de travail du sol (SD et TC) et les type de culture sur SDR (S2-2017/18)	58
Tableau 13	Effet du type de travail du sol (SD et TC) et les type de culture sur SDR (S3-2017/18)	59
Tableau 14	Effet du type de travail du sol (SD et TC) et les type de culture sur SDR (S1-2018/19)	60
Tableau 15	Effet du type de travail du sol (SD et TC) et les type de culture sur SDR (S2-2018/19)	60
Tableau 16	Effet du type de travail du sol (SD et TC) et les type de culture sur SDR (S3-2018/19)	60
Tableau.17	Densité, biomasse fraîche et matière sèche des M-H, des monocotylédones et des dicotylédones sous l'effet du mode de travail du sol, de cultures et de stades de culture.	76
Tableau 18	Indice de diversité des MH sous l'effet du mode de travail du sol, les stades de prélèvement et les cultures.	86
Tableau 19	Matrice de corrélations entre les variables étudiées en SD.	87
Tableau 20	Matrice de corrélation entre les variables étudiées en TC	88

Chapitre II : Effet de la rotation culturale dans le semis direct et le travail conventionnel sur la diversité des Champignons Mycorhiziens Arbusculaires (CMA) et des vers de terre dans la zone semi-aride de l'Est d'Algérie (Cas de Sétif)

Tableau 01	Désherbage chimique de l'essai	101
Tableau 02	Espèces identifiées des champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA)	109
Tableau 03	Les morphotypes non identifiées	114
Tableau 04	Abondance relative des espèces dans les cultures de blé, de triticales, de lentille et de pois fourrager dans les deux techniques de travail du sol (SD et TC) (en %).	117
Tableau 05	Analyse de la variance des sources de variation sur les taux de colonisation par les champignons mycorhiziens à arbuscules et leurs indices de diversité.	121
Tableau 06	Coefficient de corrélation de Pearson entre le taux de colonisation par les champignons mycorhiziens arbusculaires et les indices de diversité	122

Chapitre III : Impact du précédent cultural et les techniques de travail du sol sur les caractéristiques physico-chimiques du sol de la région semi-aride de l'Est d'Algérien, cas de la région de Sétif

Tableau 01	Stades végétatifs correspondent aux prélèvements et mesures d'humidité du sol.	130
Tableau 02	Méthodes d'analyse du sol utilisées.	132
Tableau 03	Moyennes des valeurs des caractères physico-chimiques par profondeur avant l'installation des essais.	133

Tableau 04	Analyse de la variance d'humidité du sol en fonction de sources de variation	139
Tableau 05	Les carrés moyens de l'analyse de la variance des analyses physiques du sol étudié.	149
Tableau 06	Analyse de la variance des paramètres chimiques du sol.	180
Tableau 07	Coefficient de Pearson de corrélation entre les paramètres physico-chimiques du sol étudiés.	181

Chapitre VI : La variabilité des rendements et de la rentabilité économique des cultures (blé, triticale, lentille et pois fourrager) en fonction du type de travail du sol et de précédent cultural en zone semi-aride d'Algérie.

Tableau 01	Caractéristiques physico-chimiques du sol de site de l'expérimentation	194
Tableau 02	Conditions climatiques des trois campagnes agricoles au niveau de la région semi-aride de Sétif.	194
Tableau 03	Caractéristiques des espèces incluant dans la rotation	195
Tableau 04	Désherbage chimique de l'essai	196
Tableau 05	Carrés moyens de l'analyse de la variance du rendement et ces composantes pour la culture de blé	228
Tableau 06	Carrés moyens de l'analyse de la variance du rendement et ces composantes pour la culture de triticale	228
Tableau 07	Carrés moyens de l'analyse de la variance du rendement et ces composantes pour la culture de la lentille	229
Tableau 08	Carrés moyens de l'analyse de la variance du rendement et ces composantes pour la culture de pois fourrager	229
Tableau 09	Analyse de la variance du ratio coûts-bénéfices	231

Liste des figures

Revue bibliographique

Figure 01	Fonctions d'intérêt des trois principes définissant l'AC pour l'agriculteur et l'environnement	08
Figure 02	Effet biologique des légumineuses dans un système de culture	13
Figure 03	Concepts de base de la durabilité et les interactions entre les différentes dimensions	22
Figure 04	Avantages de l'agriculture durable	22

Chapitre I: Dynamique des mauvaises herbes sous l'effet des pratiques culturales en zone semi-aride, cas de la région de Sétif.

Figure 01	Emplacement de l'ITGC Sétif (source : Google Earth, 2022)	45
Figure 02	Températures moyennes mensuelles et pluviométrie enregistrées au cours des trois campagnes d'étude sur le site expérimental de la station expérimentale agricole de l'ITGC de Sétif comparé à la décennie 2006/2016.	47
Figure 03	Densité totale des MH (a), densité des monocotylédones (b) et des dicotylédones (c) durant les trois années d'étude.	65
Figure 04	Densité totale des MH (a), la densité des monocotylédones (b) et des dicotylédones (c) en fonction du mode de travail du sol dans les trois années d'étude.	66
Figure 05	Densité totale des MH (a), la densité des monocotylédones (b) et dicotylédones (c) en fonction du type de culture dans les trois années d'étude.	66
Figure 06	Densité totale des MH (a), la densité des monocotylédones (b) et des dicotylédones (c) en fonction des stades d'échantillonnage dans les trois années d'étude.	67
Figure 07	Biomasse totale des MH (a), la biomasse des monocotylédones (b) et dicotylédones (c) durant les trois campagnes d'étude.	70
Figure 08	Biomasse totale des MH (a), de la biomasse des monocotylédones (b) et des dicotylédones (c) en fonction du type de travail du sol durant les 3 campagnes.	70
Figure 09	Biomasse totale des MH (a), de la biomasse des monocotylédones (b) et des dicotylédones (c) en fonction des cultures durant les campagnes d'étude.	71
Figure 10	Biomasse totale des MH (a), de la biomasse des monocotylédones (b) et des dicotylédones (c) durant les trois stades de prélèvement.	71
Figure 11	Matière sèche totale des adventices (a), des monocotylédones (b) et dicotylédones (c) lors des trois campagnes d'étude.	73
Figure 12	Matière sèche des MH (a), des monocotylédones (b) et des dicotylédones (c) en fonction du type de travail du sol par année d'étude.	74
Figure 13	Matière sèche des MH (a), monocotylédones (b) et des dicotylédones (c) en fonction des cultures par année d'étude.	74
Figure 14	Matière sèche des MH (a), des monocotylédones (b) et des dicotylédones (c) en fonction des stades de prélèvement par année d'étude.	75
Figure 15	Richesse des espèces des adventices en fonction d'année (a), système de travail du sol (b), culture (c) et du stade de prélèvement (d).	78
Figure 16	Indice de Shannon-Wiener «H'» en fonction de : (a) l'année agricole, (b) de système de travail du sol, (c) des cultures et (d) les stades d'échantillonnage.	80
Figure 17	Indice de Simpson «C» en fonction de la campagne agricole (a), système de travail du sol (b), de la culture (c) et du stade d'échantillonnage (d).	82
Figure 18	Indice de Peilou's «J» des adventices en fonction de ; (a) campagnes d'étude, (b) MTS, (c) type de culture et (d) les stades de prélèvement.	83
Figure 19	Dmg en fonction de l'année (a), système de travail du sol (b), culture (c) et stade de prélèvement (d).	85
Figure 20	Représentation temporelle évolutive des variables mesurées, par rapport aux facteurs étudiés par campagne : 2016/17 (A), 2017/18 (B) et 2018/19 (C).	91

Chapitre II : Effet de la rotation culturale dans le semis direct et le travail conventionnel sur la diversité des Champignons Mycorhiziens Arbusculaires (CMA) et des vers de terre dans la zone semi-aride de l'Est d'Algérie (Cas de Sétif)

Figure 01	Diagramme ombrothermique de la campagne agricole 2018/19.	99
------------------	---	-----------

Figure 02	Photos montrent le diagnostique des vers de terre sur champs.	101
Figure 03	Structures formées par l'association des racines avec les CMA « a : arbuscule + vésicule », « b : arbuscule », « c : vésicule » et « d : spore formé à l'intérieur du cortex racinaire »	104
Figure 04	Taux de colonisation arbusculaire (TCA) dans les quatre cultures soumise dans deux techniques de travail du sol.	105
Figure 05	Taux de colonisation vésiculaire (TCV) dans les quatre cultures soumises dans deux techniques de travail du sol.	106
Figure 06	Taux de colonisation total (TCT) dans les quatre cultures soumises dans deux techniques de travail du sol.	107
Figure 07	Densité des spores (DS) dans les quatre cultures soumises dans deux techniques de travail du sol.	108
Figure 08	Indice Shannon-Weaver (H') dans les quatre cultures soumises dans deux techniques de travail du sol	119
Figure 09	Indice de Simpson (C) dans les quatre cultures soumises dans deux techniques de travail du sol.	120
Figure 10	Indice de Margalef (D) dans les quatre cultures soumises à deux techniques de travail du sol.	121
Figure 11	Représentation évolutive dans le temps des variables mesurées, en fonction des traitements étudiés (système de travail du sol et cultures), dans le plan formé par les axes 1 et 2 de l'analyse en composantes principales.	123

Chapitre III : Impact du précédent cultural et les techniques de travail du sol sur les caractéristiques physico-chimiques du sol de la région semi-aride de l'Est d'Algérien, cas de la région de Sétif

Figure 01	Photo représentative de la mesure de l'humidité pondérale	130
Figure 02	Photo représentative de la mesure de la densité apparente	131
Figure 03	Photo illustrative de la mesure de la résistance à la pénétration par pénétromètre	132
Figure 04	Humidité du sol par stades de culture et par campagne agricole.	134
Figure 05	Humidité du sol par profondeurs et par année agricole.	134
Figure 06	Humidité du sol par technique culturale et par année agricole.	135
Figure 07	Humidité du sol par profondeur et par mode de travail du sol.	135
Figure 08	Humidité du sol par stade de culture en fonction de la technique de travail du sol.	136
Figure 09	Teneur en humidité par culture et par année agricole.	137
Figure 10	Humidité du sol par culture et par type de travail du sol.	137
Figure 11	Humidité du sol par stade végétatif et par espèce.	138
Figure 12	Humidité du sol par profondeur et par culture.	138
Figure 13	Humidité du sol par profondeur et par stade végétatif.	139
Figure 14	Densité apparente par technique de travail du sol et par campagne agricole.	140
Figure 15	Densité apparente du sol par profondeur en fonction des techniques de travail du sol	141
Figure 16	Densité apparente du sol par cultures en fonction de l'année agricole.	141
Figure 17	Densité apparente par culture en fonction de modes de travail du sol.	142
Figure 18	Densité apparente du sol par profondeur en fonction des cultures et rotation.	142
Figure 19	Résistance pénétrométrique par système de travail du sol et par campagne agricole	143
Figure 20	Résistance pénétrométrique par type de culture, mode de travail du sol (a) et par campagne agricole (b).	144
Figure 21	Valeurs de la résistance pénétrométrique par profondeur en fonction du travail du sol (a), des campagnes d'étude (b) et des cultures (c).	145
Figure 22	Porosité du sol en fonction du travail du sol et des cultures.	148
Figure 23	Porosité du sol en fonction de la profondeur et du travail du sol.	149
Figure 24	pH du sol par travail du sol et par culture incluant en rotation.	151
Figure 25	pH du sol par profondeur (a), par campagne agricole (b), par culture (c) et par travail du sol (d).	152
Figure 26	Valeurs de la CE par dans les deux systèmes de travail du sol (a) et dans les quatre cultures (b) durant les trois campagnes.	154
Figure 27	CE sur par profondeur "a", en fonction de la campagne agricole "b", en fonction du travail du sol "c" et de la culture "d".	155
Figure 28	Taux de calcaire total par campagne agricole "a", en fonction des techniques de travail	156

	du sol, par culture en fonction de la campagne agricole "b", et en fonction des techniques de travail du sol "c".	
Figure 29	Taux de calcaire total par profondeur "a", par campagnes agricole "b", par technique de travail du sol "c" et par culture "d".	157
Figure 30	Matière organique par campagne agricole « a », type de travail du sol « b », et par culture « c et d ».	161
Figure 31	Teneur en matière organique du sol par profondeur « a », par campagne « b », par technologie de travail du sol « c » et par culture « d ».	162
Figure 32	Teneur en azote total par campagne agricole "a", par techniques de travail du sol "b" et par culture "c et d".	164
Figure 33	Teneur en azote dans le sol par profondeur "a", par campagne agricole "c", par système de travail du sol "b" et par culture "d".	165
Figure 34	Phosphore par année d'étude "a", par système de travail du sol "b" et par culture "c et d".	167
Figure 35	Phosphore par profondeur "a", par campagne agricole "b", par techniques de travail du sol "c" et par culture "d".	168
Figure 36	Teneur en potassium par campagne d'étude "a", par mode de travail du sol "b", et par culture "c et d".	170
Figure 37	Potassium dans le sol par profondeur du sol "a", par campagne agricole "b", par mode de travail du sol "c" et par culture « d ».	171
Figure 38	Rapport C/N par année d'étude "a", par mode de travail du sol "b", et par type de culture "c & d".	172
Figure 39	Rapport de C/N du sol par profondeur "a", par campagne "b", par mode de travail du sol "c", et par culture "d".	173
Figure 40	Teneur en magnésium par campagne agricole "a", par mode de travail du sol "b", par culture "c & d".	175
Figure 41	Teneur du magnésium du sol par couche de sol "a", par campagne agricole "b", par système de travail du sol "c" par culture "d".	176
Figure 42	Valeurs de calcium du sol par campagne agricole "a", par mode de travail du sol "b", et par type de culture "c et d".	177
Figure 43	Teneur du calcium du sol par profondeur "a", par campagne d'étude "b", par système de travail du sol "c" et par type de culture "d".	178
Figure 44	Valeurs de sodium du sol par campagne agricole "a", par mode de travail du sol "b", et par type de culture "c et d".	179
Figure 45	Teneur de sodium du sol par couche de sol "a", par campagne agricole "c", par système de travail du sol "b" et par culture "d".	180
Figure 46	Représentation temporelle évolutive des variables mesurées, par rapport aux traitements étudiés sur le plan formé par les axes 1 et 2 de l'ACP.	184

Chapitre VI : La variabilité des rendements et de la rentabilité économique des cultures (blé, triticale, lentille et pois fourrager) en fonction du type de travail du sol et de précédent cultural en zone semi-aride d'Algérie.

Figure 01	Emplacement de la parcelle d'étude (source google earth, 2022)	193
Figure 02	Schéma représentatif du dispositif expérimental adopté lors des trois campagnes.	195
Figure 03	Schéma de fixation des stations de notation	196
Figure 04	Images illustrant la mesure de la teneur relative en eau	198
Figure 05	Mesure de chlorophylle par le SPAD	199
Figure 06	Nombre de pieds levés par m ² (NPM) pour les quatre cultures dans les deux modes de gestion du sol et dans les trois campagnes d'expérimentation.	201
Figure 07	Nombre de tiges par m ² (NTM) pour le blé et triticale dans les deux modes de gestion du sol et dans les trois campagnes d'expérimentation.	202
Figure 08	Nombre de ramifications primaires par plante (NRP) pour la culture de la lentille et du pois fourrager dans les deux modes de gestion du sol et dans les trois campagnes.	203
Figure 09	Nombre de fleurs par plante (NFP) pour la culture de la lentille et du pois fourrager dans les deux modes de gestion du sol et dans les trois campagnes agricoles.	204
Figure 10	Nombre d'épis par m ² (NE/M ²) pour le blé et le triticale en fonction de travail du sol et de l'année agricole.	205
Figure 11	Variation du nombre de gousses par plante pour la culture de lentille et du pois	206

	fourrager en fonction de la gestion du sol et de l'année agricole.	
Figure 12	Nombre de grains par épis pour le blé et le triticales en fonction des techniques de travail du sol et des années agricoles.	207
Figure 13	Nombre de grains par gousse (NG/G) pour la culture de la lentille et du pois fourrager en fonction de la gestion du sol et de l'année agricole.	208
Figure 14	Poids de mille grains des cultures en fonction de modes de gestion du sol et de l'année agricole.	210
Figure 15	Rendement en grains par culture en fonction de mode de gestion du sol et l'année agricole	212
Figure 16	Biomasse à la récolte par culture en fonction de mode de gestion du sol et de la campagne agricole.	214
Figure 17	Indice de récolte par culture en fonction de mode de travail du sol et de l'année agricole.	215
Figure 18	Rendement en paille pour les céréales (blé et triticales en fonction de mode de travail du sol et de la campagne agricole.	216
Figure 19	Hauteur de tige par culture en fonction de mode de travail du sol et de la campagne agricole.	218
Figure 20	Longueur de système racinaire par culture en fonction de mode de gestion du sol et de l'année.	220
Figure 21	Longueur d'épi par culture (blé et triticales) en fonction de mode de travail du sol et dans l'année.	221
Figure 22	Longueur de la barbe d'épi pour le blé et le triticales en fonction de mode de travail du sol et de l'année.	222
Figure 23	Longueur de la gousse pour la lentille et le pois fourrager en fonction de mode de travail du sol et de l'année.	223
Figure 24	Nombre des nodules (Nn_b , Nn_a , Nn_i) pour la culture de lentille en fonction de mode de travail du sol et de l'année.	224
Figure 25	Nombre de nodules (Nn_b , Nn_a , Nn_i) pour la culture de pois fourrager en fonction de mode de travail du sol et de l'année.	225
Figure 26	Teneur relative en eau des cultures de blé et de triticales en fonction de mode de travail du sol et de l'année.	226
Figure 27	Teneur en chlorophylle des cultures de blé et de triticales en fonction de mode de gestion du sol et de l'année.	228
Figure 28	Ratio coûts-bénéfices des cultures de rotation en fonction des techniques de gestion du sol.	231
Figure 29	Projection des systèmes de travail du sol et les variables de la culture de blé sur le plan factoriel (1-2).	232
Figure 30	Projection des systèmes de travail du sol et les variables de la culture de triticales sur le plan factoriel (1-2).	234
Figure 31	Projection des systèmes de travail du sol et les variables de la culture de lentille sur le plan factoriel (1-2).	235
Figure 32	Projection des systèmes de travail du sol et les variables de la culture de pois fourrager sur le plan factoriel (1-2).	236

Résumé	
Liste des tableaux	
Liste des figures	

Sommaire

Introduction Générale	01
------------------------------	-----------

Partie I : Revue Bibliographique

Chapitre I: Aperçu sur l'agriculture conventionnelle (AT) et l'agriculture de conservation (AC)	06
--	-----------

I.1. Agriculture conventionnelle ou traditionnelle (AT)	06
I.1.1. Définition de l'agriculture conventionnelle	06
I.1.2. Pratiques de l'agriculture conventionnelle	06
I.1.2.1. Travail conventionnel	06
a. Labour	06
b. Façons superficielles	06
c. Préparation du lit de semence	06
d. Limites de la gestion conventionnelle du sol	06
I.1.2.2. Monoculture	07
I.1.2.3. Jachère	07
I.1.3. Limites de l'agriculture conventionnelle	08
I.2. Agriculture de conservation (AC)	08
I.2.1. Travail de conservation du sol (TCS)	09
I.2.2. Couverture permanente du sol par la rétention des résidus de culture	09
I.2.3. Rotation des cultures	09
I.2.3.1. Définitions	09
I.2.3.2. Principes de la rotation culturale	10
I.2.3.3. Types de la succession des cultures	10
I.2.3.4. Avantages de la rotation	10
I.2.3.5. Importance des céréales dans la rotation	10
I.2.3.5.1. Blé	11
I.2.3.5.2. Triticale	11
I.2.3.6. Importance des légumineuses dans la rotation	12
I.2.3.6.1 Lentille	12
I.2.3.6.2. Pois fourrager	13
I.2.3.7. Inconvénients et recommandation	13
I.2.3.8. Rotation des cultures en semis direct et en travail conventionnel	14
I.3. Importance de l'agriculture de conservation en zone semi-aride et aride	15
I.4. Effet de l'agriculture conventionnelle et de conservation sur la sécurité alimentaire	16
I.5. Rentabilité économique entre l'agriculture conventionnelle et de conservation	17
	18

Chapitre II : Biodiversité agricole

II.1. Définition de la biodiversité (la diversité biologique)	18
II.2. Définition de la biodiversité agricole ou l'agro-biodiversité	18
II.3. Importance de la biodiversité agricole	19
II.4. Effet de l'agriculture conventionnelle (moderne) et l'agriculture de conservation sur l'agro-biodiversité	19
II.4.1. Effet de l'agriculture conventionnelle sur l'agro-biodiversité	19
II.4.2. Effet de l'agriculture de conservation sur l'agro-biodiversité	22
	21

Chapitre III : Durabilité agricole ou l'agriculture durable

III.1. Définition	21
-------------------	----

III.2. Avantages de la durabilité agricole	22
III.3. Agriculture conventionnelle et la durabilité agricole	22
III.4. Agriculture de conservation et la durabilité agricole	23
III.4.1. Conservation du sol	24
III.4.2. Gestion de l'eau	24
III.4.3. Biodiversité et la préservation des habitats	24
III.4.4. Durabilité environnementale	25
III.4.5. Durabilité économique	26
III.5. Relation entre la biodiversité et la durabilité agricole	26
Références bibliographiques	28

Partie II : Travail Expérimentale

CHAPITRE I : La dynamique des mauvaises herbes sous l'effet des pratiques culturales en zone semi-aride, cas de la région de Sétif

Résumé	43
1. Introduction	43
2. Matériel et Méthodes	45
2.1. Site d'étude	45
2.2. Conditions climatiques	46
2.2.1. Précipitations	46
2.2.2. Températures	46
2.3. Description du protocole expérimental adopté	47
a. Techniques de travail du sol étudiées	47
b. Fertilisation	47
c. Désherbage	47
2.4. Méthode d'étude de la flore des adventices	48
a. Détermination des espèces	48
b. Détermination de la densité des adventices	48
c. Détermination de la biomasse des adventices	48
d. Détermination de la matière sèche	48
e. Détermination de la contribution	48
f. Détermination de la ration de dominance à deux facteurs (SDR)	48
g. Etude de la diversité de la flore adventice	48
2.5. Analyses statistiques	49
3. Résultats et discussion	49
3.1. Les espèces des mauvaises herbes recensées	49
3.2. Etude de la variabilité du ratio de dominance à deux facteurs (SDR)	56
3.3. Variation de la densité totale des M-H, la densité des monocotylédones et dicotylédones	61
a. Densité des mauvaises herbes	61
b. Densité des monocotylédones	63
c. Densité des dicotylédones	64
3.4. Biomasse fraîche totale des M-H, de la biomasse des monocotylédones et des dicotylédones	67
a. Variation de la biomasse totale	67
b. Variation de la biomasse des monocotylédones	68
c. Variation de la biomasse des dicotylédones	69
3.5. Matière sèche totale, la matière sèche des monocotylédones et des dicotylédones	72
a. Matière sèche totale des MH	72
b. Matière sèche des monocotylédones (MS Mono)	72
c. Matière sèche des dicotylédones	73
3.6. Richesse des espèces des adventices « R »	76

3.7. Indice de Shannon-Wiener « H' »	78
3.8. Indice de Simpson « C »	80
3.9. Indice de Peilou (J)	82
3.10. Indice de Margalef (Dmg)	83
3.11. Etude des corrélations	86
3.12. Analyse des composantes principales (ACP)	88

4. Conclusion	91
----------------------	-----------

Références bibliographiques	92
------------------------------------	-----------

Chapitre II : Effet de la rotation culturale dans le semis direct et le travail conventionnel sur la diversité des Champignons Mycorhiziens Arbusculaires (CMA) et des vers de terre dans la zone semi-aride de l'Est d'Algérie (Cas de Sétif)

Résumé	97
Introduction	97
II. Matériel et Méthodes	99
II.1 Site d'étude	99
II.2. Caractéristiques pédoclimatiques du site expérimental	99
II.3. Matériel végétal	100
II.4. Installation et conduite de l'expérimentation	100
II.4.1. Techniques de travail du sol	100
II.4. 2 Mise en place des cultures	100
II.4.3. Entretien des cultures	100
II.4.3.1. Fertilisation du sol	100
II.4.3.2. Désherbage	100
II.5. Mesures effectuées	101
II.5.1. Etude de la diversité des vers de terre	101
II.5.2. Etude de la diversité des champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA)	101
II.5.2.1. Mesure du taux de colonisation des racines par CMA	101
II.5.2.2. Densité des spores	102
II.5.2.3. Etude de la diversité des champignons mycorhiziens arbusculaires	102
II.6. Analyses statistiques	103
III. Résultats et discussion	103
III.1. Etude de la diversité des vers de terre	103
III.2. Effet des techniques de travail du sol et du type de cultures sur le taux de colonisation total (TCT), le taux d'arbuscules (TCA) et le taux de vésicules (TCV)	104
III.2.1. Taux de colonisation des racines par les arbuscules (TCA) (en %)	104
III.2.2. Taux de colonisation des racines par les vésicules (TCV) (%)	105
III.2.3. Taux de colonisation total des racines par les par les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA)	106
III.3. Etude de la diversité des Champignons Mycorhiens Arbusculaires (CMA)	107
III.3.1. Effet des techniques de travail du sol et les différentes cultures sur la densité des spores des CMA dans le sol	107
III.3.2. Etude de la diversité des champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) à l'aide d'indices de diversité	108
III.3.2.1. Effet des techniques de travail du sol et des types de cultures sur l'abondance relative des espèces de champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA)	115
III.3.2.2. Effet de la technique de travail du sol et des cultures sur l'indice de Shannon et Weiner (H')	119
III.3.2.3. Effet de la technique de travail du sol et des cultures sur l'indice de Simpson (C)	120
III.3.2.4. Effet de la technique de travail du sol et des cultures sur l'indice de Margalef (Dmg)	120

III.4. Etude des corrélations	121
III.5. Etude d'analyse en composantes principales (ACP)	122
Conclusion	123
Références bibliographiques	124

Chapitre III : Impact du précédent cultural et les techniques de travail du sol sur les caractéristiques physico-chimiques du sol de la région semi-aride d'Algérie cas de la wilaya de Sétif.

Résumé	128
1. Introduction	128
2. Matériel et Méthodes	129
2.1. Site expérimental	129
2.2. Installation et conduite de l'essai	129
2.3. Mesure effectuées	130
2.3.1. Mesure de l'humidité pondérale (H)	130
2.3.2. Paramètres physiques	131
2.3.2.1. Mesure de la densité apparente du sol ou masse volumique (Da)	131
2.3.2.2. Détermination de la porosité (P)	131
2.3.2.3. Résistance à la pénétration au sol (Compaction du sol) (Rp)	131
2.3.3. Prélèvement pour les analyses chimiques du sol	132
2.4. Analyses statistiques	132
3. Résultats et Discussion	132
3.1. Humidité pondérale du sol	133
3.2. Paramètres physiques	139
3.2.1. Densité apparente (Da)	139
3.2.2. Résistance pénétrométrique (Rp)	142
3.2.3. Porosité	145
3.3. Paramètres chimiques	149
3.3.1. Le pH du sol	149
3.3.2. Conductivité électrique (CE)	152
3.3.3. Teneur en CaCO ₃ total	155
3.3.4. Evolution de la matière organique (MO)	157
3.3.5. Azote total (N)	162
3.3.6. Phosphore total (P)	165
3.3.7. Potassium (K)	168
3.3.8. Rapport C/N	171
3.3.9. Magnésium (Mg)	174
3.3.10. Calcium (Ca)	176
3.3.11. Sodium (Na)	178
3.4. Etude des corrélations	181
3.5. Etude d'analyse en composante principale (ACP)	182
Conclusion	184
Références bibliographiques	185

Chapitre VI : La variabilité des rendements et de la rentabilité économique des cultures (blé, triticale, lentille et pois fourrager) en fonction du type de travail du sol et de précédent cultural en zone semi-aride d'Algérie.

Résumé	191
---------------	-----

Introduction	191
II. Matériels et Méthode	193
II.1. Localisation de l'essai	193
II.2. Caractéristiques pédoclimatiques du site	193
II.2.1. Caractéristiques intrinsèque du sol	193
II.2.2. Caractéristiques climatiques	194
II.3. Matériel végétal	195
II.4. Dispositif expérimental	195
II.5. Entretien des cultures	196
II.5.1. Fertilisation du sol	196
II.5.2. Désherbage	196
II.6. Paramètres étudiés	196
1. Paramètres agronomiques	196
2. Paramètres morphologiques	197
3. Paramètres physiologiques	198
4. Paramètres économiques	199
II.7. Les analyses statistiques	199
	199
III. Résultats et Discussion	
III.1. Paramètres agronomiques	199
III. 2. Paramètres morphologiques	216
III. 3. Paramètres physiologiques	225
III.4. Rentabilité économique (fondée sur le ratio coût-Bénéfices) (RCB)	229
III.5. Etude d'analyse en composante principale (ACP)	231
Conclusion	236
Références bibliographiques	237
Conclusion Générale	243
Annexes	

Introduction Générale

Introduction Générale

En Algérie, la zone semi-aride occupe 85 % du territoire agricole (**Bessaoud et al., 2019**). Cette zone est caractérisée par un climat pluvieux et froid en hiver, chaud et sec en été, avec des périodes de sécheresse très fréquente toute au long de l'année, des précipitations ne dépassant pas 400 mm par an (**Rouabhi et al., 2019**). Les sols de cette zone sont des sols calcaires à faible fertilité, sujets à l'érosion hydrique et éolienne. La zone semi-aride est dominée par les cultures céréalières pluviales associées à l'élevage. Le système de culture adopté dans cette zone est la culture de céréales suivie de jachères (**Benniou, 2008; Bessaoud et al., 2019**) ou la monoculture céréalière.

Dans la zone semi-aride d'Algérie, la productivité des cultures pluviales, notamment les céréales (blé, orge...), a connu une baisse due à divers facteurs tels que les contraintes climatiques, la rareté de l'eau, la détérioration de la qualité du sol et des pratiques agricoles inadéquates. D'après **Chebouti & Abdelguerfi (2002)**, les températures basses en hiver, les températures élevées en été et la sécheresse estivale, ainsi que les aléas climatiques (gelées printanières et sirocco) constituent des freins importants à la production végétale dans cette zone semi-aride.

Les pratiques agricoles conventionnelles, telles que le labour, sont courantes dans la zone semi-aride d'Algérie. En principe, les opérations de labour sont effectuées pour contrôler les infestations de mauvaises herbes et créer des conditions optimales pour le semis (**Wardak et al., 2024**). Cependant, le labour contribue à la dégradation de la qualité du sol ; de l'eau et de l'environnement (**Rouabhi et al., 2016**). Les opérations du travail du sol conventionnelles perturbent la structure du sol, augmentent le risque de ruissellement et l'érosion, et accentuent le compactage du sous-sol, réduisant ainsi la capacité de rétention d'eau et provoquant la perte de matière organique par oxydation (**Martínez et al., 2008 ; Huang et al., 2012**). Cela perturbe également les habitats des organismes de surface et sous-surface, entraînant une détérioration de la qualité du sol, de sa fertilité, de sa structure et de la matière organique, ce qui affecte négativement le rendement et nuit à la durabilité agricole dans la zone semi-aride.

La jachère travaillée est pratiquée dans la zone semi-aride pour emmagasiner l'eau de l'année afin de produire du blé l'année suivante (**Mekhlouf et al., 2011**). Cependant, cette pratique expose le sol aux diverses conditions environnementales difficiles, telles que le rayonnement solaire, les vents forts, les pluies abondantes, les températures élevées ainsi que les conditions de gel et dégel. Ces conditions sévères détériorent les propriétés physiques du sol, réduisent sa fertilité et augmentent l'érosion hydrique et éolienne (**Abhiram & Eeswaran, 2022**).

Dans certains cas, les agriculteurs de la région semi-aride ont remplacé la jachère par la monoculture céréalière pour augmenter leurs revenus. Cependant, ce système de culture est associé à divers problèmes, tels que la dégradation du sol, l'infestation par les adventices, le développement de maladies et de ravageurs, entraînant ainsi une diminution des rendements des cultures céréalières (**Szymańska et al., 2020**), ce qui affecte négativement la résilience du système de culture et sa rentabilité.

Les pratiques agricoles traditionnelles ne répondent pas aux critères de durabilité agricole et de respect de l'environnement (**Châtaigner & Dupponnois, 2017**), et ne sont donc pas recommandées pour maintenir la durabilité agricole dans le milieu semi-aride. En effet, le travail conventionnel du sol est une cause majeure de l'érosion éolienne et hydrique, la salinisation, du compactage et de l'épuisement des nutriments (**Angon et al., 2023**). Le système de culture blé/ jachère a accentué la baisse de fertilité du sol (**Dugar et al., 2019**), affectant ainsi le rendement des cultures, tant qualitativement que quantitativement. De plus, les pratiques agricoles conventionnelles ont des effets néfastes sur la durabilité environnementale, en raison des émissions des gaz à effet de serre importantes, qui augmentent le risque de pollution de l'aire.

Concernant l'effet des pratiques de l'agriculture conventionnelle sur l'agro-biodiversité, **Brussaard et al. (2007)** notent que les agro-écosystèmes labourés, en raison de la période de jachère, entraînent une diminution de la richesse en espèces, ce qui traduit par une dominance de certaines espèces. Selon **Jossi et al. (2011)**, le labour réduit la diversité des lombrics de 30 %, car les perturbations du sol par le labour exposent les vers de terre aux prédateurs, tels que les oiseaux, et entraînent la destruction de leurs galeries. Une étude menée par **McDaniel et al. (2014)** a montré que la monoculture entraîne une perte de la biodiversité microbienne du sol, nuisant ainsi à l'activité biologique du sol et influent négativement ses fonctions.

Pour assurer la durabilité agricole et maintenue l'agro-biodiversité en région semi-aride, il est nécessaire d'améliorer les pratiques culturales adaptées aux conditions contraignantes de la zone afin d'améliorer la santé du sol, la productivité des cultures, d'assurer la sécurité alimentaire, augmenter le revenu des agriculteurs et de diminuer la pollution du sol et de l'eau, tout en préservant la vie biologique du sol.

L'agriculture de conservation fondée sur une perturbation minimale du sol (travail minimum du sol) ou le non-perturbation du sol (semis direct), ainsi que la diversification des cultures par la rotation et la rétention des résidus de culture à la surface du sol (**Kassam et al., 2019**), est une alternative viable à l'agriculture conventionnelle.

La rétention des résidus de culture à la surface du sol améliore les propriétés physiques du sol (notamment la porosité), réduit les pertes d'eau par évaporation et modéré la température du sol, ce qui diminue les fluctuations de la disponibilité de l'eau pour les cultures et augmente leurs rendements (**Ramesh et al., 2016**).

Le système de semis direct, développé dans le cadre de l'agriculture de conservation, consiste à placer les semences dans la terre sans perturbation. L'adoption de ce système est largement encouragée en raison de ses avantages potentiels. Contrairement au travail conventionnel, le semis direct a un potentiel plus grand pour la séquestration du carbone dans le sol (**Bernoux et al., 2006**), améliore l'infiltration et la capacité de stockage de l'eau (**Lipiec et al., 2006**), améliore le fonctionnement et la qualité du sol et réduit le risque d'érosion (**Hao et al., 2001**). **Saber & Mrabet (2002)** ont montré que le semis direct améliore la productivité des cultures, en particulier dans les conditions de sécheresse.

La rotation culturale, approche agronomique incluse dans l'agriculture de conservation, présente d'importants avantages environnementaux et agronomiques, tels que le contrôle des parasites et des mauvaises herbes, l'amélioration des caractéristiques du sol et la réduction de la demande en engrais chimiques (**Lago-Oliveira et al., 2024**). De plus, la diversification des cultures par la rotation a permis d'augmenter la productivité des cultures et d'améliorer le revenu économique des agriculteurs (**Volsi et al., 2022**). L'inclusion des légumineuses dans une rotation culturale a contribué à améliorer la santé du sol par l'augmentation de la teneur en matière organique, la formation d'humus et l'amélioration de la disponibilité des éléments nutritifs. Les légumineuses jouent également un rôle important dans la fixation de l'azote atmosphérique grâce aux bactéries symbiotiques fixatrices d'azote (**Rani et al., 2022**), tout en réduisant l'érosion due à l'eau et au vent (**Szymańska et al., 2020**). L'incorporation des légumineuses dans la séquence de cultures est une stratégie avancée pour restaurer les caractéristiques biologique du sol (**Meena et al., 2022**). **Islam et al. (2023)** ont montré que les cultures de légumineuses nécessitent moins d'intrants, moins de maïs d'œuvre et moins de temps. Par conséquent, le coût de production des légumineuses est inférieur à celui des céréales, ce qui augmente la rentabilité économique des agriculteurs. Enfin, la rotation des cultures améliore le rendement, offre des aliments diversifiés et riches en protéines et vitamines, contribuant ainsi à atteindre la sécurité alimentaire.

Les pratiques de l'agriculture de conservation sont recommandées comme des pratiques de maintien la durabilité agricole dans les zones semi-arides. Selon **Page et al. (2020)**, ces pratiques sont conçues pour améliorer la durabilité agricole tout en protégeant et en conservant le sol, l'eau et les ressources biologiques, de sorte que les intrants externes puissent être maintenus à un niveau minimal. Le semis direct maintient la santé du sol pour une production agricole durable ; il améliore la stabilité des agrégats et réduit l'érosion du sol (**Juhos et al., 2023**), tout en favorisant la séquestration du carbone et augmentent le taux de matière organique (**Saber & Mrabet, 2002**). Selon **Meynard et al. (2013)** ; **Garbelini et al. (2022)**, la diversification des cultures est souvent présentée comme un levier d'action pour accroître la durabilité des systèmes de production agricole à base de céréales, en particulier dans les régions où la gestion du sol se fait avec le semis direct. En ce qui concerne la durabilité environnementale, le semis direct joue un rôle important dans la réduction des émissions des gaz à effet de serre, tels que le dioxyde de carbone, le méthane et l'oxyde nitreux, contribuant ainsi à atténuer les changements climatiques (**Boudiar et al., 2022**). La diversification des cultures par la rotation réduit les émission des gaz à effet de serre, comme de NO₂ et CO₂ ce qui améliore la durabilité environnementale (**Liu et al., 2022**).

Les pratiques de l'agriculture de conservation sont connues pour leurs effets positifs sur l'agro-biodiversité. Par exemple, l'abondance des vers de terre dans les systèmes de conservation augmente plus de deux fois par rapport aux méthodes conventionnelles (**Juhos et al., 2023**). De plus, le semis direct à long terme augmente les activités enzymatiques des bactéries (**Sekaran et al., 2020**), et améliore la diversité des champignons mycorhiziens arbusculaires (**Yang et al., 2012**). La diversification des cultures par la succession conduit à des communautés microbiennes du sol plus diverses et plus actives. Par exemple, une rotation à quatre cultures a augmenté la diversité des métabolites microbiennes du sol environ 4 % par rapport à une rotation de deux espèces (**D'Acunto et al., 2018**).

L'objectif de cette thèse est analysé l'effet de la rotation des cultures avec quatre espèces (blé dur, triticales, lentille et pois fourrager) soumise à deux techniques de travail du sol, à savoir le semis direct et travail conventionnel, sur la biodiversité et la durabilité agricole en milieu semi-aride, qui est un environnement contraignant de faibles précipitations.

Ceci nous amène aux questions de recherche suivantes :

- Quels sont les effets de la succession des cultures soumises à un travail conventionnel ou en semis direct sur la diversité et la dynamique des mauvaises herbes ?
- La diversification des cultures par la rotation, qu'elle soit en semis direct ou en travail conventionnel a-t-elle des effets positifs sur la diversité des vers de terre et des champignons mycorhiziens à arbuscule dans la région semi-aride ?
- Existe-t-il des différences entre le semis direct et travail conventionnel concernant le profil hydrique, les propriétés physico-chimiques et la vie biologique du sol dans la zone semi-aride ?
- Quel est l'impact des cultures (céréales et légumineuses) introduites dans la rotation sur les caractéristiques physico-chimiques, le profil hydrique et la vie biologique du sol ?
- Quels sont les effets des précédents culturels sur la culture suivante, en termes hydrique et nutritionnels ?
- Quelles sont les conséquences de l'utilisation du semis direct et du travail conventionnel sur le rendement et la rentabilité économique du blé, du triticales, de la lentille et des pois fourrager ?
- L'introduction des légumineuses (alimentaires ou fourragères) dans un système de culture à base de céréales améliore-t-elle la résilience et la productivité de systèmes de culture ?

Egalement, plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ces différences entre les rotations de culture et la technologie de travail du sol :

- a. Le travail conventionnel associé à la diversification des cultures par la rotation augmente la diversité des mauvaises herbes et leur résistance aux conditions environnementales difficiles.
- b. La diversification des cultures réalisée en non-labour améliore la diversité des lombrics et des champignons mycorhiziens arbusculaires dans la zone semi-aride.
- c. En agriculture de conservation, le semis direct combiné à la rotation des cultures permet d'augmenter le taux de la matière organique, d'améliorer la disponibilité des nutriments et de maintenir l'état hydrique du sol, ce qui favorise la durabilité agricole dans la région semi-aride.
- d. L'agriculture de conservation, fondée sur le semis direct et la rotation des cultures augmente la productivité du système agricole, tout en améliorant la rentabilité économique des agriculteurs, surtout durant les années sèches en région semi-aride.

Cette thèse s'organise autour de deux parties, la première partie est une analyse bibliographique centrée sur l'importance de l'agriculture de conservation à base de semis direct et la rotation culturale, notamment en zone semi-aride d'Algérie, ainsi que les effets des pratiques d'agriculture traditionnelle et de conservation sur la biodiversité et la durabilité agricole.

La deuxième partie est expérimentale qui se divise en quatre chapitres :

Chapitre 1 : Dynamique des mauvaises herbes sous l'effet des pratiques culturales en zone semi-aride, cas de la région de Sétif. Cette étude a été menée à l'ITGC de Sétif durant trois campagnes successives (2016/17 ; 2017/18 et 2018/19).

Chapitre 2 : est porté sur l'effet de la rotation culturale dans le semis direct et le travail conventionnel sur la diversité des Champignons Mycorhiziens Arbusculaires (CMA) et des vers de terre dans la zone semi-aride de l'Est d'Algérie (Cas de Sétif).

Chapitre 3 : Impact du précédent cultural et les techniques de travail du sol sur les caractéristiques physico-chimiques du sol dans la région semi-aride de l'Est algérien, cas de la région de Sétif.

Chapitre 4 : Variabilité des rendements et de la rentabilité économique des cultures (blé, triticales, lentille et pois fourrager) en fonction du type de travail du sol et du précédent cultural en zone semi-aride d'Algérie.

Enfin, nous concluons par une synthèse des résultats obtenus et les recommandations issues de cette étude, avant de terminer par une conclusion générale.

Revue Bibliographique

Partie I : Revue bibliographique

Chapitre I : Aperçu sur l'agriculture conventionnelle (AT) et l'agriculture de conservation (AC)

I.1. Agriculture conventionnelle ou traditionnelle (AT)

I.1.1. Définition de l'agriculture conventionnelle :

L'agriculture conventionnelle est le système de culture qui s'est développé au cours des siècles et qui a été adapté grâce aux connaissances scientifiques (**Maxime, 2023**). L'agriculture conventionnelle résulte de l'intégration de la science, de la technologie et de la pratique dans un contexte historique déterminé, notamment dans les pays actuellement industrialisés et a progressivement été transplantée dans les pays moins industrialisés (**Murua & Laajimi; 1995**). L'objectif de l'agriculture conventionnelle est de maximiser la production des cultures sur une surface minimale ou avec un minimum de travail, afin de réduire les coûts au maximum (**Maxime, 2023**).

I.1.2. Pratiques de l'agriculture conventionnelle

Afin de maximiser les rendements des cultures, plusieurs techniques peuvent être utilisées.

I.1.2.1. Travail conventionnel

Le travail conventionnel (TC) est le résultat de trois étapes nécessaires à l'installation de la culture :

a. Labour : il consiste à retourner le sol à l'aide d'une charrue à soc ou à disque. Les objectifs de cette opération sont de répartir la fumure de fond, d'incorporer des amendements, de contrôler les adventices et d'enfouir les résidus de récolte (**Guerif, 1991**).

b. Façons superficielles : ce sont des travaux à faible profondeur, de 8 à 10 cm, qui permettent d'ameublir, d'émietter et de préparer un lit de semence apte à recevoir les grains.

c. Préparation du lit de semence : En général, la profondeur de travail ne dépasse pas les huit centimètres (**Clement-Grandcourt & Prats, 1971**). L'objectif de cette opération est d'obtenir un lit de semence capable d'assurer un bon contact entre le grain et le sol pour une bonne germination.

d. Limites de la gestion conventionnelle du sol

Le système traditionnel de gestion du sol est incapable de conserver l'eau de pluie et de contrôler les pertes d'eau ainsi que l'érosion du sol, ce qui entraîne une utilisation inefficace des précipitations (**Salem et al., 2021**).

Le travail intensif du sol (Travail conventionnel) favorise, d'une part, la recarbonation des terres fines des horizons superficiels ainsi que leur enrichissement en cailloux calcaire provenant des horizons profonds plus calcaires. D'autre part, il favorise la minéralisation rapide de la matière organique dans les horizons superficiels (**Lahmar, 1993**). Ce travail intensif du sol a modifié l'environnement du sol, détruit les agrégats du sol, épuisé le carbone organique, nécessité plus d'énergie et altéré l'activité microbienne, dégradant ainsi la santé du

sol (Naorem *et al.*, 2023). Selon Hamza & Anderson (2005), le passage répété des outils de travail conventionnel a entraîné une destruction permanente des agrégats du sol nouvellement formés.

Dans la technique de labour, les semences des mauvaises herbes sont enfouies à des profondeurs trop importantes pour les inhiber de germer. Cependant, cette action est contrebalancé par la remontée dans le lit de semence des graines des autres adventices dont le pouvoir germinatif est maintenu pendant plusieurs années dans le sol, renouvelant ainsi le stock semencier des mauvaises herbes.

I.1.2.2. Monoculture

La monoculture est un système de culture qui consiste à cultiver une seule espèce sur la même parcelle sur plusieurs années. la monoculture est pratiqué dans le but de maximiser le rendement, afin d'augmenter la productivité et d'assurer la sécurité alimentaire des populations, et d'accroître la rentabilité globale des agriculteurs. Cependant, la monoculture présente des limites et des effets néfastes à long terme.

La monoculture, en particulier la monoculture céréalière, provoque des changements indésirables dans les propriétés physiques du sol (Glab *et al.*, 2014). Par exemple, la monoculture de blé a entraîné une augmentation du pH du sol (8,033), principalement due à la minéralisation rapide des résidus, contrairement à un système de rotation des cultures qui libère des cations échangeables et élève le pH (Moghaddam *et al.*, 2011).

La monoculture a également causé d'importantes baisses de rendement. Par exemple, la monoculture de seigle et de maïs a entraîné une réduction de 30 % du rendement (Schmidt *et al.*, 2000), tandis que Woźniak (2019) a trouvé que la monoculture de blé a entraîné une diminution de rendement de 32 % par rapport au blé en rotation, principalement en raison d'une utilisation moins efficace de l'eau ou des nutriments (Lithourgidis *et al.*, 2006).

La monoculture est associée à une augmentation des populations de mauvaises herbes. Par exemple, la monoculture de blé a été associée à une forte augmentation de la population de ray-grass (Nteyi *et al.*, 2016). De plus, la monoculture a été liée à une importante réduction de la biomasse microbienne, Selon Campbell *et al.* (1991), comparativement à la succession des cultures, la monoculture de blé présente moins de 17 % de biomasse microbienne.

I.1.2.3. Jachère

Le système traditionnel de la jachère nue est la technique la plus ancienne dans laquelle la terre est laissée en repos (non cultivée) pendant un certain temps pour restaurer l'état nutritif et l'humidité du sol (Abhiram & Eswaran, 2022 ; Lenssen *et al.*, 2012). Le but de jachère est appliqué pour emmagasiner l'eau des précipitations durant la phase de jachère pour la culture de blé suivante et de contrôler les mauvaises herbes par le travail conventionnel du sol et l'utilisation des herbicides (Jachère chimique) (Lenssen *et al.*, 2012).

L'introduction de la jachère dans un système de culture a entraîné certains effets négatifs. D'après Fu *et al.* (2017), la jachère réduit le carbone organique du sol en augmentant la minéralisation de la matière organique, et cela est également dû à l'absence de culture et au retournement des résidus au sol par le travail conventionnel. Selon une étude

menée par **Lenssen et al. (2012)**, le travail conventionnel de la jachère a entraîné une diminution importante de la matière organique du sol, pouvant atteindre 50 % sur plusieurs années. La jachère a également causé une réduction de l'activité microbienne et une sensibilité accrue à l'érosion (**Campbell et al., 1991**). D'après **Sainju et al. (2007)**, l'augmentation de la période de jachère accroître la perte d'azote sous la zone racinaire en raison du lessivage et l'absence de culture pour piéger l'azote.

I.1.3. Limites de l'agriculture conventionnelle

D'après **Papy & Goldringer (2011)**, l'agriculture conventionnelle présente les limites suivantes : La qualité de l'eau et du sol a souvent été dégradée. Le bilan de gaz à effet de serre de l'agriculture conventionnelle est défavorable, en raison de la consommation directe d'énergie fossile et de la fertilisation azotée. Une forte fertilisation minérale réduit les symbioses bactériennes ou mycorhiziennes, et par conséquent, les capacités naturelles de fixation de l'azote et de biodisponibilité des éléments minéraux. Les insecticides ont souvent des effets néfastes directs sur les auxiliaires, notamment les pollinisateurs, ainsi que sur les vers de terre et les arthropodes du sol. La réduction de la biodiversité inter et intra-spécifique (tendance à la monoculture, variétés fixées) entraîne des populations de bio-agresseurs résistants aux pesticides et virulents pour les plantes cultivées.

Ainsi, la recherche est axée sur des techniques agricoles qui permettent d'atténuer les effets négatifs de l'agriculture conventionnelle. C'est dans ce cadre qu'est apparue l'agriculture de conservation.

I.2. Agriculture de conservation (AC)

Selon **Ghosh et al. (2022)** ; **Francaviglia et al. (2023)**, l'agriculture de conservation repose sur trois principes : 1) Perturbation mécanique minimale du sol (travail réduit du sol) ou absence de travail du sol (semis direct), 2) Couverture permanente du sol par la rétention des résidus de culture ou par des cultures de couverture, 3) Diversification des cultures par des rotations impliquant au moins trois espèces.

Grâce à ces trois principes, l'AC a permis de maintenir et d'améliorer la fertilité du sol, la biodiversité, les processus biologiques, et d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau et des nutriments, tout en assurant une productivité agricole plus élevée (**Figure 01**).

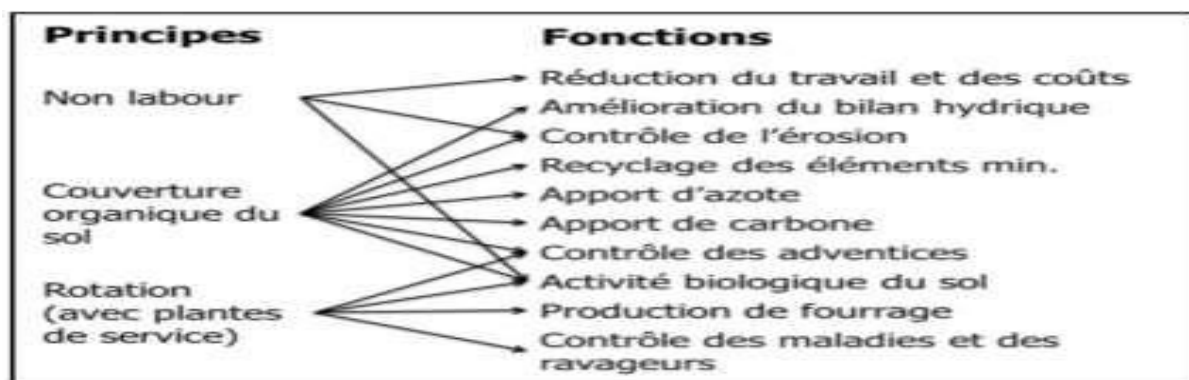


Figure 01 : Fonctions d'intérêt des trois principes définissant l'AC pour l'agriculteur et l'environnement (**Naudin et al., 2015**).

I.2.1. Travail de conservation du sol (TCS)

Le travail de conservation du sol (TCS) est un processus visant à préserver le sol et les ressources en eau en réduisant la fréquence des travaux conventionnels sur le terrain, avec une couverture de 30 % ou plus de résidus de culture précédente (**Parida et al., 2023**). Le système de travail de conservation du sol offre une meilleure protection de la couche arable, une plus grande teneur en eau, ainsi qu'une diminution de la température du sol par rapport au travail conventionnel. De plus, l'augmentation de la quantité de résidus de couverture améliore la biodiversité et la santé du sol (**Kovács et al., 2023**).

Il existe différents types de travail de conservation : le *travail du sol par paillage* (*Mulch tillage*), le travail du sol en bandes ou par zone (*Strip or zonal tillage*), le travail du sol sur billons (*Ridge till*), le travail réduit et minimal du sol, ainsi que le semis direct. Dans ce cas, nous nous intéressons au semis direct.

Semis direct (Non labour) : le semis direct (SD) est une technique de gestion du sol utilisant un semoir spécifique sur une terre qui n'a pas été préparée pour le lit de semence ni débarrassée des résidus de récolte (**Ben-Salem et al., 2006**). Le semis direct est également appelé non-labour, zéro labour (zéro travail du sol) ou fente labour (**Mrabet et al., 2012**). Selon **Han et al. (2023)**, le système de non labour a augmenté la teneur en azote (N), en phosphore (P) et en carbone organique, tout en renforçant l'activité enzymatique et la biomasse microbienne dans le sol. De plus, la conservation des résidus de culture dans la technique de semis direct joue un rôle d'isolant qui empêche l'évaporation de l'eau du sol, permettant ainsi de retenir l'humidité (**Shahrinezhad et al., 2015**).

I.2.2. Couverture permanente du sol par la rétention des résidus de culture : la présence de résidus végétaux forme une couche dense protectrice qui empêche l'évaporation de l'humidité du sol et réduit l'érosion (**Semenikhina et al., 2021**). Selon **Moussadek et al. (2011)**, la présence de résidus favorise l'infiltration en freinant le déplacement de l'eau à la surface du sol, ce qui réduit le ruissellement et pertes de sol de plus de 50 % sous semis direct avec rétention des résidus, par rapport au SD sans résidus et au travail du sol conventionnel.

I.2.3. Rotation des cultures

I.2.3.1. Définition

La rotation culturale ou la succession des cultures est une pratique agricole reconnue depuis longtemps. Cette pratique consiste à alterner différentes cultures sur une même parcelle ou un même champ selon un modèle planifié sur plusieurs années (**De Haan, 1997 ; Francis, 2009 ; Rand, 2013**). D'après **Coleman (2018)**, ces différentes cultures ne doivent pas être liées botaniquement ; idéalement, elles n'exigent pas les mêmes nutriments du sol et ne partagent pas les mêmes maladies ou insectes nuisibles.

La rotation culturale a des dimensions à la fois temporelle et spatiale (**Nabudere, 2013**). L'aspect temporel concerne l'ordre spécifique dans lequel les cultures sont cultivées au fil du temps (succession des cultures dans le temps), tandis que l'aspect spatial se réfère à la répartition des cultures dans l'espace disponible (**Taji & Reganold, 2006**).

I.2.3.2. Principes de la rotation culturale

Pour mettre en place une succession culturale, il faut s'appuyer sur quelques principes de base. Selon **Pousset (2008)**, le choix des espèces doit être effectué en fonction du couple sol-climat, l'introduction de légumineuses dans la rotation est nécessaire, et il faut varier les familles botaniques. En plus de ces trois principes, **Viaux (1999)** et **Moronval (2014)** ont cité d'autres principes supplémentaires : avoir au moins un tiers de céréale à paille, introduire au moins tous les trois ans une inter-culture longue (par exemple, une culture de printemps), faire suivre les légumineuses annuelles par des cultures d'hiver exigeantes en azote ou, à défaut, par une culture intermédiaire, et alterner les cultures exigeantes en NPK avec des cultures peu exigeantes en ces éléments.

I.2.3.3. Types de la succession des cultures

D'après **Brankaschak (2018)**, il existe deux types de succession culturale : une rotation longue (complexe) et une rotation courte (simple).

- **La rotation complexe** : c'est une succession de plusieurs cultures sur un cycle de cinq années ou plus (**Unger, 1989**). Dans la rotation longue, il faut intégrer des espèces diverses aux atouts variés, telles que les crucifères, les légumineuses, les plantes sarclées et les céréales (**Cerf, 1994**).

- **La rotation courte** : c'est la succession de deux ou trois cultures, c'est-à-dire cultiver une culture donnée sur deux ou trois ans (**Karlen et al., 1994 a**), comme dans les successions blé/jachère, blé/lentille, blé/soja, ...

I.2.3.4. Avantages de la rotation

La rotation des cultures est une pratique agricole aux multiples avantages économiques et environnementaux. La rotation culturale augmente le taux de la matière organique du sol, améliorant ainsi sa structure et sa santé (**Selim, 2019**). Elle contribue à maximiser le rendement de la production par unité de surface (**Selim, 2019**). C'est un moyen efficace de lutter contre les mauvaises herbes (**Koul & Cuperus, 2007**). D'après **Lamine & Bellon (2009)** ainsi que **Chauvel et al. (2018)**, la diversification de la succession culturale permet de mieux maîtriser les flores adventices. La rotation des cultures perturbe la reproduction des insectes et des pathogènes, affectant ainsi leur cycle de vie (**Shah et al., 2021**). Par conséquent, la succession des cultures est une pratique écologique visant à réduire l'utilisation des pesticides. La diversification des cultures par la succession culturale favorise la conservation de l'eau dans le sol, améliore la stabilité des agrégats et l'activité enzymatique du sol (**Shah et al., 2021**). Elle aide également à réduire les impacts des gouttes de pluie sur le sol, diminuant ainsi l'érosion par éclaboussures et par ruissellement, car les parties souterraines des plantes, principalement les racines, retiennent la couche supérieure du sol (**Angon et al., 2023**).

I.2.3.5. Importance des céréales dans la rotation

Les céréales d'hiver sont les cultures céréalières les plus importantes. Les graminées possèdent un système racinaire vigoureux, dense et bien réparti, produisant une grande quantité d'exsudats dans le sol, notamment de la lignine. La lignine augmente la teneur en

acides carboxyliques et en acides humiques dans le substrat du sol, améliorant ainsi la stabilité des agrégats et la structure du sol (**Silva et al., 2020**).

L'introduction des céréales tolérantes à la sécheresse, comme le triticales, l'orge et l'avoine, dans la succession des cultures durant les années sèches peut favoriser une concurrence continue avec les mauvaises herbes tolérantes à la sécheresse (**Gurusinghe et al., 2022**).

I.2.3.5.1. Blé

Le blé est l'une des cultures les plus importantes pour la sécurité alimentaire. Il fournit 55 % de la nourriture de la population mondiale en contribuant à 20 % des calories alimentaires et occupe une position unique pour la préparation d'un large éventail d'aliments (**Kumar et al., 2021**).

L'inclusion de la culture de blé dans une rotation culturale peut aider à la gestion des mauvaises herbes grâce à son fort potentiel allélopathique (**Hetta et al., 2022**). D'après **Simão et al. (2024)**, les exsudats racinaires produits par les plantes de blé, ainsi que ceux issus de l'interaction des résidus de blé avec la culture suivante, ont été impliqués comme mécanisme de suppression des maladies. De plus, l'introduction de la culture de blé dans le schéma de rotation a considérablement réduit la perte d'eau par percolation profonde (**Salado-Navarro & Sinclair, 2009**).

L'introduction du blé dans les rotations culturales réduit les pertes d'azote, les émissions de gaz à effet de serre, l'acidification des sols, les coûts de production et la variabilité des rendements économiques (**Simão et al., 2024**).

I.2.3.5.2. Triticales

Le triticales est une céréale artificielle obtenue par le croisement entre le blé et le seigle. C'est une culture à double fin, principalement utilisée pour la production de fourrage destiné à l'alimentation du bétail, tandis que ses grains peuvent également être utilisés pour l'alimentation humaine, sous forme de farine mélangée avec de la farine de blé (**Lecona-Garcia et al., 2021**). Le triticales possède une bonne valeur protéique et énergétique, en faisant une excellente source d'alimentation pour les animaux (**Gerdzhikova, 2014**).

Le triticales a un système racinaire fibreux robuste et une grande capacité à croître efficacement dans les sols pauvres (**Ramdan et al., 2023**). La performance élevée des racines de triticales pourrait augmenter l'absorption des nutriments du sol, réduisant ainsi les besoins en engrais et limitant la contamination des eaux par les nitrates dans les sols agricoles (**Barati et al., 2021**). L'utilisation efficace de l'azote par la culture de triticales en fait une culture idéale à cultiver après une culture ayant laissé une quantité importante d'azote dans le sol (**Ayalew et al., 2018**). Le port vigoureux du triticales, son feuillage dense et sa longue hauteur lui permettent de concurrencer les mauvaises herbes (**Mergoum et al., 2019**). Le triticales utilise peu d'eau comparativement au blé. Sur une rotation de trois ans, le blé a consommé en moyenne de 5 mm d'eau en plus que le triticales (**Schilinger & Archer, 2020**). Selon **Glaž et al. (2013)**, l'introduction de la culture de triticales dans la succession des cultures a augmenté le volume des pores de stockage d'eau dans le sol jusqu'à environ $0,27 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

Dans la rotation des cultures, l'utilisation des plantes à forte accumulation de potassium, comme le triticale, maintient cet élément nutritif dans le système sol-plante et évite sa perte par lessivage (**Rosolem & Calonego, 2013**). D'après **You et al. (2022)**, le remplacement de la jachère par le triticale fourrager a augmenté le revenu net du système de 10.162 USD/ ha, tout en améliorant l'efficacité de l'utilisation de l'eau de 30 % et a fourni une quantité substantielle de fourrage, en moyenne de 9,8 t/ ha par an.

L'introduction de céréales à double fin, comme le triticale et l'orge, dans une rotation culturale a été efficace pour supprimer les propagules des adventices (**Gurusinghe et al., 2022**). De plus, le triticale étant une plante allélopathique, ses racines et sa paille secrètent des substrats allélochimique, ce qui lui permet de jouer un rôle potentiel dans la lutte contre les adventices (**Saxena et al., 2016**).

I.2.3.6. Importance des légumineuses dans la rotation

Les fabacées s'enracinent profondément, contribuant ainsi au cycle des nutriments et à une meilleure utilisation de l'eau par les plantes cultivées successivement (**Prusinski et al., 2016**). Selon **Rani et al. (2022)**, les légumineuses ont une grande capacité de rétention d'eau.

D'après **Rani et al. (2022)**, l'introduction des légumineuses dans un système de culture a amélioré le pH du sol, facilitant l'utilisation des éléments nutritifs par les plantes tel que carbone, l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium, le magnésium et le soufre, et a créé un environnement favorable à la croissance des plantes suivantes. Les légumineuses contribuent à 0,195 g d'azote/an dans le système agricole grâce à la fixation symbiotique de l'azote (**Meena et al., 2022**). Selon **Gerdzhikova et al. (2017)**, après un précédent légumineux, le taux d'utilisation de l'azote est supérieur de 18,7 % pour la culture de triticale. D'après **Jena et al. (2022)**, les légumineuses sont capables de solubiliser le phosphore indisponible, rendant accessible pour la culture suivante grâce aux exsudats d'acides organiques issus de leur système racinaire (**Figure 02**).

L'inclusion à long terme des légumineuses dans le système de culture a augmenté le carbone organique et la biomasse microbienne du sol (**Nath et al., 2023**). De plus, les légumineuses libèrent de nombreux exsudats racinaires, tels que des acides organiques, qui agissent comme liants et réduisent l'érosion du sol en améliorant la stabilité des agrégats (**Sánchez-Navarro et al., 2019**) (**Figure 02**).

L'introduction des légumineuses dans un système de culture dominé par les céréales entraîne une réduction de l'apparition des maladies et des mauvaises herbes (**Ruissi et al., 2012**), ce qui joue un rôle primordiale dans la réduction de la demande d'herbicide et le maintien de la durabilité écologique (**Pradhan et al., 2022**).

I.2.3.6.1. Lentille

La plante de la lentille appartient à la famille des fabacées. Son système racinaire est pivotante et peut atteindre une profondeur d'environ 30 cm, ce qui en fait une culture modérément tolérante aux températures élevées et à la sécheresse (**Ramesh et al., 2021**).

La lentille joue un rôle clé dans l'amélioration et le maintien de la productivité des sols grâce à la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique et à la solubilisation du

phosphore en association avec les mycorhizes (**Rakesh & Mehera, 2022**). La présence de la lentille comme culture précédente améliore la perméabilité du sol par rapport à celle du blé (**Mekhlouf et al., 2019**). Les parcelles de lentilles conservent une grande humidité du sol, ce qui augmente l'approvisionnement en eau pour la culture de blé suivante (**Pala et al., 2000**). La lentille est un excellent précédent pour le blé comparativement à la jachère. A Ankara, en Turkey, le remplacement de la jachère nue par la culture de lentille a permis d'obtenir un rendement en grains élevé de blé (**Abhiram & Eeswaran, 2022**).

N.B Il est recommandé d'introduire la culture de lentille une fois tous les trois ans pour réduire l'inoculum des maladies. Il est donc nécessaire d'intégrer deux cultures non hôtes dans la rotation culturale (**Lafond et al., 2011**).

I.2.3.6.2. Pois fourrager

Le pois fourrager est une légumineuse fourragère annuelle intéressante pour la production de fourrage destiné aux ruminants. Il peut être cultivé seul (culture pure) ou en association avec les céréales comme le triticale ou l'orge (peuplement plurispécifique). Selon **Benbrahim & Gaboun (2008)**, le pois fourrager peut être utilisé en foin (16 % MAT), en ensilage (18 % MAT) ou en grains (25 % MAT) comme source de protéines dans une ration alimentaire à base de céréales.

L'inclusion du pois dans la rotation des cultures favorise une fixation de l'azote atmosphérique bien supérieure à celle de la lentille et du pois chiche (**Liu et al., 2023**). D'après **Wysokinski et al. (2021)**, l'azote provenant des résidus de pois était très disponible pour la culture de triticale en tant que culture suivante. De plus, l'insertion du pois entre deux cultures de blé permet de réduire de 10,5 % la consommation d'énergie non renouvelable, et cette succession culturale pourrait réduire de 20 % les émissions de N_2O sur trois ans (**Carrouée et al., 2012**). Selon **Pala & Mennan (2020)**, la culture de pois fourrager est une culture nettoiyante et concurrentielle contre les mauvaises herbes.

NB. Une rotation sans légumineuses est considérée comme incomplète (**Jena et al., 2022**).

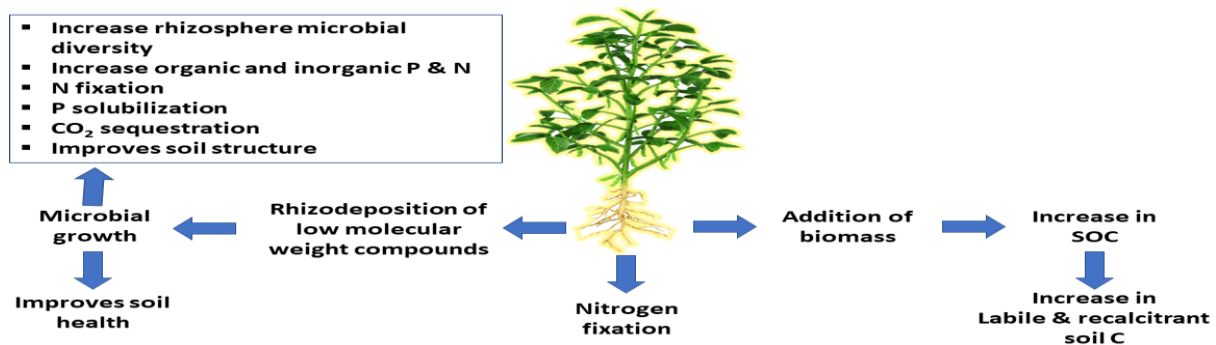


Figure 02 : Effet biologique des légumineuses dans un système de culture (**Jena et al., 2022**)

I.2.3.7. Inconvénients et recommandation

Les conditions pédoclimatiques locales (par exemple, les précipitations et la texture du sol) peuvent limiter la culture de certaines plantes dans des environnements spécifiques. Les opportunités de marché pour chaque culture incluse dans le programme de diversification doivent également être prises en compte (**Francaviglia et al., 2023**). Comme nous l'avons

déjà mentionné, les céréales (par exemple le blé) ont des besoins élevés en azote. Par conséquent, l'inclusion de légumineuses fixatrices de N_2 dans les rotations planifiées peut à la fois augmenter les rendements céréaliers et limiter les pertes d'azote par les émissions de N_2O et à la lixiviation (**Plaza-Bonilla et al., 2017**).

Les cultures adoptées dans le cadre de la diversification devraient être celles qui sont déjà cultivées localement en tant que monocultures, car il a été prouvé qu'elles sont adaptées aux conditions pédologiques et climatiques et qu'elles offrent de bons rendements (**Francaviglia et al., 2023**).

Pour que la rotation des cultures améliore l'efficacité de l'utilisation de l'eau, la succession culturale doit inclure une culture à faible consommation d'eau après une culture à forte demande en eau, en particulier dans les années où la recharge en eau du sol est faible (**Liu et al., 2022**).

Il est également essentiel de prendre en considération la compatibilité des cultures lors de la planification de la succession culturale. Certaines cultures peuvent avoir des interactions bénéfiques et améliorer le rendement, tandis que d'autres peuvent avoir des effets néfastes sur les cultures suivantes. Par exemple, il a été constaté que le blé cultivé après orge avait un rendement inférieur de 15 % à celui du blé cultivé après les pois ou le colza (**St-Martin et al., 2017**). **Mouelhi et al. (2016)** ont trouvé que la culture précédente d'orge n'améliore pas la population des champignons mycorhiziens dans le sol, ce qui explique les faibles rendements de blé dur. De plus, de nombreuses espèces suivant les espèces de la famille des Brassicacées affichent également des rendements faibles. Selon **Simão et al. (2024)**, l'utilisation des cultures compatibles dans la rotation des cultures permet de répartir l'utilisation des ressources entre les saisons et présente des différences de demande en eau et de profondeur d'enracinement, avec des périodes adéquates entre la récolte et la plantation pour optimiser l'accumulation d'eau dans le sol et la fixation d'azote.

I.2.3.8. Rotation des cultures en semis direct et en travail conventionnel

La densité moyenne des mauvaises herbes dans les rotations culturales en semis direct parut inférieure à celles menées en travail conventionnel (**Anderson, 2005 ; Weisberger et al., 2019**). Le plan de rotation des cultures contribue à réduire la densité des mauvaises herbes, effet qui est renforcé par l'utilisation de la technique de semis direct (**Koocheki et al., 2009**). **Ulber et al. (2009)** ont montré que la rotation des cultures en travail conventionnel du sol contribue à accroître la richesse des espèces d'adventices à long terme lorsque les niveaux d'intrants sont réduits (sans engrais et pesticides).

L'humidité du sol après la récolte de la culture de la lentille dans une succession des cultures est élevée dans les parcelles de semis direct (16,22 %) par rapport à celles de TC (14,97 %) (**Bouchenafa et al., 2014**). **Ouhemi et al. (2023)** ont trouvé que le pH du sol après la culture de lentille en rotation avec le blé est légèrement inférieur en semis direct (8,47) par rapport au travail conventionnel (8,50), ce qui influence la disponibilité des nutriments, qui seront plus disponibles en semis direct.

La rotation diversifiée des cultures a amélioré le rendement du blé de 30 % en semis direct contre 13 % en travail conventionnel par rapport à la monoculture de blé. Par

conséquent, une rotation diversifiée des cultures a augmenté le rendement du blé lorsqu'elle est combinée avec la technique de semis direct (**Jalli et al., 2021**).

La diversification des cultures par la rotation culturale, combinée à la technique de non-labour, a augmenté la stabilité des agrégats, la porosité et conductivité hydraulique. En revanche, la rotation des cultures associée au travail conventionnel du sol n'a pas amélioré ces caractéristiques (**Iheshiulo et al., 2023**). **Woźniak & Soroka (2018)** ont trouvé que la teneur en carbone organique des rotations pois/blé/blé et pois/orge/blé est supérieure de 15,3 % en semis direct par rapport au travail conventionnel. La rotation incluant des légumineuses conduite en semis direct présente une teneur élevée en phosphore 28 % par rapport au travail conventionnel, qui affiche une moyenne de 11 % (**Mouelhi et al., 2016**). En rotation lentille/blé avec la technique de semis direct, la stabilité des agrégats, la concentration en glomaline et des champignons basidiomycètes étaient plus élevées que dans le travail conventionnel (**Caesar-TonThat et al., 2010**). De plus, en semis direct, le taux de colonisation total mycorhizien chez les racines de blé dur précédées de légumineuses était plus élevé à celui en travail conventionnel (**Mouelhi et al., 2016**).

I.3. Importance de l'agriculture de conservation en zone semi-aride et aride

Les zones semi-arides représentent 85 % des terres agricoles en Algérie (**Bessaoud et al., 2019**). D'après **Benniou et al. (2014)**, il existe trois étages semi-arides : le semi-aride supérieur (SAS), qui reçoit entre 400- 500 mm/ an, le semi-aride central (SAC), qui reçoit entre 300 et 400 mm/ an et le semi-aride inférieur (SAI), qui reçoit entre 200 et 300 mm/ an. les zones semi-arides sont caractérisées par une rareté de l'eau liée à des précipitations généralement faibles, dont la quantité varie considérablement d'une année à l'autre (**Sommer et al., 2012**). Les sols de la zone semi-aride (exemple des hautes plaines sétifiennes) sont des sols calcaire, de moyenne à faible fertilité, et sensible à l'érosion (**Rouabhi et al., 2018**). Dans cette zone, le froid hivernal limite la croissance au moment où l'eau est disponible et allonge le cycle de la plante, la rendant ainsi plus exposée à la sécheresse au début de l'été (**Bouzerzour et al., 2006**). D'autres aléas, tels que les gelées tardives et le sirocco, peuvent survenir et coïncider avec les phases physiologiques critiques des cultures (**Benniou et al., 2014**). De plus, les activités humaines, comme les pratiques agricoles traditionnelles qui ressemblent au travail conventionnel du sol et le système binaire «jachère/ céréale ou céréale monoculture», sont inadaptées à la région semi-aride et causent une forte dégradation des écosystèmes, notamment les sols (diminution de la biodiversité, baisse de la teneur en matière organique, diminution de la fertilité du sol, érosion hydrique et éolienne), ce qui affecte négativement le rendement des cultures tant sur le plant quantitatif et qualitatif (**Benniou et al., 2016**).

Dans les conditions semi-arides, l'agriculture pluviale doit être entourée par des pratiques de gestion agricole adoptées au sol, au climat et aux cultures (**Chennafi & Saci, 2012**). Ainsi, l'adoption de l'agriculture de conservation apparaît comme une solution prometteuse et une alternative à l'agriculture traditionnelle en zone semi-aride. Cette adoption a permis d'augmenter le rendement en grains de 20 %, le rendement en paille de 8 %, d'améliorer la teneur en carbone organique de 7 %, le phosphore de 6 % et le potassium de 4 %, tout en augmentant l'efficacité d'utilisation des précipitations de 13 %, en améliorant

l'humidité du sol de 14 %, et en augmentant le revenu de 19 % par rapport à l'agriculture conventionnelle (**Devkota et al., 2022**).

D'après **Pittelkow et al. (2015)**, la technique du semis direct a donné des rendements en grains égaux ou supérieurs au travail conventionnel dans les climats secs, où les ressources en eau sont limitées. En effet, dans des conditions de sécheresse, le système de semis direct augmente la disponibilité en eau, ce qui améliore l'activité photosynthétique et, par conséquent augmente le rendement des cultures par rapport au travail conventionnel (**Wu & Bao, 2011**). Les résultats obtenus par **Boeni et al. (2014)** montrent également que le semis direct améliore la capacité d'apport en éléments nutritifs du sol, l'infiltration d'eau et le stockage de l'eau par rapport au travail conventionnel. **Toth et al. (2024)** ont trouvé que le travail de conservation du sol a amélioré la stabilité des agrégats, qui est probablement grâce à la couverture protectrice, à la perturbation réduite du sol et à une activité microbienne accrue, ce qui réduit l'érosion du sol.

La rotation des cultures est une pratique encouragée en raison des changements climatiques et des risques d'érosion dans les zones semi-arides. En effet, la rotation des cultures augmente le niveau de matière organique du sol, ce qui améliore la qualité du sol et réduit sa dégradation. Elle augmente également la disponibilité des nutriments comme l'azote et le phosphore, et améliore l'efficacité d'utilisation des eaux de pluie (**Selim, 2019**). De plus, le remplacement de la jachère par une culture de légumineuses alimentaires ou fourragères dans le système blé-jachère peut être une stratégie pour la séquestration du carbone, la conservation des sols et l'amélioration des propriétés physico-chimiques des sols, tout en soutenant la productivité agricole dans les zones semi-arides (**Blanco-Canqui et al., 2013**).

I.4. Effet de l'agriculture conventionnelle et de conservation sur la sécurité alimentaire

Le travail conventionnel du sol dans la zone semi-aride a entraîné une dégradation du sol par l'érosion et la perte de fertilité, causant une réduction importante du rendement (**Yuan et al., 2023**). Le rendement du blé en monoculture a été réduit par 20 % (**Bouatrous et al., 2022**). Les grains de blé issus d'un système de monoculture présentent une teneur en gluten plus faible, une uniformité moindre et contiennent plus de cendre totales que les grains de blé provenant de la rotation culturale (**Woźniak, 2019**), ce qui nuit à la sécurité alimentaire.

L'agriculture de conservation a été recommandée comme option pour atténuer l'impact du changement climatique lors de la pratique conventionnelle afin d'assurer la durabilité et la sécurité alimentaire (**Chaieb et al., 2021**). D'après **Ren et al. (2023)**, la pratique de l'agriculture de conservation a été associée à une augmentation du rendement moyen global de 12 %. Les rendements des cultures d'orge, de blé, de pois chiche et de lentilles étaient respectivement de 8 %, 43 %, 19 % et 11 % supérieurs en agriculture de conservation par rapport à l'agriculture traditionnelle (**Devkota et al., 2022**).

L'adoption du semis direct contribue à atténuer les effets négatifs du manque d'eau et, par conséquent a un effet bénéfique sur le rendement des cultures. Selon **Schlegel et al. (2018)**, le rendement du blé était 31 % plus élevé par rapport au travail conventionnel. D'après **De Cárcer et al. (2019)**, le rendement de blé était de 16 % plus élevé dans la rotation des cultures que dans la monoculture de blé. Selon **Devkota et al. (2022)**, l'inclusion de

légumineuses dans un système de rotation améliore la stabilité du rendement de blé et réduit les pertes de rendement par rapport à la monoculture céréalière, en particulier durant les années sèches. Les légumineuses, en tant que précédents culturels, ont un impact positif sur la qualité des produits récoltés des céréales. Les grains de céréales précédés par une légumineuse contiennent moins de mycotoxines et leur teneur en azote est améliorée (**Voisin et al., 2015**). D'après **Fan et al. (2020)**, la teneur en protéines du blé dans la rotation blé/légumineuses était de 4 à 8 % plus élevée que dans la monoculture de blé.

Les céréales constituent l'aliment de base et la principale source d'énergie, mais l'ajout des légumineuses fournit une alimentation équilibrée. Les légumineuses ont également un effet hypocholestérolémique, c'est-à-dire qu'elles contribuent à abaisser le cholestérol sanguin (**Rakesh & Mehera, 2022**). De plus, sur le plan nutritionnel, les légumineuses présentent une teneur élevée en protéines et sont riches en acide aminé lysine ainsi qu'en acides aminés soufrés comme la méthionine, qui sont tous deux rares dans la plupart des autres végétaux (**Martin-Cabrejas, 2019**).

I.5. Rentabilité économique entre l'agriculture conventionnelle et de conservation

Le coût de la production d'une culture sous la gestion conventionnelle du sol était plus élevé par rapport au semis direct. La raison est le nombre d'opérations culturales élevé, principalement du labour au lit de semence (**Tiwari & Kewat, 2010**). Le coût de mécanisation est de 26 % en travail conventionnel et de 13 % en au travail minimum comparés au semis direct. Le coût de combustibles est en moyenne de 54 % et 40 % élevé en travail conventionnel et travail minimum par rapport au semis direct. Le coût de production totale est en moyenne de 11 % et 6 % plus élevé en travail conventionnel et qu'en semis direct (**Cordeau et al., 2020**).

En zone semi-aride d'Algérie, le système de culture généralement adopté est blé/jachère non cultivée, où le sol est labouré au printemps et laissée au repos jusqu'à l'automne, puis retravaillée et ensemencée, cette procédure a augmenté le coût des machines dans le travail conventionnel à 111,67 dollars/ ha contre 79,02 dollars/ ha en technique de semis direct (**Rouabhi et al., 2019**). De plus, la monoculture céréalière a produit des rendements plus faibles, plus vulnérables aux fluctuations des précipitations, contenait des adventices, coûtait plus cher à produire et fournissait le rendement net le plus faible par rapport au coût total (**Bewick et al., 2008**). Ainsi, la rentabilité d'une culture de blé après blé est faible et négative (**Ercoli et al., 2016**).

Le revenu brut par hectare pour le système de semis direct est de 990,38 dollars nettement supérieur au revenu brut pour le système de travail conventionnel qui est de 941,50 dollars/ ha (**Rouabhi et al., 2019**).

La diversification des cultures par la rotation culturale a une grande influence sur la rentabilité économique. D'après **Helmers et al. (2001)**, trois façons distinctes de réduire le risque économique grâce à la rotation des cultures ont été identifiées : (i) la diversification, où les faibles rendements d'une culture sont compensés par des rendements relativement élevés d'une autre; (ii) la variabilité des rendements des rotations par rapport aux cultures continues ; et (iii) des rendements globaux plus élevés des cultures et une réduction des coûts de

production des rotations. De plus, **Muhie (2022)** a montré qu'avec la diversification des cultures par la rotation, le risque de perte dû à la défaillance d'un type de culture peut être minimisé, car les agriculteurs ont d'autres sources de revenus.

Chapitre II : Biodiversité agricole

II.1. Définition de la biodiversité (la diversité biologique)

Selon **Hance et al. (2010)**, la convention de Rio de Janeiro (1992) a donné une définition très large de la biodiversité. Il est dit que « la biodiversité est la variabilité des organismes vivants de toute origine, y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques, ainsi que les complexes écologiques dont ils font partie. Cela comprend la diversité au sein des espèces et entre espèces, ainsi que celle des écosystèmes ». D'après **Vandermeer & Perfecto (1995)**, La biodiversité désigne toutes les espèces de plantes, d'animaux et de micro-organismes qui existent et interagissent au sein d'un écosystème.

Selon **Le Roux et al. (2008)**, la biodiversité englobe trois niveaux d'organisation du vivant : (i) La diversité écologique (la diversité des écosystèmes), (ii) La diversité spécifique (la diversité des espèces ou interspécifique) et (iii) La diversité génétique ou intra-spécifique.

D'après **Clergue et al. (2005)**, la biodiversité est divisée en trois parties : (a) **La biodiversité agricole** (la définition ci-dessous), (b) **La biodiversité para-agricole (biodiversité fonctionnelle)** : il s'agit de la diversité de vie indirectement utilisée pour la production agricole, comme la faune du sol, la faune auxiliaire, les pollinisateurs, la diversité des plantes des prairies et, plus généralement, les services éco-systémiques. Et (c) **La biodiversité extra-agricole** : elle représente la biodiversité dans les zones de production qui ne contribuent pas à la production agricole.

II.2. Définition de la biodiversité agricole ou l'agro-biodiversité

D'après **Le Roux et al. (2008)**, la cinquième conférence des parties de la convention sur la diversité biologique a donné la définition suivante de la biodiversité agricole : « l'expression diversité biologique agricole désigne de façon générale tous les éléments constitutifs de la diversité biologique qui relèvent de l'alimentation et de l'agriculture, ainsi que tous les composants de la diversité biologique qui constituent l'agro-écosystème : la variété et la variabilité des animaux, des plantes et des microorganismes aux niveaux génétique, spécifique, et écosystémique, nécessaires au maintien des fonctions clés de l'agro-écosystème, de ses structures et de ses processus ». En résumé, la biodiversité agricole englobe, toutes les composantes de la biodiversité aux niveaux génétique, spécifique et écosystémiques qui sont pertinentes pour l'alimentation et l'agriculture, et qui soutiennent les écosystèmes dans lesquels l'agriculture se déroule (**Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique, 2008**).

D'après **Burel et al. (2008)**, La biodiversité dans un espace agricole peut être décomposée en : i) **La diversité alpha** : qui est la richesse en espèces au sein d'un agro-écosystème (une parcelle, par exemple), ii) **La diversité bêta** : qui reflète la variation de la

diversité alpha entre habitats/ écosystèmes. Et **iii) La diversité gamma** : qui correspond à la richesse en espèces à l'échelle d'analyse (paysage, région ou pays, par exemple).

Therond & Duru (2019) ont montré qu'en sens large, il existe deux types de biodiversité en interaction avec l'écosystème agricole : **(1) La biodiversité planifiée (Biodiversité contrôlée)** intentionnellement intégrée et gérée par l'agriculture, c'est-à-dire les espèces animales domestiques et végétales implantées. **(2) La biodiversité associée** composée des organismes animaux et végétaux sauvages, plus ou moins volontairement gérés par l'agriculture (Ex : adventices, faune sauvage, ainsi que faune et microbes du sol).

II.3. Importance de la biodiversité agricole

D'après **FAO (2005)**, la biodiversité agricole peut jouer des multiples rôles : augmenter la productivité, la sécurité alimentaire et la rentabilité. Réduire la pression de l'agriculture dans les zones fragiles, les forêts et sur les espèces en danger. Rendre les systèmes de production agricole plus stables, plus robustes et plus durables. Contribuer à la lutte raisonnée contre les ravageurs et les maladies. Préserver les sols et en augmenter la fertilité naturelle ainsi que leur santé. Contribuer à une intensification durable. Diversifier les produits et les possibilités de revenus. Réduire, voire partager les risques entre particuliers ou entre nations. Aider à maximiser une utilisation efficace des ressources et de l'environnement. Réduire la dépendance à l'égard des apports extérieurs. Et améliorer la nutrition humaine et fournir des approvisionnements en médicaments et en vitamines, tout en protégeant la structure de l'écosystème et la stabilité de la diversité des espèces.

II.4. Effet de l'agriculture conventionnelle (moderne) et l'agriculture de conservation sur l'agro-biodiversité

II.4.1. Effet de l'agriculture conventionnelle sur l'agro-biodiversité

D'après **Ammann & Garden (2003)**, les pratiques de l'agriculture conventionnelle entraînent la dégradation du sol en provoquant l'érosion, en réduisant sa qualité et en nuisant à la diversité biologique. Le labour a un effet négatif sur la richesse spécifique ou l'abondance de nombreux organismes. L'abondance des organismes de la macrofaune du sol, en particulier les vers de terre, est fortement réduite par le travail conventionnel (**Burel et al., 2008**). Les opérations de labour intensif nuisent en particulier aux espèces de vers de terre plus grandes, directement et indirectement, en détruisant leur système de canaux et en travaillant dans les résidus végétaux. Dans des essais de 10 ans, les populations de lombrics dans les sols dépourvus de résidus végétaux étaient nettement plus faibles que celles des sols où la quantité de résidus végétaux était normale ou doublée (**Karlen et al., 1994b**). Le travail conventionnel du sol favorise les microorganismes aérobies, qui dominent la composition de la communauté microbienne du sol (**Linn & Doran, 1984 ; Sekaran et al., 2020**).

Le travail conventionnel associé à la monoculture ont entraîné une réduction de la diversité des champignons mycorhiziens à arbuscule et a déplacé la composition de la communauté des champignons mycorhiziens à arbuscule vers la dominance de quelque taxons rudéraux, qui procurent moins d'avantages à la croissance du blé. Ces changements de la diversité des champignons mycorhiziens à arbuscule ont entraîné une perte de la stabilité des agrégats du sol (**Peng et al., 2024**).

D'après **McDaniel et al. (2014)** le remplacement de la rotation des cultures par la monoculture est responsable de la perte de la biodiversité, car la monoculture signifie une diversité botanique et structurelle limitée (**Ammann & Garden, 2003**). Ces dernières années, la monoculture s'est souvent basée sur l'utilisation des variétés hybrides à haut rendement, entraînant la perte de variétés traditionnelles locales (érosion génétique). D'après **Magurno et al. (2014)**, la monoculture entraîne une diminution de la diversité des champignons mycorhiziens arbusculaires. **Gosling et al. (2006)** ont montré que la monoculture sélectionne des espèces de champignons mycorhiziens à arbuscule qui poussent et sporulent plus rapidement, ce qui offre moins d'avantages aux plantes, car elles détournent davantage de ressources pour leur propre croissance et reproduction. De plus, le système de jachère réduit les propagules des champignons mycorhiziens à arbuscules en raison de l'élimination de la végétation hôte, responsable de la création et du maintien de la réserve des propagules ce qui conduit à la diminution de la diversité des champignons mycorhiziens arbusculaires (**Miller & Jastrow, 1992**). A cela s'ajoute que la période de jachère réduit la biomasse microbienne du sol, ainsi que l'activité de la B-glucosidase et de l'uréase (**Hontoria et al., 2019**).

Enfin, l'apport de fertilisants minéraux et de pesticides dans les champs sont en partie responsable de la diminution de la biodiversité dans les écosystèmes, en raison de la pollution des eaux, des sols et de l'air (**Dupuis et al., 2021**).

II.4.2. Effet de l'agriculture de conservation sur l'agro-biodiversité

L'influence du semis direct sur la faune du sol peut également entraîner un nivellement particulier : la couche supérieure est souvent déterminée de manière significative par l'activité des vers de terre (**VandenBygaart et al., 1999**). Aussi le semis direct apparaît comme un élément majeur de la restauration des communautés de lombrics, des enchytréides et des microarthropodes (**Bouthier et al., 2014**).

Le semis direct, à long terme, a augmenté le carbone organique du sol avec un taux annuel de 0,17 g/ kg, stimulant la biomasse microbienne, en particulier les bactéries à Gram négatif (**Badagliacca et al., 2021**). A long terme, le semis direct a également augmenté la teneur en bactéries saprophytes par rapport au travail conventionnel. De plus, le travail de conservation augmente l'activité de la B-glucosidase, de l'uréase et de la phosphatase (**Sekaran et al., 2020**). **Yang et al. (2012)** ont montré que le semis direct présente une diversité des champignons mycorhiziens arbusculaires plus élevée que celle observée avec le travail conventionnel.

D'après **Liu et al. (2022)**, la diversité des cultures par la rotation conduit à une diversité des macrobiotes du sol qui optimise la structure et la fonctionnalité des communautés microbiennes du sol, améliorant ainsi la santé du sol. Une étude réalisée par **Jansa et al. (2006)** a montré que la rotation des cultures, qui prend en compte un plus grand nombre d'espèces végétales, peut entraîner une plus grande diversité des champignons mycorhiziens à arbuscule dans le sol et empêche la sélection de « tricheur » mycorhiziens spécifiques. Une étude menée par **Nayyar et al. (2009)** a montré que l'introduction de pois en rotation avec le blé améliore la diversité des bactéries Gram⁺ et Gram⁻ ainsi que celle des bactéries saprophytes.

L'inclusion de légumineuses dans la succession culturale a augmenté la diversité au sein de système de culture, ce qui a également accru la biodiversité au-dessus et en dessous du sol, y compris les invertébrés décomposeurs tels que les lombrics et les collemboles, ainsi que les abeilles sauvages et domestiques qui collectent le pollen et le nectar (**Zander et al., 2016**). La rotation des cultures joue un rôle important dans le maintien de la diversité des vers de terre, car les cultures de rotation offrent une alimentation variée à ces organismes (**Crittenden et al., 2014**).

Chapitre III : Durabilité agricole ou l'agriculture durable

III.1. Définition

Selon **Keeney (1990)** et **Robinson (2018)**, l'agriculture durable repose sur la compréhension des services écosystémiques et l'étude des relations entre les organismes et leur environnement. Elle est définie comme « un système intégré de pratiques de production végétale et animale, ayant une application spécifique au site, qui durera à long terme, satisfera les besoins alimentaires et en fibres de l'homme, améliorera la qualité de l'environnement ainsi que la base des ressources naturelles dont dépend l'économie agricole ; utilisera les ressources non renouvelables et les ressources à la ferme de la manière la plus efficace possible, en intégrant, le cas échéant, les cycles biologiques naturels et les contrôles ; soutiendra la viabilité économique des exploitations agricoles et améliorera la qualité de vie des agriculteurs et de la société dans son ensemble ».

Selon l'organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (**FAO**), l'agriculture durable doit répondre aux besoins alimentaires des générations actuelles et futures, tout en assurant la rentabilité, la santé environnementale et l'équité sociale et économique (**FAO, 2014**).

La durabilité agricole comprend trois piliers d'égale importance : économique, social et environnementale (**Peeters et al., 2004**) (**Figure 03**). Du point de vue économique, l'agriculture durable offre des possibilités d'augmenter le revenu des agriculteurs grâce à des pratiques plus efficaces et à une valeur ajoutée plus élevée par le biais de la transformation après la récolte (**Kamakaula, 2024**).

L'aspect social de l'agriculture durable est tout aussi important. La mise en œuvre de pratiques durables favorise l'engagement communautaire et renforce les réseaux sociaux parmi les agriculteurs (**Nicolétis et al., 2019**). De plus, l'agriculture durable contribue à l'autonomisation des agriculteurs, en améliorant leurs connaissances et compétences et en favorisant leur indépendance dans la gestion des ressources disponibles (**Kamakaula, 2024**). D'après le même auteur, la collaboration et les partenariats entre les agriculteurs et les différentes parties prenantes peuvent créer un écosystème agricole plus résistant et durable.

Sur le plan environnemental, l'agriculture durable contribue à la conservation de l'environnement en réduisant l'empreinte carbone et en préservant la biodiversité. Elle aide également à atténuer les changements climatiques grâce à la séquestration du carbone par les plantes. L'augmentation de la biodiversité peut améliorer la résilience des systèmes agricoles face aux changements climatiques (**Kamakaula, 2024**).

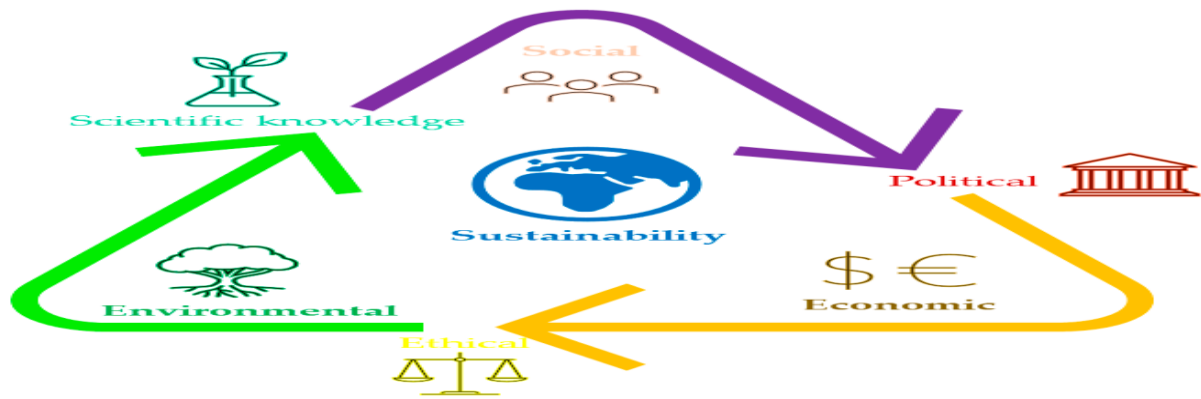


Figure 03 : Concepts de base de la durabilité et les interactions entre les différentes dimensions (Freitas & Silva, 2022).

III.2. Avantages de la durabilité agricole

La figure 04 montre que l'agriculture durable présente des avantages multiformes du point de vue économique, social et environnemental. La mise en œuvre de pratiques agricoles durable contribue à la conservation de l'environnement et à l'amélioration de la santé publique. L'agriculture durable joue un rôle crucial dans la protection du sol et de l'eau, ainsi que dans la réduction de l'érosion. Elle augmente les revenus et la stabilité économique. Les agriculteurs qui appliquent des méthodes durables ont tendance à avoir des revenus plus stables par rapport à ceux qui utilisent des pratiques conventionnelles (Basso & Antle, 2020). D'après Kamakaula (2024), les pratiques agricoles durables ont également des effets positifs sur la santé publique, en raison de la réduction de l'utilisation de produits chimiques nocifs, ce qui diminue les risques pour la santé des agriculteurs et des consommateurs. De plus, ces pratiques respectueuses de l'environnement aident à maintenir la qualité de l'eau et du sol autour des communautés agricoles, ce qui a des répercussions directes sur la santé publique (Nicolétis *et al.*, 2019).

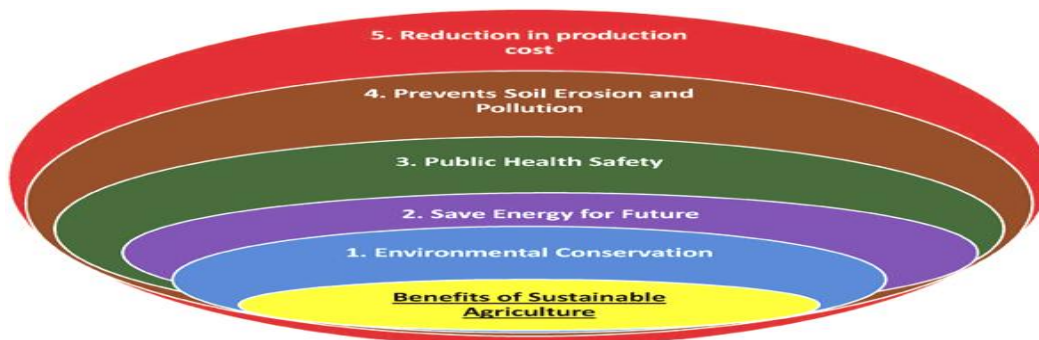


Figure 04 : Avantages de l'agriculture durable (Chahal *et al.*, 2020).

III.3. Agriculture conventionnelle et la durabilité agricole

L'agriculture conventionnelle, basée sur l'utilisation intensive des terres et la mise en jachère, a entraîné la dégradation des sols et un rendement stagnant (Rouabhi *et al.*, 2018). Cette dégradation est principalement due à l'élimination ou à l'enfouissement des résidus de culture, au travail excessif du sol et à la monoculture (Hajjaj & Mrabet, 2022). Les pratiques agricoles conventionnelles (labour, jachère nue et la monoculture) ont causé des dommages

irréversibles à l'environnement, suscitant des inquiétudes quant à la durabilité à long terme des systèmes agricoles dans les régions semi-arides. Par conséquent, ce système conventionnel (TC et jachère) n'est pas recommandé comme système durable dans un climat semi-aride (**Sombrero & Benito, 2010**), car, dans ces zones, le travail conventionnel à long terme diminue la fertilité du sol (**Han et al., 2023**). D'après **Naorem et al. (2023)**, le labour conventionnel détruit les agrégats du sol, épuise le carbone organique, altère l'activité microbienne et dégrade la santé du sol. De plus, ce type de travail entraîne l'érosion, la pollution des eaux et des sols, ainsi que l'avancement de la désertification (**El Mekkaoui et al., 2023**). Le labour excessif rend le sol sensible à l'érosion en raison de la réduction de la taille des particules (**Shahrinezhad et al., 2015**). Il entraîne une perte annuelle de sol, avec une moyenne de 2,8 t/ha contre 0,2 t/ha pour le semis direct (**Kovács et al., 2023**).

Dans le système de jachère nue, le sol est exposé à des conditions environnementales difficiles telles que le rayonnement solaire, les vents forts, les pluies abondantes et les températures élevées, ainsi qu'aux conditions de gel et de dégel. Ces conditions sévères détériorent les propriétés physiques du sol et sa fertilité en augmentant la perte de matière organique par minéralisation, en déprécient la qualité de la matière organique, en réduisant l'activité microbienne et en augmentant la sensibilité à l'érosion (**Campbell et al., 1991 ; Fu et al., 2017 ; Abhiram & Eeswaran, 2022**). Cela influence négativement l'agrégation du sol en raison de l'absence d'ajout de carbone organique (**Aziz et al., 2011**). D'après **Abhiram & Eeswaran (2022)**, le travail conventionnel pour contrôler les mauvaises herbes pendant la période de la jachère nue détériore la structure du sol et épuise la matière organique, ce qui augmente les pertes de sol par érosion.

La monoculture continue cause une détérioration de la structure du sol (**Ferreras et al., 2000**), une augmentation des populations d'adventices, une prolifération accrue des ravageurs et des maladies, et une utilisation moins efficace de l'eau et des nutriments. Cela influe négativement sur la santé du sol et le rendement des cultures (**Garrido & López-Bellido, 2001**).

Les pratiques agricoles traditionnelles ont un impact néfaste sur l'environnement. Les émissions de carbone dans les pratiques conventionnelles sont plus élevées (145 kg/ha), suivies par le travail minimum (72 kg/ha) et enfin la technique de semis directe (31 kg/ha) (**Naorem et al., 2023**). Selon **Karbin et al. (2018)**, les émissions de CO₂ dans les sols de l'agriculture traditionnelle étaient de 16 % plus élevées que celles de l'agriculture de conservation.

L'antagonisme entre les pratiques conventionnelles et l'agriculture durable repose sur la maximisation de la rentabilité économique, la protection de l'environnement et la nécessité de fournir des paramètres d'évaluation adéquats pour démontrer que l'agriculture industrielle n'est pas durable, et que des approches alternatives peuvent offrir des rendements adéquats (**Röös et al., 2018**).

III.4. Agriculture de conservation et la durabilité agricole

Les principaux aspects de l'agriculture de conservation dans le cadre d'une agriculture durable sont les suivants :

1. La conservation du sol

La conservation du sol est un aspect vital de l'agriculture durable, car elle assure la santé et la productivité des systèmes agricoles à long terme (Sahoo et al., 2023). Les pratiques de l'agriculture de conservation jouent un rôle primordial dans la conservation du sol, comme suit :

✓ **Le semis direct (non perturbation du sol) ou le travail minimum** : dans ce système, le sol est peu ou pas perturbé, ce qui permet de maintenir la stabilité des agrégats du sol, améliorer la navigabilité et d'augmenter la résistance à l'érosion (Weisskopf & Anken, 2006).

✓ **La rétention des résidus** : les résidus de culture laissés à la surface du sol agissent comme une couche protectrice. Ils empêchent l'érosion causée par le vent et l'eau, et contribuent également à améliorer la teneur en matière organique du sol (Sahoo et al., 2023).

✓ **La rotation des cultures** : la rotation des cultures aide à réduire l'érosion par éclaboussures et par ruissellement, car les racines des plantes saisissent la couche supérieure du sol (Angon et al., 2023). De plus, la rotation des cultures réduit la densité apparente, améliore l'agrégation du sol et sa porosité (Iheshiulo et al., 2023). Selon Panda et al. (2021), l'inclusion des légumineuses dans la succession culturale aide à la solubilisation du phosphore insoluble, au renouvellement de la matière organique et à l'enrichissement du sol en azote, tout en améliorant la stabilité des agrégats du sol.

2. La gestion de l'eau

Une gestion efficace de l'eau est essentiel pour la durabilité agricole, en particulier dans les régions arides et semi-arides (Sahoo et al., 2023). L'agriculture de conservation implique plusieurs pratiques pour optimiser l'utilisation de l'eau et améliorer sa conservation :

✓ **Le travail réduit du sol ou semis direct** : le semis direct augmente l'infiltration des eaux de pluie et retient plus d'eau dans la zone racinaire (Wiese et al., 2016).

✓ **La rétention des résidus** : la présence de résidus de culture à la surface du sol protège le sol et améliore l'efficacité de la capture et l'utilisation de l'eau grâce à une infiltration et une rétention accrues, tout en réduisant l'évaporation et le ruissellement, ce qui conduit à une teneur en humidité plus élevée (Karbin et al., 2018).

✓ **La succession des cultures** : la diversification des cultures dans la rotation stimule la conservation de l'eau du sol, les agrégats sol-eau et les activités enzymatiques du sol (Shah et al., 2021). L'inclusion des légumineuses dans la rotation des cultures améliore les fonctions hydrauliques du sol dans le système agricole. Selon Tigka et al. (2023), la lentille dans une rotation culturale augmente la rétention d'eau du sol et sa disponibilité pour la culture suivante.

3. La biodiversité et la préservation des habitats

Les organismes du sol sont essentiels à la durabilité des agroécosystèmes. Il est donc important de définir et d'encourager les pratiques agricoles qui augmentent l'abondance et la diversité des organismes du sol en améliorant les conditions d'habitat ou la disponibilité des ressources (Altieri, 1999). Les pratiques de l'agriculture de conservation jouent un rôle crucial dans la préservation de la biodiversité et la création d'un habitat favorable pour les organismes bénéfiques (Sahoo et al., 2023).

✓ **Semis direct** : l'abondance des vers de terre dans le cadre de travail de la conservation augmente de plus de deux fois par rapport au travail conventionnel (Juhos et al., 2023).

✓ **La rotation des cultures** : la diversité des cultures par la rotation conduit à une diversité des microbiomes du sol, optimisant ainsi la structure et la fonctionnalité des communautés microbiennes, et améliorant la santé du sol (Liu et al., 2022). Selon Sahoo et al. (2023), la diversification des cultures crée une gamme d'habitats pour différentes espèces, y compris les insectes bénéfiques et les pollinisateurs, favorisant ainsi la biodiversité et aidant à maintenir un écosystème équilibré. Une rotation des cultures bien planifiée et diversifiée est une stratégie importante pour réduire la consommation de pesticides, favorisant la conservation de la biodiversité et contribuant à maintenir un agroécosystème sain et résilient (Garbelini et al., 2022). Pour une agriculture durable, il est également nécessaire d'exploiter le potentiel allélopathique des cultures, qui pourrait contribuer à une production agricole durable grâce à une bonne gestion des mauvaises herbes (Saxena et al., 2016). L'inclusion des cultures allélopathiques dans un système de rotation peut minimiser l'utilisation des herbicides et ainsi surmonter les problèmes majeurs associés à ces produits (Narwal & Haouala, 2013). D'après Tabaglio et al. (2009), prendre en compte des plantes ayant des effets allélopathiques, comme le seigle et le triticale, permet une gestion durable des mauvaises herbes tout en réduisant l'impact de l'agriculture sur l'environnement. La rotation des cultures réduit la demande de pesticides dans le système agricole, ce qui diminue la pollution de l'eau et augmente la biodiversité (Sheoran et al., 2022).

4. Durabilité environnementale

Les pratiques de l'agriculture de conservation contribuent à atténuer les changements climatiques liés aux activités agricoles, en réduisant les émissions de gaz à effet de serre et en augmentant la séquestration du carbone (Sahoo et al., 2023).

✓ **Séquestration du carbone** : la séquestration du carbone dans le sol est améliorée par la technique de semis direct (Sombrero & Benito, 2010). Selon Moussadek et al. (2024), l'efficacité du système de semis direct pour la séquestration du carbone peut être améliorée en combinant la rétention des résidus de culture avec une rotation diversifiée. Les rotations culturales incluant les fabacées jouent un rôle important dans la séquestration du carbone et réduisent l'ensemble des apports d'énergie fossile dans le système agricole (Rani et al., 2022). La culture des légumineuses augmente significativement la séquestration du carbone dans le sol en tant que fourrage, culture allélopathique et culture de couverture, en renvoyant au sol de grandes quantités de carbone et d'azote organiques grâce à leur propension à produire plus de biomasse souterraine et de feuilles tombantes (Stagnari et al., 2017).

✓ **Réduction des émissions des gaz à effet de serre** : la consommation de gasoil dans le système de semis direct est réduite grâce à la diminution des travaux du sol, entraînant moins d'émissions de CO₂ dans l'atmosphère (Aibar, 2006). Ainsi, la technique de semis direct pourrait être une alternative pour réduire ces émissions. Selon Demin et al. (2024), l'utilisation de cette technique permet une réduction significative des émissions totales de dioxyde de carbone à 8485 kg/ha. Une étude menée par Moussadek et al. (2011) a montré une réduction drastique et continue des émissions de CO₂ de plus de 70% sous le semis direct par rapport au travail conventionnel dans les zones semi-arides marocaines. Les rotations culturales incluant les fabacées peuvent également réduire les émissions de gaz à effet de serre, tels que le dioxyde de carbone (CO₂) et l'oxyde nitreux (N₂O), par rapport aux systèmes agricoles basés sur la fertilisation minérale de l'azote (Rani et al., 2022). Les légumineuses génèrent de 5 à 7 fois moins de gaz à effet de serre que les autres cultures (Sheoran et al.,

2022). La rotation blé/ fève est particulièrement intéressante en raison de son impact environnemental sur la réduction du CO₂ dans l'atmosphère, avec une accumulation de 8,3 mg/ha dans le sol (Tedone et al., 2023). De plus, l'introduction d'une culture céréalière comme le blé, qui a une biomasse plus élevée avec moins d'azote, devrait contribuer à l'accumulation de carbone et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre (Simão et al., 2024). Selon Yang et al. (2024), une rotation diversifiée des cultures réduit les émissions de N₂O de 39 % et améliore le bilan des gaz à effet de serre du système de 88 %.

5. Durabilité économique : la variabilité économique est crucial pour l'adoption et la durabilité à long terme des pratiques agricoles (Sahoo et al., 2023). Les pratiques de l'agriculture de conservation offrent des avantages économiques comme suit :

✓ **Réduction des coûts d'intrants :** les pratiques agricoles de conservation peuvent réduire les coûts d'intrants par rapport à l'agriculture conventionnelle. En semis direct, la diminution des coûts d'intrants peut résulter d'une réduction du nombre de passages d'équipement sur le terrain, ce qui réduit les dépenses en main-d'œuvre, en machines et en carburant (Saak et al., 2021). Fenni et al. (2015) ont constaté que pour la culture de blé en semis direct, la consommation de carburant peut être réduite de 50 à 70% par rapport au travail conventionnel, avec une réduction des besoins en machines de 60%. En effet, Zaghouane et al. (2006) rapportent que le temps de travail en semis direct est dix fois moins important qu'en travail conventionnel. La rotation des cultures a également un impact sur les coûts d'intrants. Lorsque les légumineuses à grains sont cultivées en rotation avec des cultures céréalières et oléagineuses, la fertilisation minérale, l'utilisation de pesticides et les coûts de culture diminuent, tandis que la productivité des cultures subséquentes s'améliore (Nemecek et al., 2008).

✓ **Productivité à long terme améliorée :** Une production agricole durable signifie des rendements stables ou croissants à long-terme, sans effets néfastes sur la qualité du sol et l'environnement (Hejman & Kunzová, 2010). Une meilleure rétention d'eau, la disponibilité des nutriments et l'augmentation de la résistance des cultures à la sécheresse sont des facteurs clés qui augmentent le rendement des cultures, réduisent la variabilité du rendement dans le temps et améliorent la rentabilité économique des technique de semis direct. Dridiger et al. (2020) ont souligné que le rendement des cultures et la rentabilité de la production en technique de semis direct sont de 30 % plus élevés sur une période de 7 ans par rapport au travail conventionnel. La rotation des cultures est moyen efficace d'augmenter le rendement des cultures et de mieux utiliser les terres arables (Cui et al., 2022). L'introduction des légumineuses en rotation avec le blé a permis d'augmenter le rendement et de favoriser la stabilité et la durabilité du rendement de blé à long terme (Devkota et al., 2022 ; Liu et al., 2023).

III.5. Relation entre la biodiversité et la durabilité agricole

Accroître la durabilité de l'agriculture dans des conditions de ressources limitées signifie augmenter l'efficacité de l'utilisation de l'eau et des nutriments. L'augmentation de l'efficacité d'utilisation des nutriments entraîne une baisse de la demande d'engrais artificiels, souvent peu disponibles. L'efficacité de l'utilisation de l'eau est essentielle dans le monde entier pour minimiser les pertes d'eau pendant et après les pluies ou l'irrigation en période de sécheresse naturelle (Brussaard et al., 2007).

La diversification des cultures par la rotation est souvent présentée comme un levier d'action pour accroître la durabilité des systèmes agricoles (**Meynard et al., 2013**). Les plantes modifient la structure du sol par leur activité mécanique de perforation, et par l'effet des exsudats racinaires sur les micro-agrégats (**Therond & Duru, 2019**). La diversification par l'inclusion de légumineuses est une stratégie clé pour une agriculture durable (**Leoni et al., 2022; Notz et al., 2023**). L'inclusion de légumineuses dans la rotation culturale améliore la stabilité structurale du sol, car les racines des légumineuses libèrent une glycoprotéine (glomalin) qui agit comme une colle liant les agrégats du sol et les rendant stables. Cette stabilité structurale augmente l'espace poreux et l'épaisseur du sol, réduisant ainsi l'érosion et l'encroustement du sol (**Islam et al., 2023**). De plus, l'inclusion de graminées telles que le blé dans une succession culturale améliore la stabilité des agrégats et la structure du sol par la sécrétion de lignine, qui augmente la teneur en acides carboxyliques et en acides humiques dans le substrat du sol qui agissant comme liants et réduisant l'érodibilité du sol (**Silva et al., 2020**), tout en augmentant la conservation du sol. Par ailleurs, la diversification des cultures par la rotation améliore la teneur en carbone organique du sol, suggérant des avantages écosystémiques supplémentaires associés à la matière organique (rétention des nutriments, de l'eau et atténuation des changements climatiques) (**Lago-Oliveira et al., 2024**).

La diversification des cultures par la rotation a significativement augmenté l'absorption de N et de P ainsi que l'efficacité de l'absorption d'eau par rapport aux monocultures. Selon **Selim (2019)**, la rotation des cultures joue un rôle majeur dans la réduction du risque potentiel de lessivage des nitrates dans les eaux de surface et souterraine, en améliorant la disponibilité de l'azote du sol, ce qui réduit l'épandage d'engrais et limite ainsi la pollution des eaux.

La rotation des cultures diversifiée joue un rôle crucial dans le contrôle des maladies et des ravageurs. Le contrôle des maladies et des ravageurs par la biodiversité contribue à diminuer les apports de pesticides, limitant ainsi la pollution du sol et de l'eau. La biodiversité peut contrôler les ravageurs par deux mécanismes : d'une part, la diversité floristique (la rotation des cultures) implique une diminution des espèces hôtes (*effet ascendant*), tandis que d'autre part, une diversité accrue de prédateurs contrôle les populations des ravageurs (*effet descendant*) (**Clergue et al., 2005**).

L'augmentation de la diversité rotationnelle modifie fondamentalement la structure et l'activité des communautés microbiennes, avec des effets positifs sur la formation d'agrégats et l'accumulation de la matière organique (**Tiemann et al., 2015**). Les champignons et les bactéries participent à l'évolution de la structure du sol par leur action sur le processus d'agrégation (**Therond & Duru, 2019**). Certains microorganismes du sol produisent des composés antimicrobiens qui inhibent la croissance des pathogènes des plantes, ce qui peut être bénéfique pour la gestion agricole durable (**Perlt et al., 2018**).

Les champignons mycorhiziens arbusculaires jouent un rôle important dans l'agriculture durable et respectueuse de l'environnement en améliorant l'approvisionnement en eau et en éléments nutritifs des plantes, leur permettant ainsi de mieux se protéger contre les agents pathogènes et les ravageurs (**Maurer et al., 2018 ; Thapa & Mowrer, 2022**). Selon **Augé (2004)**, les plantes mycorhiziennes présentent souvent une conductance stomatale

et une transpiration plus élevées, ce qui suggère que les systèmes racinaires colonisés par ces champignons récupèrent plus efficacement l'eau à faible activité. De plus, les champignons mycorhiziens arbusculaires produisent une glycoprotéine, la « glomaline », à la surface des hyphes, qui semble agir comme agent cimentant pour les particules du sol, améliorant ainsi la stabilité des agrégats du sol (**Kabir, 2005**).

Pour accroître la productivité agricole de manière plus durable, il est essentiel de conserver et d'améliorer la diversité des vers de terre, car les lombrics améliorent la structure du sol, le cycle des nutriments et jouent un rôle primordial dans la décomposition de la matière organique (**Rodriguez et al., 2020**). Ils contrôlent également en partie la diversité et les activités microbiennes (**Blanchart & Jouquet, 2015**). De plus, les vers de terre émettaient des signaux chimiques qui stimulaient la résistance des plantes aux parasites notamment les nématodes (**Pouge, 2016**).

Références bibliographiques

1. **Abhiram G., Eeswaram R., 2022.** Legumes for efficient utilization of summer fallow. In *Advances in legumes for sustainable intensification. Academic Press*, pp : 51- 70.
2. **Aibar J., 2006.** La lutte contre les mauvaises herbes pour les céréales en semis direct : principaux problèmes. In : *arrue ugarte J. L. (ed), Cantero Martinez C. (ed). Troisième rencontre méditerranéennes du semis direct. Zaragoza : CIHEAM. Options Méditerranéennes, Série A, Séminaires Méditerranéens*, 69 : 19- 26.
3. **Altieri M. A., 1999.** The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 74 : 19- 31.
4. **Ammann K., Garden D. B., 2003.** Biodiversity and agricultural biotechnology. *Mollusca*, 70 : 200-00.
5. **Anderson R. L., 2005.** A multi-tactic approach to manage weed population dynamics in crop rotations. *Agron. J.*, 97 : 1579- 1583.
6. **Angon P. B., Anjum N., Akter M. M., KC S., Suma R. P., Jannat S., 2023.** An overview of the impact of tillage and cropping systems on soil health in agricultural practices. *Advances in Agriculture*, 2023 : 1-14. <https://doi.org/10.1155/2023/8861216>
7. **Augé R. M., 2004.** Arbuscular mycorrhizae and soil/plant water relations. *Can. J. Soil Sci.*, 84 : 373–381.
8. **Ayalew H., Kumssa T. T., Butler T. J., Ma X-F., 2018.** Triticale improvement for forage and cover crop uses in the Southern Great plains of the United States. *Frontiers in Plant Science*, 9 : 1130.
9. **Aziz I., Ashraf M., Mahmood T., Islam K. R., 2011.** Crop rotation impact on soil quality. *Pak. J. Bot.*, 43 (2) : 949- 960.
10. **Badagliacca G., Laudicina V. A., Amato G., Badalucco L., Frenda A. S., Giambalvo D., Ingrassia R., Plaia A., Ruisi P., 2021.** Long-term effects of contrasting tillage systems on soil C and N pools and on main microbial groups differ by crop sequence. *Soil & Tillage Research*, 211 : 104995.
11. **Barati V., Bijanzadeh E., Emam Y., Pessarakli M., 2021.** Nitrogen nutrition effects on triticale photosynthesis and assimilate translocation under late-season water stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 45 (3) : 439- 456.
12. **Basso B., Antle J., 2020.** Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nat. Sustain.*, 3 (4) : 254–256.
13. **Benbrahim N., Gaboun F., 2008.** Amélioration et stabilisation des rendements du pois en grains et fourrage en zone semi-aride du Maroc. *Fourrages*, 193 : 65-78.

14. **Benniou R., 2008.** Les systèmes de production dans les milieux semi-arides en Algérie : analyse agronomique de leur diversité et des systèmes de culture céréalières dans les hautes plaines Sétifiennes. *Ed. Thèse de doctorat*, ENSA (ex INA) Alger : 293p.
15. **Benniou R., Aubry C., Abbes K., 2014.** Analyse des itinéraires techniques dans les exploitations agricoles céréalières en milieu semi-aride de l'est algérien. *Revue Agriculture*, 8 : 26- 37.
16. **Benniou R., Souadia D., Nasri H., Benkherbache N., Hamdani M., Sersou D. Laouer S., Bendada H., Belguet H., 2016.** Etude de l'effet de semis direct sur la dynamique des adventices en fonction de l'assolement culturale en milieu semi-aride cas de la région de ouled mansour M'sila. *Revue Agriculture*, numéro spéciale 1 : 246-253.
17. **Ben-Salem H., Zaïbet L., Ben-Hammouda M., 2006.** Perspectives de l'adoption du semis direct en Tunisie. Une approche économique. *Options Méditerranéennes, Série A*, 69 : 69- 75.
18. **Bernoux M., Cerri C.C., Cerri C.E.P., Neto M. S., Meta A., Perrin A-S., Scopel E., Razafimbelo T., Blavet D., Piccolo M. d. C., Pavei M., Milne E., 2006.** Cropping systems, carbon sequestration and erosion in Brazil: A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 26 (1) : 1–8. DOI: 10.1051/agro:2005055
19. **Bessaoud O., Péliissier J-P., Rolland J-P., Khechimi W., 2019.** Rapport de synthèse sur l'agriculture en Algérie (rapport de recherche). *CIHEAM-IAMM*, 82 p.
20. **Bewick L. S., Young F. L., Alldredge J. R., Young D. L., 2008.** Agronomics and economics of no-till facultative wheat in the pacific North West USA. *Crop Protection*, 27 : 932- 942.
21. **Blanchart E., Jouquet P., 2015.** Rôle des vers de terre et des termites pour la restauration de la productivité des sols en milieux tropicaux. *Restauration des sols tropicaux et méditerranéens contribution à l'agroécologie. IRD Editions*, 10 : 249- 258.
22. **Blanco-Canqui H., Holman J. D., Schlegel A. J., Tatarko J., Shaver T. M., 2013.** Replacing fallow with cover crop in a semi-arid sol : effects on soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 77 (3) : 1026- 1034.
23. **Boeni M., Bayer C., Dieckow J., Conceição P.C., Pinheiro Dick D., Knicker H., Salton J.C., Motta Macedo M.C., 2014.** Organic matter composition in density fraction of Cerrado Ferralsols as revealed by CPMAS 13C NMR: influence of pastureland, cropland and integrated crop-livestock. *Agriculture, ecosystems & environment*, 190 : .80-86. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.09.024>
24. **Bouatrous A., Harbaoui K., Karmous C., Gargouri S., Souissi A., Belguesmi K., Cheikh Mhamed H., Gharbi M. S., Annabi M., 2022.** Effect of wheat monoculture on durum wheat yield under rainfed sub-humid mediterranean climate of Tunisia. *Agronomy*, 12 : 1453.
25. **Bouchenafa N., Oulbachir K., Kouadria M., 2014.** Effets du travail du sol sur le comportement physique et biologique d'un sol sous une culture de lentille (*Lens exculenta*) dans la région de Tiaret, Algérie. *European Scientific Journal*, 10 (3) : 463- 473.
26. **Boudiar R., Alshallash K. S., Alharbi K., Okasha S. A., Fenni M., Mekhlouf A., Fortas B., Hamsi K., Nadjem K., Belagrouz A., Mansur E., Mekhlouf M., 2022.** Influence of tillage and cropping systems on soil properties and crop performance under semi-arid conditions. *Sustainability*, 14 : 11651.
27. **Bouthier A., Pelosi C., Villenave C., Peres G., Hedde M., Ranjard L., Vian J. F., Peigne J., Cortet J., Bispo A., Piron D., 2014.** Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique. In : Labreuche J., Laurent F., Roger-Estrade J. (Coord), Faut-il travailler le sol ? Aquis et innovations pour une agriculture durable. Savoir faire (Quae Ed.), pp : 85- 108.
28. **Bouzerzour H., Mahnane S., Makhoul M., 2006.** Une association pour une agriculture de conservation sur les hautes plaines orientales semi-arides d'Algérie. *Option Méditerranéennes, Série A, Séminaires Méditerranéens*, 69 : 107- 111.
29. **Brankatschak G., 2018.** Modling crop rotation and co-products in agricultural life cycle assessments. Springer Editeur, 194 p. <https://books.google.dz/books?isbn=3658235888>

30. Brussaard L., De Ruiter P. C., Brown G. G., 2007. Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agriculture, ecosystems & environment*, 121 (3) : 233-244.
31. Burel F., Garnier E., Amiaud B., Aulagnier S., Butet A., Chauvel B., Carré G., Cortet J., Couvet D., Joly P., Lescourret F., Plantureux S., Sarthou J-P., Steinberg C., Tichit M., Vaissière B., Tuinen D. V., Villenave C., 2008. Les effets de l'agriculture sur la biodiversité. Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies, Expertise Scientifique Collective, Synthèse du rapport, INRA (France), 140 p. https://www.researchgate.net/profile/Muriel-Tichit/publication/281563229_Les_effets_de_l'agriculture_sur_la_biodiversite/links/561405fb08ae4ce3cc636fac/Les-effets-de-l'agriculture-sur-la-biodiversite.pdf
32. Caesar-TonThat T. C., Wright S. F., Sainju U. M., Kolberg R., West M., 2010. Effect of lentil spring wheat cropping systems in dryland as influenced by tillage on aggregate stability, glomalin concentration and the amount of soil aggregating basidiomycete fungi. https://www.academia.edu/download/45511455/Effects_of_lentil_spring_wheat_cropping_20160510-8945-1js02p5.pdf
33. Campbell C. A., Biederbeck V. O., Zentner R. P., Lafond G. P., 1991. Effect of crop rotation and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin black chernozem. *Can. J. Soil Sc.*, 71 : 363- 376.
34. Carrouée B. B., Schneider A. A., Flénet F.F., Jeuffroy M.-H. & Nemecek T. T., 2012. Introduction du pois protéagineux dans les rotations à base de céréales à paille et colza : Impact sur les performances économiques et environnementales. *Innovations Agronomiques*, 25 : 125-142.
35. Cerf M., 1994. Qualité et système agraire : techniques, lieux, acteurs. Edition Quae, 380 p. <https://books.google.dz/books?isbn=2738005500>
36. Chahal K., Gupta V., Verma N. K., Chaurasia A., Rana B., 2021. Arbuscular mycorrhizal (AM) fungi as a tool for sustainable agricultural system. *Mycorrhizal Fungi-Utilization in Agriculture and Forestry. IntechOpen* : 1-12.
37. Chaieb N., Chiab A., Idoudi Z. B. A., Ben-Hammouda M., 2021. Mineral uptake, total polyphenols and total flavonoïds of barley as affected by tillage practices under semi-arid conditions. *Asian Plant Research Journal*, 8 (4) : 96- 104.
38. Châtaigner P. J-M., Duponnais R., 2017. Les microorganismes du sol : des outils biologiques pour satisfaire les objectifs du développement durable (ODD). *Annales des Mines-Réalités Industrielles*, 1 : 94- 98.
39. Chauvel B. ; Darmncy H. ; Munier-Jolain N. & Rodriguez A. (Coord), 2018. Gestion durable de la flore adventice des cultures, versailles. Edition Quae, 354 p. <https://books.google.dz/books?isbn=2759228185>
40. Chennafi H., Saci A., 2012. The performances of durum wheat yield (Triticum durum desf.) under tillage effect in semi-arid environment. *Energy Procedia*, 18 : 879- 887.
41. Clement-Grandcourt M., Prats J., 1971. Les céréales. Ed Baillière, Paris-France. 351p.
42. Clergue B., Amiaud B., Pervanchon F., Lasserre-Joulin F., Plantureux S., 2005. Biodiversity : Function and assessment in agricultural areas : A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 25 : 1- 15.
43. Coleman E., 2018. The new organic grower, 3rd edition: A Master's manual of tools and techniques for the home and market gardener, 30th. Chelsea green publishing éditeur, 3 ème edition, 304 p. <https://books.google.dz/books?isbn=1603588175>
44. Cordeau S., Baubron A., Adeux G., 2020. Is tillage a suitable option for weed management in conservation agriculture ? *Agronomy*, 10 : 1746.
45. Crittenden S. J., Eswaramurthy T., De Goede R. G. M., Brussaard L., Pulleman M. M., 2014. Effect of tillage on earthworms over short and medium term in conventional and organic farming. *Applied Soil Ecology*, 83 : 140- 148.

46. Cui Z., Yan B., Gao Y., Wu B., Wang Y., Xu Y., Xu P., Wang H., Wen M., Wang Y., Ma X., 2022. Crop yield and water use efficiency in response to long-term diversified crop rotations. *Front. Plant Sci.*, 13 : 1024898.
47. D'Acunto L., Andrade J. F., Poggio S. L., Semmartin M., 2018. Diversifying crop rotation increased metabolic soil diversity and activity of the microbial community. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 257 : 159- 164.
48. De Cárcer P. S., Sinaj S., Santonja M., Fossati D., Jeangros B., 2019. Long-term effects of crop succession, soil tillage and climate on wheat yield and soil properties. *Soil & tillage research*, 190 : 209- 219.
49. De Haan L., 1997. Agriculteurs et éleveurs au nord-Bénin : écologie et genres de vie. KARTHALA Editions, 217 p. <https://books.google.dz/books?isbn=2865377474>
50. Demin E., Miller S., Likhonov K., 2024. Influence of tillage methods on carbon dioxide emissions in spring wheat crops. *Bio Web of Conferences*, 82 : 06006. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248206006>
51. Devkota M., Devkota K. P., Kumar S., 2022. Conservation agriculture improves agronomic, economic and soil fertility in dicators for a clay soil in a rainfed mediterranean climate in Morocco. *Agricultural Systems*, 201 : 103470.
52. Dridiger V. K., Ivanov A. L., Belobrov V. P., Kutovaya O. V., 2020. Rehabilitation of soil properties by using direct seeding technology. *Eurasian Soil Science*, 53 (9) : 1293- 1301.
53. Dugar A., Lkham D, Gonchig S., 2019. The effect of crop rotation on soil essentiels elements. *International Jouranl of Scientific and Research Publications*, 9 (8) : 97101.
54. DUPUIS A., DADOUCHI C., AGARD B., 2021. Méthodologie d'étude de la rotation de cultures à partir des données. 14ème Conférence Internationale Génie Industriel QUALITA – CIGI 2021, Grenoble, France, 5-7 mai 2021 : 609- 617.
55. El Mekkaoui A., Moussadek R., Mrabet R., Douaik A. El Haddadi R., Bouhlal O., Elomani M., Ganoudi M., Zouahri A., Chakiri S., 2023. Effects of tillage systems on the physical properties of soils in a semi-arid region of Morocco. *Agriculture*, 13 : 683.
56. Ercoli L., Masoni A., Mariotti M., Pampana S., Pellegrino E., Arduini I., 2016. Effect of preceding crop on the agronomic and economic performance of durum wheat in the transition from conventional to reduced tillage. *Europ. J. Agronomy*, 82 : 125- 133.
57. Fan J., Mc Conkey B. G., Luce M. St., Brandt K., 2020. Rotational benefit of pulse crop with no-till increase over time in a semiarid climate. *European Journal of Agronomy*, 121 : 126155.
58. FAO, 2005. Interactions du genre, de la biodiversité agricole et des savoirs locaux au service de la sécurité alimentaire. Manuel de formation, 95 p.
59. FAO, 2014. Building a common vision for sustainable food and agriculture: principles and approaches. 48 p.
60. Fenni, M., K. Nadjem and A. Mekhlouf. 2015. Carbon sequestration by direct seeding of wheat in Setif high plains (North East of Algeria). In Dincer, I., Coplan, C., Kizilkan, O., Ezan, M. (eds). Progress in clean energy. Vol. 1. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16709-1_45
61. Ferreras L. A., Costa J. L., Garcia F. O., Pecorari C., 2000. Effect of no-tillage on som soil physical properties of a structural degraded petrocalcic paleudoll of the Southern « Pampa » of Argentina. *Soil & Tillage Research*, 54 : 31- 39.
62. Francaviglia R., Almagro M. & Vicente-Vicente J.L., 2023. Conservation Agriculture and Soil Organic Carbon: Principles, Processes, Practices and Policy Options. *Soil Syst.*, 7: 17. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7010017>
63. Francis C.A., 2009. Organic farming: the ecological system. ASA-CSSA-SSSA, 353p. <https://books.google.dz/books?isbn=0891181733>

64. Freitas J., Silva P., 2022. Sustainable agricultural systems for fruit orchards : the influence of plante growth promoting bacteria on the soil biodiversity and nutrient management. *Sustainability*, 14 : 13952.
65. Fu X., Wang J., Sainju U. M., Liu W., 2017. Soil carbon fraction in response to long-term crop rotation in loess plateau of China. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 81 (3) : 503- 513.
66. Garbelini L. G., Debiassi H., Junior A. A. B., Franchini J. C., Coelho A. E., Telles T. S., 2022. Diversified crop rotation increase the yield and economic efficiency of grain production systems. *European Journal of Agronomy*, 137 : 126528.
67. Garrido R. J. L.-B., López-Bellido L., 2001. Effects of crop rotation and nitrogen fertilization on soil nitrate and wheat yield under rainfed mediterranean conditions. *Agronomie*, 21 (6-7) : 509- 516.
68. Gerdzhikova L., 2014. Influence of N fertilization and predecessors on triticale yield structure characteristics. *Turkish Journal of Agricultural and Natural Science*. Special issue 1 (2) : 1922- 1932.
69. Gerdzhikova M., Grozeva N., Pavlov D., Tzanova M., 2017. Effect of nitrogen fertilization in triticale (X Triticosecale wittm.), cultivated efter different predecessors, nitrogen uptake and efficiency. *Agrofor. Intrnational Journal*, 2 (3) : 147- 156.
70. Ghosh S. D., Das T. K., Shivay Y. S., Bhatia A., Sudhishri S. & Yeasin Md., 2022. Impact of conservation agriculture on wheat growth, productivity and nutrient uptake in maize-wheat-mungbean sytem. *IJBSM*, 13 (4) : 422-429.
71. Glab T., Scigalska B., Labuz B., 2013. Effect of crop rotations with triticale (X Triticosecale wittm.) on soil pore characteristics. *Geoderma*, 202/203 : 1-7.
72. Glab T., Scigalska B., Labuz B., 2014. Effect of crop rotation on the root system morphology and productivity of triticale (X Triticosecale Wittm). *Journal of Agricultural Science*, 152 : 642- 654.
73. Gosling P., Hodge A., Goodlass G., Bending G. D., 2006. Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 113 : 17- 35.
74. Guerif J., 1991. Simplification du travail du sol et évolution du milieu physique et chimique. *Perspectives Agricoles*, 161 : 39-46.
75. Gurusinghe S., Haque K. M. S., Weston P. A., Brown W. B., Weston L. A., 2022. Impact of rotational sequence selection on weed seedbank composition in Australian Broadacre crops. *Agronomy*, 12 (2) : 375.
76. Hajjaj B., Mrabet R., 2022. Gestion des adventices en agriculture de conservation. In gestion des adventices des principales cultures au Maroc. *Bouhache M. & Taleb A. (éditeurs)* : 219- 239.
77. Hamza M. A., Anderson W. K., 2005. Soil compaction in cropping systems : A review of the nature, causes and possible solution. *Soil & Tillage Research*, 82 : 121- 145.
78. Han C., Zhou W., Gu Y., Wang J., Zhou Y., Xue Y., Shi Z., Siddique K. H. M., 2023. Conservation tillage promotes crop productivity by changing soil aggregation in Oasis farming ecosystems. *Research Square*. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3089715/v1>
79. Hance T., Demeter S., Le Roi A., Walot T., Mahy G., Rouxhet S., Thirion M., Mulders C., 2010. Agriculture & biodiversité. AGRINATURE Hors série, SPW DGARNE, Namur, Belgium, 206 p.
80. Hao X., Chang C., Lindwall C. W., 2001. Tillage and crop sequence effects on organic carbon and total nitrogen content in an irrigated Alberta soil. *Soil & Tillage Research*, 62 : 167-169.
81. Hejcman M., Kunzová E., 2010. Sustainability of winter wheat production on sandy –loamy cambisol in the Czech Republic : Results from a long-term fertilizer and crop rotation experiment. *Field Crops Research*, 115 (2) : 191- 199
82. Helmers G. A., Yamoah C. F., Varvel G. E., 2001. Separating the impacts of crop diversification and rotations on risk. *Agron. J.*, 93 (6) : 1337–1340.

83. Hetta G., Rana S. S., Kumar S., Mujahed B. A., 2022. Promising cultural weed management practices to limit crop – weed competition in pea (*Pisum sativum* L.) in the North- Western Himalayan region. *The Pharma Innovation Journal*, 11 (3) : 633- 641.
84. Hontoria C., Garcia-González I., Quemada M., Roldán A., Alguacil M. M., 2019. The cover crop determines the AMF community composition in soil and in roots of maize after a ten-year continuous crop rotation. *Science of the Total Environment*, 660 : 913-922.
85. Huang G., Chai Q., Feng F., Yu A., 2012. Effects of different tillage systems on soil properties, root growth, grain yield, and water use efficiency of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in arid Northwest China. *Journal of Integrative Agriculture*, 11 (8) : 1286- 1296.
86. Iheshiulo E. M-A., Larney F. J., Hernandez-Ramirez G., Luce M. St., Liu K., Chau H. W., 2023. Do diversified crop rotations influence soil physical health ? A meta- analysis. *Soil & Tillage Research*, 233 : 105781.
87. Islam Md. A., Sarkar D., Alam Md. R., Jahangir M. M. R., Ali Md. O., Sarker D., Hossain Md. F., Sarker A., Gaber A., Maitra S., Hossain A., 2023. Legumes in conservation agriculture : A sustainable approach in rice-based ecology of the eastern Indo-Gangetic Plain of south Asia. An overview. *Technology in Agronomy*, 3 (1) : 1- 17.
88. Jalli M., Huusela E., Jalli H., Kauppi K., Niemi M., Himanen S., Jauhiainen L., 2021. Effects of crop rotation on spring wheat yield and pest occurrence in different tillage systems : A multi- year experiment in finnish growing conditions. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5 : 214.
89. Jansa J., Wiemken A., Frossard E., 2006. The effects of agricultural practices on arbuscular mycorrhizal fungi. *Geological Society*, 266 (1) : 89- 115.
90. Jena J., Maitra S., Hossain A., Pramanick B., Gitari H. I., Praharaj S., Shankar T., Palai J. B., Rathore A., Mandal T. K., Jatav H. S., 2022. Role of legumes in cropping systems for soil ecosystem improvement. Ecosystem services : types, management and benefits. Nova Science Publishers, Inc, New York, pp : 1-22.
91. Jossi W., Zihlmann U., Anken T., Dorn B., Van Der Heijdem M., Tschachtli R., 2011. Un travail du sol réduit protège les vers de terre. *Recherche Agronomique Suisse*, 2 (10) : 432- 439.
92. Juhos K., Nugroho P. A., Jakob G., Prettl N., Kotrocó Z., Szigeti N., Szalai Z., Madarász B., 2023. A comprehensive analysis of soil health indicators in a long-term conservation tillage experiment. *Soil Use and Management*, 00 : 1- 15.
93. Kabir Z., 2005. Tillage or no-tillage : Impact on mycorrhizae. *Can. J. Plant Sci.*, 85 : 23- 29.
94. Kamakaula Y., 2024. Sustainable agriculture practices : Economic, Ecological and Social approaches to enhance farmer Welfare and environmental sustainability. *West Science Nature and Technology*, 2 (02) : 47- 54.
95. Karbin S., Alikhani H. A., Sahu P., Mogare B., Mitra B., Viswakarma S., Singh J., Mahajan R., Malviya S., Badole P., Patidar N., Kassam A., 2018. Transformation to conservation agriculture shows reduced soil CO₂ emissions and improved soil aggregate stability in the first season in rain-fed areas in India. *Preprints* 2018, 2018040111. <https://doi.org/10.20944/preprints201804.0111.v1>
96. Karlen D. L., Varvel G.E., Bullock D.G., Cruse R. M., 1994 a. Crop rotations for the 21st Century. *Advances in Agronomy*, 53 : 1–45.
97. Karlen D. L., Wollenhaupt N. C., Erbach D. C., Berry E. C., Swan J. B., Eash N. S., Jordahl, J. L., 1994 b. Crop residue effects on soil quality following 10-years of no-till corn. *Soil & Tillage Research*, 31(2-3) : 149-167.
98. Kassam A., Friedrich T., Derpsch R., 2019. Global spread of Conservation Agriculture. *International Journal of Environmental Studies*, 76 (1) : 29- 51. <https://doi.org/10.1080/00207233.2018.194927>
99. Keeney D., 1990. Sustainable agriculture: definition and concepts. *J. Prod. Agric.*, 3 (3) : 281-285. <https://doi.org/10.2134/jpa1990.0281>

100. Koocheki A., Nassiri M., Alimoradi L., Ghorbani R., 2009. Effect of cropping systems and crop rotations on weeds. *Agron. Sustain. Dev.*, 29 (2) : 401- 408.
101. Koul O., Cuperus G.W., 2007. Ecologically based integrated pest management. CABI Edition, 462 p. <https://books.google.dz/books?isbn=1845931637>
102. Kovács G.P., Simon B., Balla I., Bozóki B., Dekemati I., Gyuricza C., Percze A. & Birkás M., 2023. Conservation Tillage Improves Soil Quality and Crop Yield in Hungary. *Agronomy*, 13 : 894. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030894>
103. Kumar A., Chand P., Thapa R., Singh T., 2021. Assessment of genetic diversity and character associations for yield and its traits in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Indian Journal of Agricultural Research*, 55 (6) : 695- 701.
104. Lafond G. P., May W. E., Holzapfel C-B., Lemke R. L., Lupwayi N. Z., 2011. Intensification of field pea production : impact on agronomic performance. *Agronomy Journal*, 103 (2) : 396- 403.
105. Lago-Oliveira S., Ouhemi H., Idrissi O., Moreira M. T., González-Garcia, 2024. Promoting more sustainable agriculture in the Moroccan drylands by shifting from conventional wheat monoculture to a rotation with chickpea and lentils. *Cleaner Environmental Systems*, 12 : 100169.
106. Lahmar R., 1993. Intensification céréalière dans les hautes plaines Sétifiennes : quelques résultats. *Cahier Option Méditerranéennes*, 2 (1) : 93- 97.
107. Lamine C. & Bellon S., 2009. Transitions vers l'agriculture biologique : pratiques et accompagnement pour des systèmes innovants. Edition Quae, 315 p. <https://books.google.dz/books?isbn=2844447562>
108. Le Roux, X., Barbault, R., Baudry, J., Burel, F., Doussan, I., Garnier, E., Herzog F., Lavorel S., Lifran R., Roger-Estrade J., Sarthou J. P., Trommetter, M., 2008. Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies : Synthèse du rapport d'expertise, INRA (France), 117 p. <https://oatao.univ-toulouse.fr/16331/>
109. Lecona-Garcia R., Flores-Naveda A., Lozano-del-Rio A. J., Ruiz-Torres N. A., Vázquez-Badillo M. E., 2021. Agronomic evaluation and physiological quality in triticale under two production systems in the Laguna region. *Agro Productividad*, 14 (6) : 129- 139.
110. Lenssen A. W., Iversen W. M., Sainju U. M., Caesar-TonThat T. C., Blodgett S. L., Allen B. L., Evans R. G., 2012. Yield, pests and water use of durum and selected crucifer oilseeds in two-year rotations. *Agronomy Journal*, 104 (5) : 1295- 1304.
111. Leoni F., Lazzaro M., Ruggeri M., Carlesi S., Meriggi P., Moonen A. C., 2022. Relay intercropping can efficiently support weed management in cereal-based cropping systems when appropriate legume species are chosen. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(4) : 75. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00787-3>
112. Linn D. M., & Doran J. W. ,1984. Aerobic and anaerobic microbial populations in no-till and plowed soils. *Soil Science Society of America Journal*, 48(4) : 794-799.
113. Lipiec J., Kuś J., Słowińska-Jurkiewicz A., Nosalewicz A., 2006. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil & Tillage Research*, 89 : 210-220.
114. Lithourgidis A. S., Damalas C. A., Gagianas A. A., 2006. Long-term yield patterns for continuous winter wheat cropping in Northern Greece. *Europ. J. Agronomy*, 25 (3) : 208- 214.
115. Liu C., Feng X., Xu Y., Kumar A., Yan Z., Zhou J., Yang Y., Peixoto L., Zeng Z., Zang H., 2023. Legume-based rotation enhances subsequent wheat yield and maintains soil carbon storage. *Agronomy for Sustainable Development*, 43 (5) : 64.
116. Liu C., Plaza-Bonilla D., Coulter J. A., Kutcher H. R., Beckie H. J., Wang L., Floc'h J-B., Hamel C., Siddique K. H. M., Li L., Gan Y., 2022. Diversifying crop rotations enhances agroecosystem services and resilience. *Advance in Agronomy*, 173 : 299- 335.

117. **Magurno F., Sasvári Z., Barchi L., Posta K., 2014.** From monoculture to Norfolk system : how the number of crops in rotation can influence the biodiversity of arbuscular mycorrhiza assemblages in the soil. *Open Journal of Ecology*, 4 : 1080-1088.
118. **Martín-Cabrejas M. A., 2019.** Legumes: An overview. In: *Legumes: Nutritional Quality, Processing and Potential Health Benefits*, pp. 1-18.
119. **Martínez E., Fuentes J-P., Silva P., Valle S., Acevedo E., 2008.** Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in mediterranean environment of Chile. *Soil & tillage research*, 99 : 232- 244.
120. **Maurer C., Oehl F., Zihlmann U., Chervet A., Sturny W. G., 2018.** Les systèmes culturaux influencent la diversité des espèces de champignons mycorhiziens. *Recherche Agronomique Suisse*, 9 (11-12) : 384- 391.
121. **Maxime V., 2023.** Impact de l'agriculture de conservation et de la transition depuis une agriculture conventionnelle sur la qualité des sols. Faculté des bioingénieurs, Université catholique de Louvain, Prom. : Biielders, Charles, 71 p. <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:38947>
122. **McDaniel M. D., Tiemann L. K., Grandy A. S., 2014.** Does agricultural crop diversity enhance soil microbial biomass and organic matter dynamics ? A meta- analysis. *Ecological Applications*, 24 (3) : 560- 570.
123. **Meena R. S., Kumawat A., Kumar S., Prasad S. K., Pradhan G., Jhariya M. K., Banerjee A., Raj A., 2022.** Effect of legumes on nitrogen economy and budgeting in South Asia. In *Advances in legumes for sustainable intensification. Academic Press*, pp : 619- 638.
124. **Mekhlouf A., Djaidjaa Z., Rouag N., Boutakrabet A., Rouabhi A., Fortas B., 2019.** Influence of systems cultures and rotation on the soil's and durum wheat culture in high plains of Algeria. *J. A. H.*, 1 (1) : 5-10.
125. **Mekhlouf A., Mekhlouf M., Bounechada M., Kerougli S., Aït-Ouali A., 2011.** Impact des diffeents sytèmes de culture sur la culture de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) var HD 1220 en condition semi-aride. *Agronomie*, 1 : 1- 7.
126. **Mergoum M., Sapkota S., El Doliefy A. E. A., Naraghi S. M., Pirseyedi S., Alamri M. S., Abu-Hammad, 2019.** Triticale (X Triticosecale wittmack) breeding. In *Advance in plant reeding strategies : Ceraels*. Springer, Berlin/ Heidelberg, Germany, pp : 405-451.
127. **Meynard J.-M., Messéan A., Charlier A., Charrier F., Fares M., Le Bail M., Magrini M-B., Savini I., 2013.** Freins et leviers à la diversification des cultures : étude au niveau des exploitations agricoles et des filières. *O. C. L.*, 20 (4) : D403.
128. **Miller R. M., Jastrow J. D., 1992.** The role of mycorrhizal fungi in soil conservation, pp : 29-44. In : Bethlenfalvay G. J., Linderman R. G., (eds). *Mycorrhizae in sustainable agriculture*. ASA special publication, No 54, American Society of Agronomy, crop science society of America and soil science society of America, Madison.
129. **Moghaddam A., Ramroudi H. M., Koohkan Sh. A. Fanaei H. R., Moghaddam A. A. R., 2011.** Effects of crop rotation systems and nitrogen levels on wheat yield, some soil properties and weed poulation. *International Journal of Agriscience*, 1 (3) : 156- 163.
130. **Moronval J.R., 2014.** Construire des systèmes de culture intégrés. Educagri Editions, 283 p. <https://books.google.dz/books?isbn=2844449905>
131. **Mouelhi B., Slim S., Arfaoui S., Boussalmi A., Jarrahi T., Ben Jeddi F., 2016.** Impact de la relation culturale et de mode de semis sur les compantes physico-chimiques du sol et analyse de l'évolution des mycorhizes. *International Multilingual Journal f Science & Technology (IMJST)*, 1 (2) : 71- 81.
132. **Moussadek R., Laghrour M., Kadiri K., Mrabet R., 2024.** Agriculture de conservation au Maroc : Revue et analyse pour la résilience du système céréalier sur 1 million d'hectare à l'horizon 2030. *African and Mediterranean Agricultural Journal*, 143 (Special issue) : 2- 26.

133. Moussadek R., Mrabet R., Zante P., Lamachère J.-M., Pépin Y., Le Bissonnais Y., Ye L., Verdoodt A., Van Ranst E., 2011. Effets du travail du sol et de la gestion des résidus sur les propriétés du sol et sur l'érosion hydrique d'un Vertisol Méditerranéen. *Can. J. Soil Sci.*, 91 (4) : 627-635.
135. Mrabet R., Moussadek R., Fadlaoui A., Ranst E. 2012. Conservation agriculture in dry areas of Morocco. *Field Crop Res.*, 132: 84- 94.
136. Muhie S. H., 2022. Novel approaches and practices to sustainable agriculture. *J. Agric. Food Res.*, 10 : 100446. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100446>
137. Murua J. R., & Laajimi A., 1995. Transition de l'agriculture conventionnelle vers l'agriculture durable: quelques réflexions. *Cahiers Options Méditerranéennes*, 9 : 75-86.
138. Nabudere D. W., 2013. From agriculture to agrigology : towards a glocal circular economy. *Real African publishers*, 222 p. <https://books.google.dz/books?isbn=1920655190>
139. Naorem A., Jayaraman S., Sinha N. K., Mohanty M., Chaudhary R. Ç., Hati K. M., Mandal A., Thakur J. K., Patra A. K., Srinivasarao Ch., Chaudhary S. K., Dalal R. C., Lal R., 2023. Eight-year impacts of conservation agriculture on soil quality, carbon storage and carbone mission foot print. *Soil & Tillage Research*, 232 : 105748.
140. Narwal S. S., Haouala R., 2013. Role of allelopathy in weed management for sustainale agriculture. In *Allelopathy*, Springer, Berlin, Heudelberg, pp : 217- 249.
141. Nath C.-P., Dutta A., Hazra K. K., Praharaj C. S., Kumar N., Singh S. S., Singh U., Das K., 2023. Long-term impact of pulses and organic amendments inclusion in cropping system on soil physical and chemical propeties. *Scientific Reports*, 13 (1) : 6508.
142. Naudin K., Le Gal P.Y., Ranaivoson L., Scopel E., 2015. Accompagner l'innovation en agriculture de conservation: quels apports des agronomes du système de culture ? *Agronomie, Environnement et Sociétés*, 5 (2): 39-46.
143. Nayyar A., Hamel C., Lafond G., Gossen B. D., Hanson K., Germida J., 2009. Soil microbial quality associated with yield reduction in continuous- pea. *Applied Soil Ecology*, 43 : 115- 121.
144. Nemecek T., Von Richthofen J. S., Dubois G., Casta P., Charles R., Pahl H., 2008. Environmental impacts of introducing grain legumes into European crop rotations. *European Journal of Agronomy*, 28(3): 380-393.
145. Nicolétis É., Caron P., El Solh M., Cole M., Fresco L. O., Godoy-Faúndez A., Kadlečíková M., Kennedy E., Khan M., Li X., Mapfumo P., Naeini M. S.N., Recine E., Varghese S., Yemefack M., Zurayk, R., 2019. Agroecological and other innovative approaches for sustainable agriculture and food systems that enhance food security and nutrition. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security, Rome, 162 p. <https://agritrop.cirad.fr/604473/1/604473.pdf>
146. Notz I., Topp C. F. E., Schuler J., Alves S., Gallardo L. A., Dauber J., Haase T., Hargreaves P. R., Hennessy M., Iantcheva A., Jeanneret P., Kay S., Recknagel J., Rittler L., Vasiljević M., Watson C. A., Reckling M., 2023. Transition to legume-supported farming in Europe through redesigning cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 43(1): 12. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00861-w>
147. Nteyi S. M., Auerbach R. M. B., Ferreira M. I., Labuschage J., 2016. Crop rotation and tillage system effects on reducing rye-grass occurrence in spring wheat. *South Africa Journal of Plant and Soil*, 33 (3) : 187- 194.
148. Ouhemi H., Aboutayeb R., El Aissaoui A., Zeroual A., Baidani A., Mazzucotelli E., Marcotuli I., Mastrangelo A. M., Gadaleta A., Houasli C., Benbrahim N., Idrissi O., 2023. Tillage system effect on soil chemical properties under different lentil and chickpea genotypes. *African and Mediterranean Agricultural Journal*, 141 : 99- 115.

149. Page K. L., Dang Y. P., Dalal R. C., 2020. The ability of conservation agriculture to conserve soil organic carbon and the subsequent impact on soil physical, chemical and biological properties and yield. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4 : 31.
150. Pala F. & Mennan H., 2020. Weed management in forage crops. In : innovative approaches in Meadow. *Range Land and Forage Crops*, pp : 123- 156.
151. Pala M., Harris H. C., Ryan J., Makboul R., Dozom S., 2000. Tillage systems and stubble management in a mediterranean type environment in relation to crop yield and soil moisture. *Expl. Agric.*, 36 : 223- 242.
152. Panda P., Panda S. K., Duary S., Mahapatra A., Maitra S., 2021. Legumes in cropping system for agricultural sustainability. *Indian Journal of Natural Sciences*, 12 (69) : 37363- 37372.
153. Papy F. & Goldringer I., 2011. Cultiver la biodiversité. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, 60 (60) : 55- 62.
154. Parida P. K., Satapathy A. S., Swain S. M., 2023. Conservation agriculture : Strategies for soil erosion and water conservation. In Pawar A. R., Patil M., Baliyan A., Gite D. P., Novel approaches in agronomy and plant science, EPH, New Deli, pp : 150-165.
155. Peeters A., Maljean J. F., Biala K., Brouckaert V., 2004. Les indicateurs de biodiversité pour les prairies : un outil d'évaluation de la durabilité des systèmes d'élevage. *Fourrages*, 178 : 217- 232.
156. Peng Z., Johnson N. C., Jansa J., Han J., Fang Z., Zhang Y., Jiang S., Xi H., Mao L., Pan J., Zhang Q., Feng H., Fan T., Zhang J., Liu Y., 2024. Mycorrhizal effects on crop yield and soil ecosystem functions in long-term tillage and fertilization experiment. *New Phytologist*, 242 (4) : 1798-1813.
157. Peralta A. L., Sun Y., McDaniel M. D., Lennon J. T., 2018. Crop rotational diversity increases disease suppressive capacity of soil microbiomes. *Ecosphere*, 9 (5) : e02235.
156. Pittelkow C. M., Linquist B. A., Lundy M. E., Liang X., Groenigen K. J. V., Lee J., Gestel N. V., Six J., Venterea R. T., Kessel C. V., 2015. When does no-till yield more ? A global meta-analysis. *Field Crops Research*, 183 : 156- 168.
157. Plaza-Bonilla D., Nolot J.-M., Raffaillac D., Justes E., 2017. Innovative cropping systems to reduce N inputs and maintain wheat yields by inserting grain legumes and cover crops in southwestern France. *Eur. J. Agron.*, 82 : 331–341. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.05.010>
158. Pougé J. F., 2016. Le ver de terre : ami ou ennemi ? *La Forêt Privée*, 347 : 58- 63.
159. Pousset J., 2008. Agriculture naturelle : face aux défis actuels et à venir, pourquoi et comment généraliser une pratique agricole "naturelle" productive. France agricole edition, 444 p. <https://books.google.dz/books?isbn=2912199166>
160. Pradhan G., Meena R. S., Kumar S., Jhariya M. K., Khan N., Shukla U. N., Singh A. K., Sheoran S., Kumar S., 2022. Legumes for eco-friendly weed management in agroecosystem. In Advances in legumes for sustainable intensification. *Academic press*, pp : 133- 154.
161. Prusinski J., Borowska M., Kaszkowiak E., Olszak G., 2016. The after-effect of chosen fabaceae on the yield of grain and protein in winter triticale (*Triticosecale* sp. Wittmack ex A. Camus 1927) fertilized with mineral nitrogen. *Plant Soil Environ.*, 62 (12) : 571- 576.
162. Rakesh K., Mehera B., 2022. Effects of biofertilizers on different varieties of lentil (*Lens culinaris* L.). *The Pharma Innovation Journal*, 11 (7) : 688- 691.
163. Ramdan E., Freeg H. A., Shalaby N., Rizk M. S., Ma J., Du W., Ibrahim O. M., Korany S. M., Alsherif E. A., Abd Elgawad H., El-Tahan A., 2023. Evaluation of some triticale genotypes under different salt concentrations at germination and early seedling stage. *Research Square*, 1 : 27. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2433922/v1>
164. Ramesh A. S., Rai P. K., Nagar S., 2021. Influence chemicals, botanicals and growth regulator treatments on plant growth and yield attributing traits of lentil (*Lens culinaris* L.) variety : K-75. *International Journal of Plant & Soil Science*, 33 (19) : 124- 129.

165. Ramesh C., Negi S. C., Rana S. S., Subehia S. K., 2016. Effect of tillage, crop rotations, residue and fertilizer management on productivity, profitability and resource use efficiency of maize (*Zea mays* L.) based cropping systems in North-West Himalayas. *Res. On Crops*, 17 (1) : 35- 40.
166. Rand C., 2013. Producing vegetables. Raintree Editeur, 48 p.
<https://books.google.dz/books?isbn=1406256617>
167. Rani K., Rani A., Sharma P., Dahiya A., Punia H., Kumar S., Sheoran S., Banerjee A., 2022. Legumes fo agroecosystem services and sustainability. In advance in legumes for sustainable intensification. *Academic press*, pp : 363- 380.
168. Ren X., Zou W., Jiao J., Stewart R., Jian J., 2023. Soil properties affect crop yield changes under conservation agriculture : A systematic analysis. *European Journal of Soil Science*, 74 (5) : e13413.
169. Robinson L., 2018. Sustainable agriculture and farming. Larsen and Keller Education, 283 p.
[https://www.academia.edu/download/91951023/Sustainable_Agriculture_and_Farming_Logen_Robinson .pdf](https://www.academia.edu/download/91951023/Sustainable_Agriculture_and_Farming_Logen_Robinson.pdf)
170. Rodriguez M. P., Dominguez A., Moreira Ferroni M., Wall L. G., Bedauo J. C., 2020. The diversification and intensification of crop rotations under no-till promote earthworm abundance and biomass. *Agronomy*, 10 (7) : 919.
171. Rööß E., Mie A., Wivstad M., Salomon E., Johansson B., Gunnarsson S., Wallenbeck A., Hoffmann R., Nilsson U., Sundberg C., Watson C. A., 2018. Risks and opportunities of increasing yields in organic farming. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38 : 14.
<https://doi.org/10.1007/s13593-018-0489-3>
171. Rosolem C. A., Calonogo J. C., 2013. Phosphorus and potassium budget in the soil-plan system in crop rotation under no-till. *Soil & Tillage Research*, 126 : 127-133.
173. Rouabhi A., Dhehibi B., Laouar A., Houmoura M., Sebaoune F., 2016. Adoption Perspectives of Direct Seeding in the High Plains of Sétif-Algeria. *Journal of Agriculture and Environmental Sciences*, 5: 53-64.
174. Rouabhi A., Hafsi M., Monneveux P., 2019. Climate change and farming systems in the region of Setif (Algeria). *JAIED*, 113 (1) : 79-95.
175. Rouabhi A., Laouar A., Mekhlouf A., Dhehibi B., 2018. What are the factors affecting no-till adoption in the farming system of Sétif province in Algeria ? *Turkish Journal of Agriculture- Food Science and Technology*, 6 (6) : 636- 641.
176. Rouabhi A., Louar A., Mekhlouf A., Dhehibi B., 2019. Socioeconomic assessment of no-till in wheat cropping systm : A case study in Algeria. *New Medit.*, 18 (1) : 53- 63.
177. Ruissi P., Giambalvo D., Di Miceli G., Frenda A. S., Saia S., Amato G., 2012. Tillage effects on yield and nitrogen fixation of legumes in mediterranean conditions. *Agronomy Journal*, 104 (5) : 1459- 1466.
178. Saak A. E., Wang T., Yu Z., Kolady D., Ulrich-Schad J. D., Clay D., 2021. Duration of usage and farmer reported benefits of conservation tillage. *Journal of Soil and Water Conservation*, 76 (1) : 65- 75.
179. Saber N., Mrabet R., 2002. Influence du travail du sol et des rotations de cultures sur la qualité d'un sol argileux gonflant en milieu semi-aride marocain. *Etude et Gestion des Sols*, 9 (1) : 43- 53.
180. Sahoo C., Martin A. G., Reddy C. D. K., Saini A., 2023. Role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Advances and Trends in Agriculture Sciences*. 161- 169.
https://www.researchgate.net/profile/Ankit-Saini-6/publication/376111544_Advances_and_Trends_in_Agriculture_Sciences_12_Role_of_Conservation_Agriculture_in_Sustainable_Agriculture/links/6569feffb1398a779dceab5e/Advances-and-Trends-in-Agriculture-Sciences-12-Role-of-Conservation-Agriculture-in-Sustainable-Agriculture.pdf

181. Sainju U. M., Lenssen A., Caesar-Thonthat T., Waddell J., 2007. Dryland plant biomass and soil carbon and nitrogen fractions on transient land as influenced by tillage and crop rotation. *Soil & Tillage Research*, 93 : 452- 461.
182. Salado-Navarro L. R., Sinclair T.-R., 2009. Crop rotation in Argentina : Analysis of water balance and yield using crop models. *Agricultural Systems*, 102 : 11- 16.
183. Salem H. M., Ali A. M., Wu W., Tu Q., 2021. Initial effect of shifting from traditional to no-tillage on runoff retention and sediment reduction under rainfall simulation. *Soil Research*, 60 (6) : 547- 560.
184. Sánchez-Navarro V., Zornoza R., Faz Á., Fernández J. A., 2019. Comparing legumes for use in multiple cropping to enhance soil organic carbon, soil fertility, aggregates stability and vegetables yields under semi-arid conditions. *Scientia Horticulturae*, 246 : 835-841.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.065>
185. Saxena R., Tomar R. S., Kumar M., 2016. Allelopathy : A green approach for weed management and crop production. *Int. J. Curr. Biosci. Plant Biol.*, 3 (4) : 43- 50.
186. Schillinger W. F. & Archer D. W., 2020. Winter triticale : A long-term cropping systems experiment in dry mediterranean climate. *Agronomy*, 10 : 1777.
187. Schlegel A. J., Assefa Y., Haag L. A., Thompson C. R. & Stone L. R., 2018. Long-term tillage on yield and water use of grain sorghum and winter wheat. *Agronomy Journal*, 110 (1) : 269- 280.
188. Schmidt L., Warnstorff K., Dörlef H., Linweber P., Lange H., Merbach W., 2000. The influence of fertilization and rotation on soil organic matter and plant yields in the long-term Eternal rye trial in Halle (Saale), Germany. *J. Plant Nutri. Soil. Sci.*, 163 : 639- 648.
189. Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique, 2008. Biodiversité et agriculture: Protéger la biodiversité et assurer la sécurité alimentaire. Montréal, 56 pages.
190. Sekaran U., Sagar K. L., Denardin L. G. D. O., Singh J., Singh N., Abagandura G. O., Kumar S., Farmaho B. S., Bly A., Martins A. P., 2020. Responses of soil biochemical properties and microbial community structure to short and long-term no-till systems. *Eur. J. Soil Sci.*, 71 (6) : 1018- 1033.
191. Selim M. M., 2019. A review of advantages, disadvantages and challenges of crop rotations. *Egypt. J. Agron.*, 41 (1) : 1-10.
192. Semenikhina Y., Kambulov S., Podlesniy D., Vladimirova T., Belousova S., 2021. The efficiency of the system tillage during of the cultivation crops. In *E3S web of conferences*, 273 : 05011.
https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2021/49/e3sconf_interagromash2021_05011/e3sconf_interagromash2021_05011.html
193. Shah K. K., Modi B., Panday H. P., Subedi A., Aryal G., Panday M., Shrestha J., 2021. Diversified crop rotation : An approach for sustainable agriculture production. *Advances in Agriculture*, 2021 : 1- 9.
194. Shahrinezhad S., Asadi M. E., Tohidloo G., 2015. Effect of various tillage systems on viability, germination establishment and yield of wheat. *Res. J. Appl. Sci.*, 2 (4) : 108- 118.
195. Sheoran S., Kumari P., Kumar S., Jangir C. K., Sheoran S., Jhariya M. K., Banerjee A., Jakhar S. R., 2022. Legumes for improving socio-economic conditions of farmers in rainfed agroecosystem. In *Advances in Legumes for Sustainable Intensification*, Academic Press : 679-696.
196. Silva V. R. e., Torres J. L. R., Costa D. D. D. A., Silveira B. D. S., Vieira D. M. D. S., Lemes E. M., 2020. Soil physical attributes in long-term soil management systems (tillage and no-till). *Journal of Agricultural Science*, 12 (4) : 194- 207.
197. Simão L. M., Cruppe G., Michaud J. P., Schillinger W. F., Diaz D. R., Dille A. J., Rice C. W., Lollato R. P., 2024. Beyond grain : Agronomic, ecological, and economic benefits of diversifying

- crop rotations with wheat. *Advances in Agronomy*, 186 : 51- 112.
<https://doi.org/10.1016/bs.agron.2024.02.007>
- 198. Sombrero A. & Benito A. D., 2010.** Carbon accumulation in soil ten-year study of conservation tillage and crop rotation in semi-arid area of Castile-Leon, Spain. *Soil & Tillage Research*, 107 (2) : 64- 70.
- 199. Sommer R., Piggitt C., Haddad A., Hajdibo A., Hayek P., Khalil Y., 2012.** Simulating the effects of zero tillage and crop residue retention on water relation and yield of wheat under rainfed semiarid mediterranean conditions. *Field Crops Research*, 132 : 40- 52.
- 200. Stagnari F., Maggio A., Galieni A., Pisante M., 2017.** Multiple benefits of legumes for agriculture sustainability: an overview. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 4(2): 1- 13.
- 201. St-Martin A., Vico G., Bergkvist G., Bommarco R., 2017.** Diverse cropping systems enhanced yield but did not improve yield stability in a 52- year long experiment. *Agriculture, Ecosystems & environment*, 247 : 337- 342.
- 202. Szymańska G., Faligowska A., Panasiewicz K., Szukala J., Ratajczak K., Sulewska H., 2020.** The long-term effect of legumes as forcroppings on the productivity of rotation winter triticale- winter rape with nitrogen fertilisation. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B- Soil & Plant Science*, 70 (2) : 128- 134.
- 203. Tabaglio V., Gavazzil C., Schulz M., Marocol A., 2009.** Alternative weed control using the allelopathic effect of natural benzoxazinoids from rye mulch. *Agron. Sustain. Dev.*, 28 : 397- 401.
- 204. Taji A. & Reganold J., 2006.** Organic agriculture: A global perspective. Csiropublishing editeur, 480 p. <https://books.google.dz/books?isbn=0643099395>
- 205. Tedone L., Verdini L., De Mastro G., 2023.** Effects of different types of soil management on organic carbon and nitrogen contents and the stability index of a durum wheat-faba bean rotation under a mediterranean climate. *Agronomy*, 13 : 1298.
- 206. Thapa B. & Mowrer J., 2022.** Effects of carbon amendments, tillage and cover cropping on arbuscular mycorrhizal fungi association and root architecture in corn and cotton crop sequence. *Agronomy*, 12 : 2185.
- 207. Therond O. & Duru M., 2019.** Agriculture et Biodiversité : Les services écosystémiques, une voie de réconciliation. *Innovation Agronomiques*, 75 : 29- 47.
- 208. Tiemann L. K., Grandy A. S., Atkinson E. E., Marin-Spiotta E., McDaniel M. D., 2015.** Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem. *Ecology Letters*, 18 (8) : 761- 771.
- 209. Tigka E., Beslemes D., Kakabouki I., Vlachostergios D., Roussis I., Danalatos N., 2023.** Effect of lentil cover cropping on soil hydraulic properties and subsequent crop productivity in two soil types in central Greece. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Horticulture*, 79 (1) : 1- 7.
- 210. Tiwari D. & Kewat M. L., 2010.** Impact of tillage and weed control practices on weed flora and yield of wheat in direct seeded rice- wheat cropping system. *Indian Journal of Weed Science*, 42 (1 & 2) : 104-106.
- 211. Toth M., Stumpp C., Klik A., Strauss P., Mehdi-Schulz B., Liebhard G., Strohmeier S., 2024.** Long-term effects of tillage systems on soil health of a silt loam in lower Austria. *Soil & Tillage Research*, 241 : 106120.
- 212. Ulber L., Steinmann H-N., Klimek S., Isselstein J., 2009.** An on-farm approach to investigate the impact of diversified crop rotations on weed species richness and composition in winter wheat. *Weed Research*, 49 : 534- 543.
- 213. Unger P. W., 1989.** Conservation des sols et des eaux : Façons culturales appropriées. Food and agriculture org., 272 p. <https://books.google.dz/books?isbn=925202154X>

214. **VandenBygaart A. J., Protz R., Tomlin A. D., Miller J. J., 1999.** Tillage system effects on near-surface soil morphology: observations from the landscape to micro-scale in silt loam soils of southwestern Ontario. *Soil & Tillage Research*, 51(1-2) : 139-149.
215. **Vandermeer J., Perfecto I., 1995.** Breakfast of biodiversity: the truth about rainforest destruction. Food First Books, Oakland, 185 p.
216. **Viaux P., 1999.** Une 3^e voie en grande culture : environnement, qualité, rentabilité. France agricole Edition, 211 p. <https://books.google.dz/books?isbn=2912199050>
217. **Voisin A.-S., Cellier P., Jeuffoy M.-H., 2015.** Fonctionnement de la symbiose fixatrice de N₂ des légumineuses à graines : Impacts agronomiques et environnementaux. *Innovations Agronomiques*, 43 : 139- 160.
218. **Volsi B., Higashi G. E., Bordin I., Telles T. S., 2022.** The diversification of species in crop rotation increases the profitability of grain production systems. *Scientific Reports*, 12 (1) : 19849.
219. **Wardak D. L. R., Padia F. N., Heer M. I. d., Sturrock C. J., Mooney S. J., 2024.** Zero-tillage induces significant changes to the soil pore network and hydraulic function after 7 years. *Geoderma*, 447 : 116934. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116934>
220. **Weisberger D. Nichols V., Liebman M., 2019.** Does diversifying crop rotations suppress weed ? A meta-analysis. *Plos. One*, 14 (7) : 1-12.
221. **Weisskopf P. & Anken T., 2006.** Effects of no-tillage on soil structure. *CABI Reviews*, 1 (051) : 1- 11.
222. **Wiese J. D., Labuschagne J., Agenbag G. A., 2016.** Soil Water and mineral nitrogen content as influenced by crop rotation and tillage practice in the Swart land subregion of the Western Cape-South. *African Journal of Plant and Soil*, 33 (1) : 33- 42.
223. **Woźniak A., 2019.** Effect of crop rotation and cereal monoculture on the yield and quality of winter grain and on crop infestation with weeds and soil properties. *International Journal of Plant Production*, 13 : 177- 182.
224. **Woźniak A. & Soroka M., 2018.** Effect of crop rotation and tillage system on the weed infestation and yield of spring wheat and soil properties. *Applied Ecology & Environmental Research*, 16 (3) : 3087- 3069.
225. **Wu X. L. & Bao W. K., 2011.** Leaf growth, gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters in response to different water deficits in wheat cultivars. *Plant Production Science*, 14 (3) : 254-259. <https://doi.org/10.1626/pps.14.254>
226. **Wysokinski A., Lozak I., Kuziemska B., 2021.** Sources of nitrogen for winter triticale (*Triticosecale* Wittm. Ex A. Camus) succeeding pea (*Pisum sativum* L.). *Agronomy*, 11 (3) : 527.
227. **Yang A., Hu J., Lin X., Zhu A., Wang J., Dai J., Wong M. H., 2012.** Arbuscular mycorrhizal fungal community structure and diversity in response to 3-year conservation tillage management in a sandy loam soil in north China. *J. Soils Sediments*, 12 : 835- 843.
228. **Yang X., Xiong J., Du T., Ju X., Gan Y., Li S., Xia L., Shen X., Pacenka S., Steenhuis T. S., Siddique K. H. M., Kang S., Butterbach-Bahl K., 2024.** Diversifying crop rotation increases food production, reduces net greenhouse gas emissions and improves soil health. *Nature Communications*, 15 (1) : 198.
229. **You Y., Deng J., Liu G., Yang X., Zhang Z., Shen Y., 2022.** Optimizing crop systems : integrating forage triticale into the fallow of Peanut monoculture in the north China Plain. *Agronomy*, 12 (5) : 1138.
230. **Yuan J., Sadiq M., Rahim N., Tahir M. M., Liang Y., Zhuo M., Yan L., Shaheen A., Mahmood B., Li G., 2023.** Changes in soil properties and crop yield under sustainable conservation tillage systems in spring wheat agroecosystems. *Land*, 12 : 1253.
231. **Zaghoulane O., Abdellaoui Z., Houassine D., 2006.** Quelles perspectives pour l'agriculture de conservation dans les zones céréalières en conditions algériennes ? In : Arrue Ugarte J.L and Cantero-

Martínez C. (eds.). Troisièmes rencontres méditerranéennes du semis direct. Zaragoza : CIHEAM. p. 183-187 (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 69).

231. Zander P., Bues A., Uthes S., Amjath-Babu T. S., Schläfke N., Stoddard F., Sara Preissel S., Kuhlman T., Reckling M., Bachinger J., Murphy-Bokern D., Watson C., 2016. Grain legume decline and potential recovery in European agriculture: a review. *Agronomy for sustainable development*, 36 (2): 26

Partie II: Etude expérimentale

Parite 2 : Etude expérimentale**CHAPITRE I : La dynamique des mauvaises herbes sous l'effet des pratiques culturales en zone semi-aride, cas de la région de Sétif****Résumé**

L'un des principaux obstacles à la production agricole est la présence des mauvaises herbes. Ces bio-agresseurs des cultures nuisent à la croissance des cultures en raison de leur forte concurrence vis-à-vis de l'occupation de l'espace, l'eau et l'absorption des éléments nutritifs du sol. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact de la rotation culturale sous deux modes de travail du sol, à savoir le semis direct et le travail conventionnel sur la dynamique de la flore adventice dans les conditions semi-aride de l'est d'Algérie. Quatre successions culturales ont été testées: "blé/ blé/ lentille/ triticales", "blé/ triticales/ pois fourrager/ blé", "blé/ lentille/ blé/ pois fourrager" et "blé/ pois fourrager/ triticales/ lentille" pendant trois campagnes agricoles successives (2016/17, 2017/18 et 2018/19). Les relevés ont été réalisés sur trois stades de développement des cultures. Les essais ont été conduits à la ferme expérimentale de l'institut technique des grandes cultures de Sétif (ITGC-Sétif). Les résultats indiquent que le semis direct favorise l'apparition des mauvaises herbes vivaces. La densité totale, la biomasse (fraîche et sèche) ainsi que la densité, la biomasse et la matière sèche des adventices dicotylédones ont été plus élevées en travail conventionnel tandis que celles des monocotylédones ont été plus élevées en semis direct. Les rotations des cultures avec légumineuses (lentille et pois fourrager) ont enregistré des valeurs élevées en densité, en biomasse et en matière sèche. Le travail conventionnel fonction de la rotation culturale augmente la diversité et la richesse des mauvaises herbes. Enfin, le semis direct combiné à la rotation culturale pourra réduire la densité et la diversité des mauvaises herbes tout en influençant sur leurs conditions de croissance.

Mots clés : adventices, semis direct, la rotation des cultures, travail conventionnel, diversité, semi-aride.

1. Introduction

Les mauvaises herbes (M-H) constituent une menace majeure pour l'agriculture mondiale en réduisant de manière préjudiciable la production agricole sur le plan quantitatif et qualitatif (Travlos et al., 2018). D'après Upasani et al. (2017), une infestation sévère par les mauvaises herbes a causé une perte de rendement peut atteindre 80 %. Les mauvaises herbes peuvent aussi servir de refuge à des organismes nuisibles (insectes et champignons pathogènes) pour la culture comme des hôtes (Mercado & Lapitan, 2018). En Algérie, le premier facteur limitant l'élaboration du rendement du blé dur, c'est la densité de levée de la culture et le contrôle des adventices. Ces dernières venant avant la fertilisation azotée comme sources premières de variation des rendements (Benniou, 2008).

Santín-Montanyá et al. (2016) ont suggéré que les pratiques agronomiques utilisées pour gérer le sol ont une influence majeure sur la communauté des flores adventices. Parmi ces

pratiques agricoles: le travail du sol, la rotation des cultures et le désherbage chimique. Dans la région semi-aride d'Algérie, le système de culture adopté est jachère/ blé, la jachère est souvent paturée ou bien blé monoculture, cultivé en travail conventionnel. La dégradation de l'environnement par l'utilisation intensif des carburants et l'érosion du sol sont des principales effets négatives du travail conventionnel du sol (**Buhler, 1995**). Le travail conventionnel du sol qui basé sur le labour a modifié les caractéristiques de la communauté des adventices. Le mouvement de labour fait remonté les grains des M-H des couches profondes et déplacé les semences de la couche superficielle vers le fond (**Mohammedi et al., 2021**). Ce mouvement de labour va permettre de renouveler continuellement le stock semencier des M-H et de les maintenir apte germer sur plusieurs années.

La monoculture consiste à cultiver même espèce sur la même parcelle au cours des années consécutives, ce qui favorise l'apparition des mêmes espèces des mauvaises herbes chaque année qui devient bien adapté à la culture et plus persistantes et devenir un problème majeur pour traiter (**Meiss et al., 2010**).

La lutte contre les M-H dans la région semi-aride d'Algérie repose essentiellement sur le désherbage chimique. L'utilisation très fréquente et à grande échelle des herbicides est nuisible pour l'environnement (**Tannouche et al., 2013**), ainsi que la plus part des mauvaises herbes développent une résistance aux herbicides et deviennent plus difficiles et coûteuses à contrôler, et donc la recherche d'un système de gestion durable et écologique des adventices est indispensable (**Rebouh et al., 2021**).

Alors que l'agriculture de conservation s'en est fondée sur la perturbation minimal du sol par le non labour, la couverture permanente du sol et la rotation de cultures (**Lee & Thierfelder, 2017**). L'agriculture de conservation est présentée comme une solution de rechange durable au système de travail du sol conventionnel (**Nichols et al., 2015**). Dans le contexte de l'agriculture de conservation, le semis direct combiné à la rotation des cultures sont considéré comme des stratégies durables et écologiques de gestion des M-H (**Koocheki et al., 2009; Mishra et al., 2019**). En milieu semi-aride, le semis direct et la rotation culturale constituent un choix important pour améliorer la gestion des M-H (**Santín-Montanyá et al., 2013**). Le semis direct lorsqu'il est associé à la rotation des cultures, il peut réduire l'infestation des parcelles cultivées par les M-H (**Maclaren et al., 2021**), tandis que la présence de résidus de culture pourrait supprimer l'émergence de mauvaises herbes ou retarder le temps d'émergence; ce qui permettrait à la culture de bien se développer (**Chauhan et al., 2012**). La pratique de la rotation des cultures joue un rôle important dans la lutte contre les mauvaises herbes par la sélection des cultures allélopathiques qui peuvent inhiber la germination des semences et la croissance des plantes des adventices. Par conséquent, réduire l'application d'herbicides en plus d'autres pesticides; ce qui réduit les coûts de production et les risques environnementaux (**Narwal & Haouala, 2013**).

L'objectif de ce présent travail était d'étudier la dynamique et la diversité de la flore adventice dans la rotation des cultures combinée à la technique semis direct et le travail conventionnel, en zone semi-aride, cas de la région de Sétif.

2- Matériel et Méthodes

2.1. Site d'étude

L'expérimentation a été conduite au cours de trois campagnes agricoles (2016/17 ; 2017/18 et 2018/19), sur le site de la ferme expérimentale agricole de l'Institut Technique de Grandes Cultures (ITGC) Sétif, située à 4 km au sud-ouest de la ville de Sétif, sur le lieu dit R'Mada (**Figure 01**). Les coordonnées géographiques du lieu sont 962 m d'altitude, la latitude 36°08' Nord et la longitude est de 5°20' Est. La région d'étude appartenant à l'étage bioclimatique semi-aride, caractérisée par des hivers froids et pluvieux et des étés chauds et secs, une pluviométrie irrégulière avec une moyenne de 400 mm (**Rouabhi et al., 2018**). La composition physico-chimique du sol indique, une structure limono-argileuse à pH_{eau} faiblement alcaline, le sol est pauvre en matière organique, une teneur modérée en calcaire, en potassium et en magnésium, une teneur moyenne en azote, et la teneur en phosphore est bonne, faible teneur en sodium. Les résultats en détail sont mentionnés dans le **tableau 01**.



Figure 01 : emplacement de l'ITGC Sétif (**Source Google Earth, 2022**)

Tableau 01: caractéristiques physico-chimiques du sol de site de l'expérimentation

Paramètres	Profondeur: 0-20 cm	Profondeur : > 20 cm
Distribution Granulométrique		
<0,002 mm (Argile) (%)		26 %
0,002-0,05 mm (Limon) (%)		32 %
> 0,05 mm (Sable) (%)		42 %
Matière organique (MO) (%)	0,42	1,17
Azote (N) (%)	0,22	0,12
C/N ratio	12,21	5,67
pH eau	7,80	7,84
CE (ms/cm)	0,21	0,19
CaCO ₃ (%)	5,64	6,69
Phosphore (P) (p.p.m)	42	13,8
Potassium (K) (meq/100 g)	0,55	0,5
Magnésium (Mg) (meq/100 g)	2,9	2,9
Calcium (Ca) (meq/100 g)	43,8	43,6
Sodium (Na) (meq/100 g)	0,3	0,15

2.2. Conditions climatiques

Les conditions climatiques des campagnes agricoles durant lesquelles s'est déroulée l'expérimentation sont présentées dans **la figure 2**.

2.2.1. Précipitations :

Le cumul pluviométrique par campagne agricole est de : 195,12 mm (2016/17), 419,20 mm (2017/18) et 356,20 mm (2018/19) et ce comparé à la moyenne de la décennie 2006/2016 (371,61 mm). De fait, l'écart pluviométrique est respectivement dans l'ordre : -176,49 mm, + 47,59 et -15,41 mm. Le mois le plus pluvieux de la décennie est le mois d'avril avec une moyenne de 54,84 mm. Le mois le plus secs par saisons est : mois de mars en 2016/17 (pluviométrie nulle), octobre en 2017/18 (10,70 mm) et décembre (10,80 mm). Par contre, le mois le plus pluvieux est juin (55,50 mm) en 2016/17, mars (90,20 mm) en 2017/18 et le mois de janvier avec 77,10 mm en 2018/19 (**Figure 02**). Donc la pluviométrie montre une variabilité prononcée d'un mois à l'autre et d'une campagne à l'autre. Ainsi, l'hiver 2016/17 est relativement sec avec une moyenne de 67,92 mm comparativement à celui des deux campagnes 2017/18 et 2018/19 (70,6 mm et 103 mm). Alors le printemps de la campagne 2017/18 apparait le plus pluvieux (223,4 mm) que celui de 2018/19 et celui de 2016/17. On note que la moyenne de précipitation des trois campagnes (323,51 mm) est inférieure au cumul moyen de la précipitation de la décennie 2006/2016 : 371,61 mm (**Figure 02**). En conclusion, la saison 2016/17 a connu deux périodes sèches ; la première de deux mois (septembre-octobre) et la deuxième période de quatre mois (février- mai).

2.2.2. Températures : Les températures connaissent une très grande variation saisonnière. La température moyenne mensuelle varie de 4,28°C en mois de janvier à 24,47°C en mois de juin en 2016/17. En 2017/18, le mois le plus froid est le mois de février avec 3,43°C et le mois le plus chaud est le mois de juin avec 20,78°C. En troisième campagne agricole (2018/19), la température la plus faible est observée en mois de janvier avec 3,60°C, tandis que la température maximale est observée en mois de juin avec 28,80°C ; comparativement à la moyenne de la décennie 2006/16 où on a remarqué que le mois le plus froid est le mois de février avec 5,56°C et le mois le plus chaud est le mois de juin avec une moyenne de 22°C. Au cours des trois campagnes agricoles, la température présente une répartition bimodale ; élevée au cours de l'été et basse au cours de l'hiver. D'une façon générale, on a remarqué que les moyennes de température des trois campagnes d'étude sont supérieures à celle de la moyenne de la température de la décennie 2006/16 (**Figure 02**).

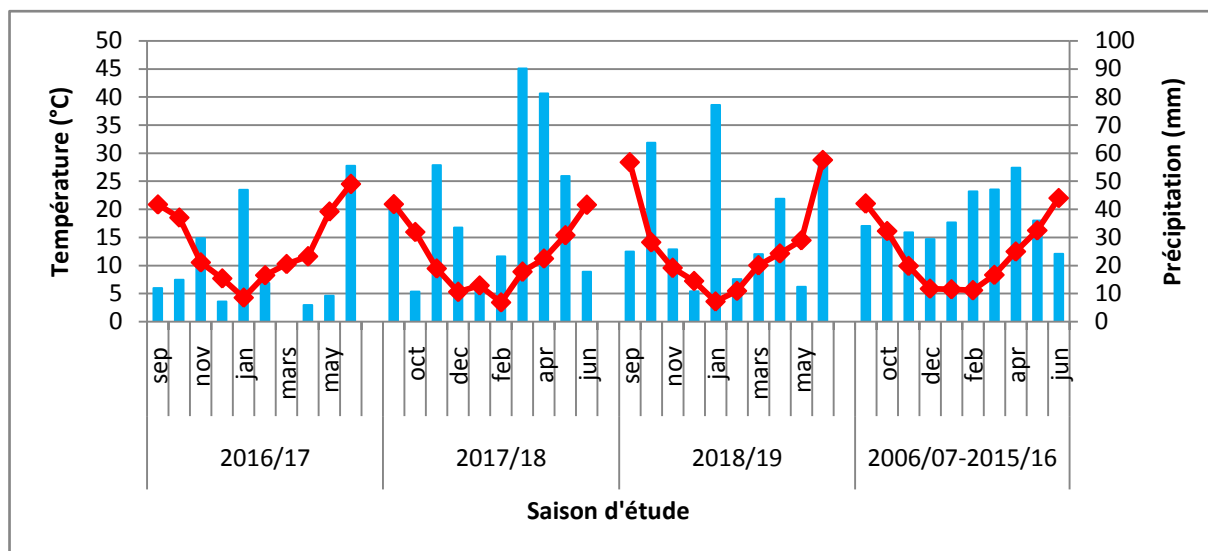


Figure 2: Températures moyennes mensuelles et pluviométrie enregistrées au cours des trois campagnes d'étude sur le site expérimental de la station expérimentale agricole de l'ITGC de Sétif comparé à la décennie 2006/2016.

2.3 Description du protocole expérimental adopté

Cette étude a pour objectif l'évaluation de quatre types de rotation de cultures (Blé, Triticale, Lentille et Pois fourrager), noté F1 vis-à-vis de deux techniques de travail du sol, à savoir le semis direct et le travail conventionnel, noté F2 sur trois campagnes agricoles (2016/17, 2017/18 et 2018/19) : Le dispositif expérimental adopté est strip-plot ou nommé split-block, organisé en bloc aléatoire complet avec trois répétitions. Chaque parcelle élémentaire fait 50 m de longueur sur 10 m de largeur, avec un espace de 5 m entre les blocs et de 2 m entre les parcelles élémentaires (**Figure 02 chapitre 04**). Le semis a été réalisé à la fin de décembre de chaque saison agricole à des doses de semis à 300 graines/m² pour le blé et triticale et entre 200 et 250 graines/m² pour la lentille et le pois fourrager.

a) Techniques de travail du sol étudiées :

Deux techniques de travail du sol qui diffèrent par leur degré de fragmentation de la couche arable, par l'effet de retournement ou non de la couche du sol travaillée, par leur degré de mélange de la matière organique au sol et par le tassement du sol qu'ils engendrent, qui ont été comparées :

- **Travail conventionnel** : un labour profond du sol a été effectué à l'aide d'une charrue à soc à une profondeur avoisinant 30 cm. Il est suivi d'un passage de cover-crop et un hersage.
- **Semis direct** (ou communément appelé Zéro travail du sol) : aucun travail du sol n'a été effectué avant le semis. Le semis s'est fait directement avec un semoir à dents de type John-Shearer d'Australie, l'espacement entre les rangs est de 0,23 m.

b) **Fertilisation** : une fertilisation de fond a été appliquée au moment du semis avec 100 kg/ha de TSP 46% (0, 46, 0) et aucun apport d'azote n'a été effectué. Un engrais de couverture (Urée 46 %) a été réalisé pour les céréales seulement au stade de 3 feuilles (40 kg/ha) et stade épi un centimètre (60 kg/ha).

c) **Désherbage** : la lutte chimique contre les mauvaises herbes a été réalisée en deux temps, la première lutte a été réalisée avant le semis, par l'utilisation d'un désherbant total le glyphosate [N-(phosphonométhyl) glycine] (à raison de 3 l/ha). Le deuxième traitement a été réalisé pour

les céréales seulement (Blé et Triticale), à l'aide du Topik/ Zoom (à raison de 0,75 l/ha et 150 g/ ha).

2.4. Méthode d'étude de la flore des adventices

a) Détermination des espèces :

Le suivi de la dynamique de la flore adventice a été réalisé tout au long de trois campagnes agricoles (2016/17, 2017/18 et 2018/19). Le suivi a été réalisé à travers trois relevés au cours des cycles des cultures: (i) un premier échantillonnage a été effectué au stade levé avant l'application du premier désherbage de rattrapage, (ii) le deuxième relevé a été réalisé après le premier traitement chimique et un (iii) troisième comptage a été réalisé avant le deuxième traitement chimique. Un quadra de 1 m² a été utilisé pour le suivi et le comptage des différentes espèces des mauvaises herbes. Concernant la détermination et l'identification des espèces, nous avons utilisé le guide des mauvaises herbes de la région de Sétif (Algérie) (Djennadi-Aït-Abdallah et al., 2015) et le guide «Adventices du blé et de l'orge au Maroc» (Tanji, 2005).

b) Détermination de la densité des adventices : un quadra de 1 m² a été utilisé pour le comptage de nombre total des mauvaises herbes.

c) Détermination de la biomasse des adventices : l'échantillonnage de la biomasse fraîche des adventices a été effectué à partir d'un fauchage de 1 m² dans chaque stade des cultures pour chaque parcelle élémentaire.

d) Détermination de la matière sèche : la matière sèche des mauvaises herbes a été déterminée après le passage à l'étuve à 70°C pendant 48 heures (Singh et al., 2015).

e) Détermination de la contribution : elle a été déterminée selon la formule :

$$\text{Contribution (\%)} = (\text{Nombre d'espèces ou de genres} / \text{nombre total d'espèces ou de genres}) * 100.$$

f) Détermination du ratio de dominance à deux facteurs (the summed dominance ratio) (SDR) : la détermination du SDR a été déterminée selon la méthode de Bhagat et al. (1999).

$$\text{SDR} = (\text{RD} + \text{RDW}) / 2, \text{ d'où}$$

Densité relative (RD) = (densité d'une espèce donnée / densité totale des espèces)*100

Poids sec relatif (RDW) = (poids sec d'une espèce donnée / poids sec total des espèces)*100.

g) Etude de la diversité de la flore adventice :

L'étude de la diversité des populations des mauvaises herbes sur les trois campagnes d'études et pour les différentes rotations culturelles a fait appelle au calcul de l'indice de Shannon-Wiener (**H'**), indice de Simpson (**C**), indice de Peilou (**J**) et indice de Margalef (**Dmg**).

➤ **Indice de Shannon-Wiener (H') :** est une mesure la plus simple, couramment utilisé pour représenter la biodiversité, H' est calculé selon la formule décrite par Bitton (1997) comme mentionné ci-dessous :

$$H' = - \sum_{i=1}^S \frac{n_i}{n} \ln(n_i/n)$$

D'où n_i: est le nombre d'individus de l'espèce i, n: est le nombre totale des individus de tous les espèces, S est le nombre d'espèces.

Quand :

- ✓ H' < 1,5 la diversité est faible,
- ✓ 1,5 < H' < 2,5 la diversité est moyenne,

✓ $H' > 2,5$ la diversité est élevée (Forte diversité).

➤ **Indice de diversité de Simpson (C):** L'indice de Simpson est calculé selon la formule décrite par **Das (2021)** comme suit :

$$C = 1 - \frac{\sum n_i (n_i - 1)}{N (N - 1)}$$

D'où :

n_i : est le nombre d'individus de l'espèce i

N: Nombre d'individus total de toutes les espèces de l'échantillon étudié.

➤ **Indice de Peilou's (J):** l'indice de Shannon-weiner est souvent accompagné de l'indice de régularité du Pielou, qui s'exprime par la formule suivante.

$$J = H' / \ln (S)$$

Cet indice est une mesure de la répartition des individus au sein de l'espèce, indépendamment de la richesse de l'espèce, sa valeur varie de 0 (dominance d'une seule espèce) à 1 (répartition équitable des individus de l'espèce) (**Dimopoulos & Kokkoris, 2021**).

➤ **Indice de Margalef (D_{mg}):** est le résultat de la combinaison du nombre d'espèces enregistrées et la somme totale de tous les individus dans un échantillon bien défini (**Cruz-Reyes & Camargo-Camargo, 2000**). Cet indice est calculé par la formule suivante :

$$D_{mg} = (S-1) / \ln N \text{ (Das, 2021),}$$

D'où :

S: c'est le nombre d'espèce (la richesse)

N: Nombre d'individus total des espèces

➤ **La richesse des espèces (R):** c'est le nombre actuel des espèces présents dans la communauté (**Bitton, 1997**)

2.5. Analyses statistiques

Les résultats obtenus ont été traités à l'aide du logiciel XLSTAT 2014, et comme les données n'ont été pas suit la distribution normale, une transformation des données (méthode de racine carrée « $\sqrt{(x+1)}$ ») a été effectué avant l'analyse de la variance selon la méthode de **Das (1999)** et la méthode de **Dey & Pandit (2020)**. Les données ont été analysées statistiquement à l'aide de l'analyse de la variance (ANOVA) et les moyennes ont été comparées avec les valeurs de LSD à 5 %, et les corrélations entre les différentes paires de variables ont également été calculées. Une autre analyse descriptive multidimensionnelle a été effectuée; il s'agit de l'analyse des composantes principales (ACP).

3- Résultats et discussion

3.1 Les espèces des mauvaises herbes recensées :

Au total, 41 espèces ont été recensées tout au long de la période d'étude; dont 85,37 % ont étaient des plantes annuelles, 07,31 % des plantes bisannuelles et 07,31 % des plantes vivaces.

À la première campagne d'étude (2016/17) (saison à faible pluviométrie), on a révélé 16 espèces réparties en neuf familles (81,25 % annuelle, 12,5 % bisannuelle et 6,25 % vivace). En semis direct, on a détecté 14 espèces réparties en huit familles dont 71,43 % sont des plantes annuelles, 14,28 % des plantes bisannuelles et 14,28 % des plantes vivaces. En parallèle, en travail conventionnel, on a observé 12 espèces, réparties en huit familles avec la présence d'une seule espèce bisannuelle (*Fumaria densiflora*) (**Tableau 02**).

En deuxième année d'étude (saison pluvieuse), on a recensé 33 espèces de mauvaises herbes, réparties en 14 familles : 84,85 % sont des espèces annuelles, 9,09 % des espèces bisannuelles et 6,06 % sont des espèces vivaces. En technique de semis direct, 28 espèces ont été détectées et réparties en 13 familles dont 82,14 % des espèces annuelles, 7,14 % des espèces bisannuelles et 10,71 % des espèces vivaces. De l'autre côté, on a marqué la présence de 12 espèces réparties en sept familles en technique de travail conventionnelle, dont 91,67 % annuelles et 8,33 % bisannuelles (**Tableau 03**).

En troisième campagne d'étude (2018/19) (saison moyennement pluvieuse), les communautés des mauvaises herbes ont été diversifiées en 15 espèces appartenant à 11 familles dont 93,33 % sont des plantes annuelles et 6,67 % sont des plantes bisannuelles. En technique conservatrice (SD), neuf espèces réparties en huit familles ont été recensées, dont 11,11 % sont des bisannuelles et 88,89 % des annuelles, comparativement au travail classique où on a observé la présence de 13 espèces réparties en neuf familles, parmi eux ; 92,31 % sont des espèces annuelles et 7,69 % des bisannuelles (**Tableau 04**).

En général, il y avait moins d'espèces des mauvaises herbes en technique de labourage du sol comparé au semis direct. En effet, les mauvaises herbes vivaces et bisannuelles ont été plus observées en technique du semis direct par rapport à la technique conventionnelle et cela a été confirmé par **Ozpinar & Ozpinar (2011)** et par **Hajjaj et al. (2018)** ; où ils ont noté que le système de travail conservatrice du sol a favorisé le développement des M-H vivaces. Les communautés des mauvaises herbes vivaces comme le pissenlit et les espèces bisannuelles comme brome stérile et carotte sauvage sont plus répandues en cultures céréalières (Blé et Triticale) conduite en semis direct. *Bunium épais* et chardon des champs sont plus fréquentes en cultures légumières (Lentille et Pois fourrager) conduite en semis direct. A l'exception de ces espèces, fumeterre à fleurs serrées a infesté toutes les cultures dans tous les stades de recensement en travail conventionnel (**Tableau 08 à Tableau 16**).

La composition des communautés des mauvaises herbes variait en fonction de la campagne agricole, la technique de travail du sol et le type ainsi que le stade de culture. Les espèces: *Polygonum aviculare*, *Bromus rigidus* et *Papaver rhoeas* L., sont les espèces les plus répandues dans toutes les campagnes, fonction de la culture et de leur stade de développement. Parmi les espèces qui sont moyennement fréquentes, on cite: *Chenopodium album* L., *Veronica hederifolia* et *Fumaria densiflora*. Parmi les espèces les moins fréquentes, on peut citer : *Lithospermum arvensis* L., *Torilis nodosa* et *Senecio vulgaris* L.

Tableau 2: Classification des relevés floristiques des adventices au cours de la campagne agricole 2016/17 (saison sèche) chez les deux techniques de travail du sol.

Type travail du sol	Classe	Type biologique	Famille	Nom commun	Nom scientifique	Code EPP
Semis direct	Mono	Annuelle	Poaceae	Brome de Madrid	<i>Bromus madritensis</i> L.	BROMA
				Brome rigide	<i>Bromus Rigidus</i> Roth.	BRORI
		Bisannuelle	Poaceae	Brome stérile	<i>Bromus sterilis</i> L.	BROST
	Dico	Annuelle	Papaveraceae	Coquelicot	<i>Papaver rhoeas</i> L.	PAPRH
			Rubiaceae	Gaillet à trois cornes	<i>Galium tricornutum</i>	GALTC
			Polygonaceae	Renouée des oiseaux	<i>Polygonum aviculare</i> L.	POLAV
			Scrophulariaceae	Véronique de perse	<i>Veronica persica</i>	VERPE
			Asteraceae	Chardon chevelu	<i>Cirsium acarna</i> L.	PCOAC
				Laiteron maraîcher	<i>Sonchus oleraceus</i> L.	SONOL
				Chardon à tête dense	<i>Carduus pycnocephalus</i> L.	CRUPY
			Chenopodiaceae	Chénopode blanc	<i>Chenopodium album</i> L.	CHEAL
		Bisannuelle	Fumariaceae	Fumeterre à fleurs serrées	<i>Fumaria densiflora</i>	FUMDE
		Vivace	Asteraceae	Chardon des champs	<i>Cirsium arvense</i> L.	CIRAR
				Pissenlit	<i>Taraxacum officinale</i>	TAROF
Travail conventionnel	Mono	Annuelle	Poaceae	Brome de Madrid	<i>Bromus madritensis</i> L.	BROMA
				Brome rigide	<i>Bromus rigidus</i> Roth.	BRORI
		Bisannuelle	Poaceae	Brome stérile	<i>Bromus sterilis</i> L.	BROST
	Dico	Annuelle	Papaveraceae	Coquelicot	<i>Papaver rhoeas</i> L.	PAPRH
			Boraginaceae	Grémil des champs	<i>Lithospermum arvensis</i> L.	LITAR
			Polygonaceae	Renouée des oiseaux	<i>Polygonum aviculare</i> L.	POLAV
			Scrophulariaceae	Véronique à feuilles de lierre	<i>Veronica hederifolia</i> L.	VERHE
				Véronique de perse	<i>Veronica persica</i>	VERPE
			Asteraceae	Chardon chevelu	<i>Cirsium acarna</i> L.	PCOAC
				Laiteron maraîcher	<i>Sonchus oleraceus</i> L.	SONOL
			Chenopodiaceae	Chénopode blanc	<i>Chenopodium album</i> L.	CHEAL
		Bisannuelle	Fumariaceae	Fumeterre à fleurs serrées	<i>Fumaria densiflora</i>	FUMDE

Tableau 3 : Classification des relevés floristiques des adventices au cours de la campagne agricole 2017/18 (saison à forte pluviométrie) chez les deux techniques de travail du sol.

Type travail du sol	Classe	Type biologique	Famille	Nom commun	Nom scientifique	Code EPPO
Semis direct	Mono	Annuelle	Poaceae	Brome de Madrid	<i>Bromus madritensis</i> L.	BROMA
				Brome rigide	<i>Bromus rigidus</i> Roth.	BRORI
				Phalaris paradoxal	<i>Phalaris paradoxa</i> L.	PHAPA
				Phalaris mineur	<i>Phalaris minor</i> Retz	PHAMI
		Bisannuelle	Poaceae	Brome stérile	<i>Bromus sterilis</i> L.	BROST
	Dico	Annuelle	Papaveraceae	Coquelicot	<i>Papaver rhoeas</i> L.	PAPRH
				Pavot cornu	<i>Glaucium corniculatum</i> L.	GUCCO
			Rubiaceae	Gaillet à trois cornes	<i>Galium tricornutum</i>	GALTC
			Polygonaceae	Renouée des oiseaux	<i>Polygonum aviculare</i> L.	POLAV
			Scrophulariaceae	Véronique à feuilles de lierre	<i>Veronica hederifolia</i> L.	VERHE
				Véronique luisante	<i>Veronica polita</i>	VERPO
			Brassicaceae	Moutarde des champs	<i>Sinapis arvensis</i> L.	SINAR
			Apiaceae	Petit coriandre	<i>Bifora testiculata</i> L.	BIFTE
			Ombellifere	Torilis noueux	<i>Torilis nodosa</i>	TOINO
			Ranunculaceae	Adonis annuelle	<i>Adonis annua</i> L.	ADOAN
			Asteraceae	Souci des champs	<i>Calendula arvensis</i> L.	CLDAR
				Chardon chevelu	<i>Cirsium acarna</i>	PCOAC
				Laiteron maraîcher	<i>Sonchus oleraceus</i> L.	SONOL
				Séneçon commun	<i>Senecio vulgaris</i> L.	SENVU
				Anacycle en massue	<i>Anacyclus clavatus</i> Desf.	ANYCL
			Malvaceae	Mauve sylvestre	<i>Malva sylvestris</i> L.	MALSI
			Chenopodiaceae	Chénopode blanc	<i>Chenopodium album</i> L.	CHEAL
		Lamiaceae		Lamier amplexicaule	<i>Lamium amplexicaule</i> L.	LAMAM
				Lamier pourpre	<i>Lamium purpureum</i> L.	LAMPU
		Bisannuelle	Ombellifere	Carotte sauvage	<i>Daucus carota</i> L.	DAUCA
		Vivace	Apiaceae	Bunium épaissi	<i>Bunium incrassatum</i>	BUIPA
			Asteraceae	Chardon des champs	<i>Cirsium arvense</i> L.	CIRAR
				Pissenlit	<i>Taraxacum officinale</i>	TAROF
Travail	Dico					

conventionnel		Annuelle	Papaveraceae	Coquelicot	<i>Papaver rhoeas</i> L.	PAPRH
				Pavot douteux	<i>Papaver dubium</i> L.	PAPDU
				Pavot cornu	<i>Glaucium corniculatum</i> L.	GUCCO
			Fumariaceae	Fumeterre officinale	<i>Fumaria officinalis</i> L.	FUMOF
				Fumeterre à petites fleurs	<i>Fumaria parviflora</i>	FUMPA
			Polygonaceae	Renouée des oiseaux	<i>Polygonum aviculare</i> L.	POLAV
			Scrophulariaceae	Véronique à feuilles de lierre	<i>Veronica hederifolia</i> L.	VERHE
			Ranunculaceae	Renoncule en faux	<i>Cerratocephalus falcatus</i> L.	CCFFA
			Asteraceae	Souci des champs	<i>Calendula arvensis</i> L.	CLDAR
				Laiteron maraîcher	<i>Sonchus oleraceus</i> L.	SONOL
			Chenopodiaceae	Chénopode blanc	<i>Chenopodium album</i> L.	CHEAL
		Bisannuelle	Fumariaceae	Fumeterre à fleurs serrées	<i>Fumaria densiflora</i>	FUMDE

Tableau 4: Classification des relevés floristiques des adventices au cours de la campagne agricole 2018/19 (campagne moyennement pluvieuse) chez les deux techniques de travail du sol.

Type travail du sol	Classe	Type biologique	Famille	Nom commun	Nom scientifique	Code EPPO
Semis direct	Mono	Annuelle	Poaceae	Brome rigide	<i>Bromus rigidus</i> Roth.	BRORI
				Ray-grass d'Italie	<i>Lolium multiflorum</i> Lam.	LOLMU
	Dico	Annuelle	Fabaceae	Vesce cultivée	<i>Vicia sativa</i> L.	VICSA
			Papaveraceae	Coquelicot	<i>Papaver rhoeas</i> L.	PAPRH
			Rubiaceae	Gaillet à trois cornes	<i>Galium tricornutum</i>	GALTC
			Polygonaceae	Renouée des oiseaux	<i>Polygonum aviculare</i> L.	POLAV
			Brassicaceae	Ravenelle	<i>Raphanus raphanistrum</i> L.	RAPRA
			Ranunculaceae	Renoncule des champs	<i>Ranunculus arvensis</i> L.	RANAR
		Bisannuelle	Fumariaceae	Fumeterre à fleurs serrées	<i>Fumaria densiflora</i>	FUMDE
Travail conventionnel	Mono	Annuelle	Poaceae	Brome rigide	<i>Bromus rigidus</i> Roth.	BRORI
				Orge des rats	<i>Hordeum murinum</i>	HORMU
				Ray-grass d'Italie	<i>Lolium multiflorum</i> Lam.	LOLMU
	Dico	Annuelle	Papaveraceae	Coquelicot	<i>Papaver rhoeas</i> L.	PAPRH
			Polygonaceae	Renouée des	<i>Polygonum</i>	POLAV

				oiseaux	<i>aviculare L.</i>	
			Rubiaceae	Gaillet à trois cornes	<i>Galium tricornutum</i>	GALTC
			Scrophulariaceae	Véronique à feuilles de lierre	<i>Veronica hederifolia L.</i>	VERHE
			Ranunculaceae	Renoncule des champs	<i>Ranunculus arvensis L.</i>	RANAR
				Renoncule en faux	<i>Ceratocephalus falcatus L.</i>	CCFFA
			Asteraceae	Chardon chevelu	<i>Cirsium acarna L.</i>	PCOAC
				Laiteron maraîcher	<i>Sonchus oleraceus L.</i>	SONOL
			Chenopodiaceae	Chénopode blanc	<i>Chenopodium album L.</i>	CHEAL
		Bisannuelle	Fumariaceae	Fumeterre à fleurs serrées	<i>Fumaria densiflora</i>	FUMDE

Dans les trois campagnes agricoles et dans les deux techniques de travail du sol, la proportion des dicotylédones est supérieure à celle des monocotylédones (**Tableau 5**). Alors, en semis direct, les deux campagnes (2016/17 et 2018/19), ont des fréquences en dicotylédones et en monocotylédones plus proches. Idem pour la contribution en travail conventionnel pour ces deux années climatiques (**Tableau 5**). La contribution des dicotylédones est supérieure à celle des monocotylédones dans tous les types de cultures installées pour l'ensemble des années (**Tableau 6**). Pour les stades de développement des cultures, la contribution des dicotylédones a une valeur supérieure à celle des monocotylédones ; en semis direct, on a marqué l'augmentation des monocotylédones en troisième stade pour l'ensemble des campagnes agricoles (**Tableau 7**). Au contraire en travail conventionnel où l'absence des monocotylédones en deuxième campagne d'étude est plus frappante (**Tableau 7**).

Tableau 5: Contribution des mauvaises herbes (monocotylédones et dicotylédone) dans les trois campagnes agricoles fonction de types de travail du sol.

Campagne agricole	2016/2017								2017/2018								2018/2019													
Techniques culturales	SD						TC				SD						TC				SD						TC			
Classe	Mono		Dico				Mono		Dico		Mono		Dico				Dico		Mono		Dico		Mono		Dico					
Type biologique	A	B	A	B	V	A	B	A	B	A	B	A	B	V	A	B	A		A	B	A		A	B						
Nombre d'espèces	2	1	8	1	2	2	1	8	1	4	1	19	1	3	11	1	2		6	1	3		9	1						
Contribution (%)	21,43		78,57				25		75		17,86		82,14				100		22,22		77,78		23,08		76,92					

A : Annuelle, B : Bisannuelle, V : Vivace, SD : semis direct, TC : travail conventionnel, Mono : Monocotylédones, Dico : Dicotylédones

Tableau 6: Contribution des mauvaises herbes (monocotylédones et dicotylédones) selon les types de culture par campagnes agricole.

Type de travail du sol		Semis direct					Travail conventionnel				
Culture	Campagne agricole	Nombre d'espèce				Contribution (%)	Nombre d'espèce				Contribution (%)
		Type biologique	A	B	V		Type biologique	A	B	V	
Blé	2016/17	Mono	2	1	0	30	Mono	1	1	0	22,22
		Dico	5	1	1	70	Dico	6	1	0	77,78
	2017/18	Mono	3	1	0	23,53	Mono	0	0	0	00
		Dico	11	1	1	76,47	Dico	5	1	0	100
	2018/19	Mono	1	0	0	25	Mono	0	0	0	00
		Dico	3	0	0	75	Dico	5	1	0	100
Triticale	2016/17	Mono	1	0	0	14,29	Mono	2	1	0	33,33
		Dico	5	1	0	85,71	Dico	5	1	0	66,67
	2017/18	Mono	3	1	0	26,67	Mono	0	0	0	00
		Dico	10	1	0	73,33	Dico	11	1	0	100
	2018/19	Mono	1	0	0	16,67	Mono	2	0	0	25
		Dico	4	1	0	83,33	Dico	5	1	0	75
Lentille	2016/17	Mono	1	0	0	9,09	Mono	1	0	0	12,50
		Dico	8	1	1	90,91	Dico	6	1	0	87,50
	2017/18	Mono	3	1	0	21,05	Mono	0	0	0	00
		Dico	12	0	3	78,95	Dico	6	1	0	100
	2018/19	Mono	1	0	0	25	Mono	2	0	0	20
		Dico	3	0	0	75	Dico	7	1	0	80
Pois fourrager	2016/17	Mono	2	0	0	22,22	Mono	1	1	0	22,22
		Dico	7	0	0	77,78	Dico	6	1	0	77,78
	2017/18	Mono	3	0	0	16,67	Mono	0	0	0	00
		Dico	11	1	3	83,33	Dico	5	1	0	100
	2018/19	Mono	2	0	0	25	Mono	2	0	0	20
		Dico	5	1	0	75	Dico	7	1	0	80

A : Annuelle ; B : Bisannuelle ; V : Vivace, Mono : Monocotylédones, Dico : dicotylédones

Tableau 7: Contribution des mauvaises herbes (monocotylédones et dicotylédones) en fonction des stades de développement des cultures.

Type de travail du sol		Semis direct					Travail conventionnel				
Culture	Campagne agricole	Nombre d'espèce				Contribution (%)	Nombre d'espèce				Contribution (%)
		Type biologique	A	B	V		Type biologique	A	B	V	
Stade 01	2016/17	Mono	1	0	0	8,33	Mono	1	1	0	20
		Dico	8	1	2	91,67	Dico	7	1	0	80
	2017/18	Mono	1	1	0	18,18	Mono	0	0	0	0
		Dico	8	1	0	81,82	Dico	5	1	0	100
	2018/19	Mono	1	0	0	20	Mono	1	0	0	9,09
		Dico	3	1	0	80	Dico	9	1	0	90,91
Stade 02	2016/17	Mono	2	0	0	20	Mono	1	0	0	12,50
		Dico	7	1	0	80	Dico	6	1	0	87,50
	2017/18	Mono	3	0	0	11,54	Mono	0	0	0	0
		Dico	19	1	3	88,46	Dico	11	1	0	100
	2018/19	Mono	1	0	0	20	Mono	3	0	0	33,33
		Dico	4	0	0	80	Dico	5	1	0	66,67
Stade 03	2016/17	Mono	2	1	0	33,33	Mono	1	1	0	25
		Dico	5	1	0	66,67	Dico	5	1	0	75
	2017/18	Mono	1	0	0	16,67	Mono	0	0	0	0
		Dico	4	0	1	83,33	Dico	4	0	0	100
	2018/19	Mono	2	0	0	25	Mono	1	0	0	16,67
		Dico	5	1	0	75	Dico	4	1	0	83,33

A : Annuelle B : Bisannuelle ; V : Vivace, Mono : monocotylédones, Dico : dicotylédones.

3.2 Etude de la variabilité du ratio de dominance à deux facteurs (*The Summed Dominance Ratio*) (SDR)

Le SDR est mesuré pour les trois stades d'échantillonnage pour chaque mode de travail du sol et pour les quatre cultures de la rotation des cultures.

En première campagne agricole 2016/17 (campagne à faible précipitation), 14 espèces des M-H ont été observées durant le premier stade de prélèvement (**Tableau 08**). En deuxième stade d'échantillonnage, ce nombre a été diminué à 11 espèces comme le montre le **tableau 09** et à 9 espèces en troisième stade d'échantillonnage (**Tableau 10**).

Pour les trois stades d'échantillonnage, la renouée des oiseaux a été la plus dominante espèce, présente dans toutes les cultures et pour les deux techniques culturales. La véronique de perse a été suivie par la renouée des oiseaux en TC pour les trois stades de recensement. Le brome stérile et grémil des champs sont complètement absents en SD en premier stade de prélèvement contre le chardon des champs, gaillet à trois cornes, pissenlit et chardon à tête dense en TC (**Tableau 08**).

En deuxième stade de prélèvement, une seule espèce qui est absente en SD qui est la véronique à feuilles de lierre contre trois espèces absentes en travail conventionnel (**Tableau 09**). En troisième stade de prélèvement, une seule espèce qui est absente en TC (brome rigide) (**Tableau 10**).

Pour les cultures, en premier stade d'échantillonnage, 6 espèces sont totalement absentes en blé et triticales contre 3 espèces pour la lentille et 4 espèces pour le pois fourrager (**Tableau 08**). En deuxième stade de prélèvement, 6 espèces, 4 espèces, 3 espèces et 1 espèce sont absentes pour le triticales, blé, la lentille et pois fourrager respectivement (SDR = 0) (**Tableau 09**). En troisième stade de recensement, on a observé l'absence 5 espèces pour le triticales, 4 espèces pour le blé et la lentille et 1 espèce pour le pois fourrager (**Tableau 10**) où le coefficient SDR = 0. On a noté aussi que la présence du brome rigide avec un SDR = 21,77 en SD et un SDR = 35,55 pour la lentille ce qui limite la dominance de la renouée des oiseaux contre le brome stérile en blé (SDR= 7,58) et le brome de Madrid en triticales avec un SDR = 10,58 (**Tableau 10**).

Tableau 08 : Effet du type de travail du sol (SD et TC) et les type de culture sur SDR (S1 -2016/17)

Espèce	Travail du sol		Culture			
	SD	TC	Blé	Tri	Len	PF
Renouée	90,42	65,88	80,93	90,42	71,60	69,65
Coquelicot	3,98	4,20	3,02	2,32	5,83	5,21
Chardon des champs	0,19	0,00	0,38	0,00	0,00	0,00
Brome rigide	1,80	0,91	0,91	0,96	1,85	1,72
Chardon Chevelu	0,17	0,01	0,04	0,02	0,17	0,13
Laiteron	0,24	0,39	0,34	0,23	0,67	0,41
Véronique de perse	1,97	25,13	12,57	5,19	17,09	19,35
Fumeterre à fleurs serrées	0,62	1,24	1,62	0,51	1,36	0,22
Gaillet à trois cornes	0,19	0,00	0,00	0,37	0,00	0,02
Pissenlit	0,32	0,00	0,00	0,00	0,64	0,00
Chénopode blanc	0,01	1,84	0,00	0,00	0,77	2,74
Chardon à tête dense	0,1	0,00	0,00	0,00	0,21	0,00
Grémil des champs	0,00	0,12	0,00	0,00	0,25	0,00
Brome stérile	0,00	0,28	0,00	0,00	0,00	0,57

SD : semis direct ; TC : travail conventionnel ; Tri : triticales ; Len : lentille ; PF : pois fourrager

En deuxième année d'étude (saison à forte précipitation), 13 espèces de mauvaises herbes étaient présentes en premier stade d'échantillonnage contre 31 espèces et 8 espèces, qui étaient présentes en deuxième et troisième stade de prélèvement respectivement. Le SDR était le plus élevé pour séneçon commun en SD et la renouée des oiseaux en TC en premier stade (**Tableau 11**). Pour toutes les cultures, le SDR le plus élevé a été présenté par la renouée des oiseaux, mais plus faible comparé au premier stade de prélèvement de la première campagne. Pavot cornue et la renouée des oiseaux ont été présentés le SDR le plus élevé pour SD et TC respectivement en deuxième stade d'échantillonnage. On a noté aussi que le SDR de la renouée des oiseaux a été diminué pour toutes les cultures (**Tableau 12**), ainsi que la majorité des espèces des mauvaises herbes présentent un SDR faible. En troisième stade d'échantillonnage, on a marqué la dominance de la renouée des oiseaux pour le TC contre la dominance du coquelicot pour le SD (**Tableau 13**). Durant ce stade, le blé, la lentille et pois fourrager sont dominées par la renouée des oiseaux, en d'autre côté, le triticales est dominée par le coquelicot (**Tableau 13**).

Tableau 09: Effet du type de travail du sol (SD et TC) et les type de culture sur SDR (S2 -2016/17)

Espèce	Travail du sol		Espèce			
	SD	TC	Blé	Tri	Len	PF
Renouée	85,56	86,38	88,84	86,57	89,53	78,94
Coquelicot	8,66	0,36	0,16	0,15	5,64	12,09
Brome de Madrid	3,95	1,95	0,00	11,04	0,00	0,77
Fumeterre à fleurs serrées	0,11	1,88	1,38	1,51	0,5	0,62
Laiteron	0,06	0,64	0,73	0,00	0,59	0,08
Gaillet à trois cornes	0,12	0,00	0,00	0,00	0,21	0,03
Véronique de perse	0,98	4,57	4,35	0,77	2,89	3,08
Chénopode	0,42	0,37	0,22	0,00	0,36	1,00
Brome rigide	0,15	0,00	0,00	0,00	0,3	0,00
Chardon chevelu	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
Véronique à feuilles de lierre	0,00	3,88	4,34	0,00	0,00	3,42

SD : semis direct ; TC : travail conventionnel ; Tri : triticales ; Len : lentille ; PF : pois fourrager

Tableau 10: Effet du type de travail du sol (SD et TC) et les type de culture sur SDR (S3 -2016/17)

Espèce	Travail du sol		Espèces			
	SD	TC	Blé	Tri	Len	PF
Renouée	54,78	95,15	79,99	85,23	59,45	75,18
Coquelicot	5,22	1,17	4,79	2,1	2,49	3,4
Brome stérile	3,34	1,06	7,58	1,22	0,00	0,00
Brome de Madrid	13,13	0,23	7,07	10,58	0,00	9,08
Fumeterre à fleurs serrées	0,08	0,95	0,57	0,00	0,00	1,48
Laiteron	0,27	0,08	0,00	0,00	0,54	0,16
Véronique de perse	0,79	1,21	0,00	0,00	1,98	2,02
Brome rigide	21,77	0,00	0,00	0,00	35,55	7,99
Chénopode	0,19	0,16	0,00	0,00	0,00	0,71

SD : semis direct ; TC : travail conventionnel ; Tri : triticales ; Len : lentille ; PF : pois fourrager

Tableau 11: Effet du type de travail du sol (SD et TC) et les type de culture sur SDR (S1-2017/18)

Espèce	Travail du sol		Espèces			
	SD	TC	Blé	Tri	Len	PF
Séneçon commun	42,35	0,00	30,95	15,4	20,3	18,05
Carotte sauvage	8,63	0,00	2,77	1,54	0,00	0,02
Laiteron	2,13	0,82	0,33	1,57	0,58	0,00
Véronique à feuilles de lierre	2,95	4,3	4,72	7,14	2,05	0,59
Renouée	39,03	76,79	52,18	66,97	48,59	63,92
Brome stérile	3,09	0,00	0,74	0,92	4,51	0,00
Souci des champs	1,15	0,00	0,42	0,97	0,9	0,00
Chénopode	0,24	0,53	0,00	0,48	0,34	0,71
Brome rigide	4,83	0,00	0,00	0,00	7,75	1,92
Gaillat à trois cornes	1,77	0,00	0,00	0,00	3,54	0,00
Chardon chevelu	0,32	0,00	0,00	0,00	0,61	0,03
Coquelicot	0,00	14,7	7,9	5,04	2,97	12,23
Fumeterre à fleurs serrées	0,00	3,76	0,00	0,00	4,96	2,55

SD : semis direct ; TC : travail conventionnel ; Tri : triticales ; Len : lentille ; PF : pois fourrager

Tableau 12: Effet du type de travail du sol (SD et TC) et les type de culture sur SDR (S2-2017/18)

Espèce	Travail du sol		Espèces			
	SD	TC	Blé	Tri	Len	PF
Torilis nouveaux	6,03	0,00	12,05	0,00	0,00	0,00
Pavot cornue	32,39	1,45	23,03	18,57	13,59	12,48
Brome rigide	12,01	0,00	3,46	13,26	7,30	0,00
Carotte sauvage	4,9	0,00	3,36	6,44	0,00	0,00
Lamier pourpre	0,34	0,00	0,23	0,00	0,00	0,46
Phalaris paradoxal	2,81	0,00	0,74	0,00	0,59	4,3
Pissenlit	0,29	0,00	0,39	0,00	0,2	0,00
Coquelicot	0,22	25,01	16,97	7,01	9,97	16,51
Adonis annuelle	0,18	0,00	0,56	0,00	0,00	0,00
Véronique luisante	4,43	0,00	4,8	0,00	4,6	0,00
Renouée	17,51	57,96	26,07	29,49	48,46	46,92
Phalaris mineur	8,11	0,00	0,00	10,09	0,00	6,14
Anacycle en masse	0,6	0,00	0,00	1,19	0,00	0,00
Petit coriandre	0,24	0,00	0,00	0,26	0,00	0,21
Souci des champs	0,26	0,26	0,00	1,04	0,00	0,00
Chardon des champs	1,66	0,00	0,00	0,00	2,72	0,6
Gaillat à trois cornes	2,15	0,00	0,00	0,00	3,39	0,92
Bunium épaissi	0,74	0,00	0,00	0,00	0,77	0,72
Moutarde des champs	0,42	0,00	0,00	0,00	0,84	0,00
Séneçon commun	0,9	0,00	0,00	0,00	0,00	1,8
Lamier amplexicaule	0,63	0,00	0,00	0,00	0,00	1,26
Mauve sylvestre	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23
Chardon chevelu	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28
Véronique à feuilles de lierre	2,43	5,51	4,32	5,05	5,38	1,12

Chénopode blanc	0,21	0,93	0,07	0,65	0,6	0,96
Laiteron	0,23	0,04	0,07	0,00	0,00	0,46
Fumeterre officinale	0,00	0,95	0,00	1,91	0,00	0,00
Renoncule en faux	0,00	1,1	0,00	1,05	0,26	0,9
Pavot douteux	0,00	0,35	0,00	0,7	0,00	0,00
Fumeterre à petite fleurs	0,00	0,36	0,00	0,73	0,00	0,00
Fumeterre à fleurs serrées	0,00	6,11	3,92	2,6	1,93	3,77

SD : semis direct ; TC : travail conventionnel ; Tri : triticales ; Len : lentille ; PF : pois fourrager

Tableau 13: Effet du type de travail du sol (SD et TC) et les type de culture sur SDR (S3-2017/18)

Espèce	Travail du sol		Espèces			
	SD	TC	Blé	Tri	Len	PF
Renouée	25,8	85,09	54,13	45,47	54,57	67,61
Coquelicot	58,12	14,48	29,72	50,17	36,6	28,72
Brome de Madrid	12,6	0,00	16,16	2,19	6,86	0,00
Gaillet à trois cornes	1,55	0,00	0,00	1,68	0,5	0,92
Laiteron	0,56	0,09	0,00	0,19	1,13	0,00
Pavot douteux	1,28	0,00	0,00	0,00	0,00	2,57
Pissenlit	0,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,2
Chénopode blanc	0,00	0,34	0,00	0,32	0,36	0,00

SD : semis direct ; TC : travail conventionnel ; Tri : triticales ; Len : lentille ; PF : pois fourrager

Les tableaux 14, 15 et 16 montrent qu'en troisième campagne, 13 espèces ont été détecté en premier stade de prélèvement, 10 espèces ont été détectées en deuxième et troisième stade d'échantillonnage. En ces trois stades de recensement, le SDR était le plus élevé pour le brome rigide en SD et la renouée des oiseaux en TC. En premier stade d'échantillonnage, on a marqué l'absence totale de 8 espèces en SD contre deux espèces en TC (**Tableau 14**). Le blé, triticales et la lentille sont dominés par le brome rigide, par contre le pois fourrager est dominé par la renouée des oiseaux (**Tableau 14**). En deuxième stade, toutes les cultures sont infestées d'une façon intense par le brome rigide suivi par la renouée des oiseaux comme le montre le **tableau 15**. Le SD a marqué l'absence totale de cinq espèces contre une espèce absente en TC (**Tableau 15**). Pour le blé, on a marqué l'absence de cinq espèces contre trois espèces absentes pour le triticales, la lentille et le pois fourrager (**Tableau 15**). Le **tableau 16** montre que les quatre cultures sont dominées par la renouée des oiseaux en troisième stade de prélèvement suivi par le brome rigide. En premier et troisième stade de recensement, les espèces absentes sont plus élevées en TC qu'en SD, par contre en deuxième stade de prélèvement c'est le contraire. Les cultures de blé et la lentille sont marquées par l'absence de cinq espèces contre deux espèces absentes pour le triticales et le pois fourrager (**Tableau 16**)

En conclusion, la rotation des cultures a modifié les espèces des M-H dominantes, selon Muminove et al. (2018), la culture introduite dans la rotation peut modifier l'ombrage en changeant la culture afin de modifier les espèces des M-H dominantes et le réservoir des semences.

Tableau 14 : Effet du type de travail du sol (SD et TC) et les type de culture sur SDR (S1-2018/19)

Espèce	Travail du sol		Espèces			
	SD	TC	Blé	Tri	Len	PF
Brome rigide	91,2	0,00	50	43,89	48,6	39,92
Renouée	7,22	80,01	45,02	34,92	39,97	54,56
Vesce cultivée	0,7	0,00	0,00	0,00	1,41	0,00
Coquelicot	0,68	1,18	0,18	1,59	0,38	1,58
Renoncule des champs	0,00	2,12	1,67	2,57	0,00	0,00
Chardon chevelu	0,00	0,07	0,14	0,00	0,00	0,00
Véronique à feuilles de lierre	0,00	11,68	3,01	15,48	3,82	1,06
Chénopode	0,00	0,42	0,00	0,00	0,42	0,42
Renoncule en faux	0,00	2,1	0,00	0,00	4,05	0,15
Fumeterre à Fleurs serrées	0,2	0,67	0,00	1,56	0,18	0,00
orge des rats	0,00	0,56	0,00	0,00	1,12	0,00
Gaillet à trois cornes	0,00	0,04	0,00	0,00	0,09	0,00
Laiteron	0,00	1,16	0,00	0,00	0,00	2,32

SD : semis direct ; TC : travail conventionnel ; Tri : triticales ; Len : lentille ; PF : pois fourrager

Tableau 15 : Effet du type de travail du sol (SD et TC) et les type de culture sur SDR (S2-2018/19)

Espèce	Travail du sol		Espèces			
	SD	TC	Blé	Tri	Len	PF
Renouée	12,05	63,73	49,92	31,78	34,7	42,16
Brome rigide	87,30	5,79	47,69	43,8	48,19	46,51
Gaillet à trois cornes	0,27	0,00	0,00	0,53	0,00	0,00
Coquelicot	0,32	2,75	3,92	0,00	1,29	0,95
Renoncule des champs	0,07	0,97	0,00	0,00	1,44	0,63
Véronique	0,00	13,39	5,18	15,09	4,11	2,42
Fumeterre à fleurs serrées	0,00	1,81	0,31	0,53	2,36	0,42
Orge des rats	0,00	7,45	0,00	7,96	0,00	6,94
Chénopode	0,00	0,16	0,00	0,32	0,00	0,00
Ray-grass	0,00	3,97	0,00	0,00	7,93	0,00

SD : semis direct ; TC : travail conventionnel ; Tri : triticales ; Len : lentille ; PF : pois fourrager

Tableau 16 : Effet du type de travail du sol (SD et TC) et les type de culture sur SDR (S3-2018/19)

Espèce	Travail du sol		espèces			
	SD	TC	Blé	Tri	Len	PF
Brome rigide	53,44	0,00	31,33	21,53	34,62	19,41
Coquelicot	2,02	2,21	0,84	1,19	2,93	3,51
Renouée	40,34	95,49	65,76	72,76	59,62	73,54
Renoncule des champs	0,79	1,86	1,97	0,52	2,34	0,48
Ravenelle	1,42	0,00	0,00	1,37	0,51	0,98
Gaillet à trois cornes	1,46	0,00	0,00	1,88	0,00	1,04
Ray-grass	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,83
Fumeterre à fleurs serrées	0,11	0,06	0,11	0,00	0,00	0,23
Orge des rats	0,00	0,25	0,00	1,52	0,00	0,00
Chénopode	0,00	0,13	0,00	0,25	0,00	0,00

SD : semis direct ; TC : travail conventionnel ; Tri : triticales ; Len : lentille ; PF : pois fourrager

Les poacées vivaces comme Bromus ssp sont significativement associés au système de SD, cela a été confirmé par les résultats de Fracchiolla et al. (2018), ainsi que le semis direct a exercé un changement au niveau de la flore adventice ; ce qui explique la diminution de l'importance de certains espèces des MH et l'apparition de nouvelles espèces (Hajjaj et al., 2018). En ajoutant que le TC a favorisé l'apparition des espèces annuelles ; ce qui a été montré par Feledyn-Szewczyk et al. (2020). Selon Mishra et al. (2022), les conditions de germination et de croissance favorables créées par le labour explique la densité la plus élevée des M-H annuelles.

3.3. Variation de la densité totale des M-H, la densité des monocotylédones et dicotylédones

a) Densité des mauvaises herbes

L'analyse de la variance a révélé un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) de système de travail du sol, année, stade de prélèvement et de l'interaction année X stade de prélèvement sur la densité totale des M-H. Ces résultats corroborent à ceux obtenus par **Blackshaw et al. (2001)**.

La figure 03 « a » montre que la densité des M-H diminue de la première année à la troisième année ; ce qui induit que la densité des M-H a été affectée par les conditions météorologiques. Ainsi que le nombre d'espèces cultivées dans la rotation des cultures ont des effets importants sur la densité des M-H à court et à long terme. D'après **González-Díaz et al. (2012)**, la rotation des cultures avec 3 espèces a été la plus efficace pour contrôler la densité des M-H. Durant les trois campagnes agricoles le TC présente la densité la plus grande. Le taux de diminution entre le TC et SD est de 22,43 % pour la campagne 2016/17, 45,91 % pour la campagne 2017/18 et de 42,29 % pour la troisième campagne (2018/19) (**Figure 04 « a »**). Nos résultats corroborent ceux de **Cordeau et al. (2020)** et de **Sharma et al. (2023)**, qui ont confirmé que la densité totale des M-H est plus élevée en TC et faible en SD. En travail du sol conventionnel, les grains des M-H sont enfouies à des profondeurs trop importantes, mais cet effet est contrebalancé par la remontée des graines de semences à partir des couches profondes dont le pouvoir germinatif se maintient de plusieurs années dans le sol (**Henriet et al., 2014**) ; cette inversion du sol a entraîné une augmentation des M-H en TC (**Ghosh et al., 2021**). Le TC favorise la germination des semences des M-H, car il produit un lit de semence pour les graines des M-H comme pour la culture (**Bilalis et al., 2001**). **Sharma et al. (2023)** ont expliqué que la grande densité des M-H en TC par les conditions environnementales favorables telle qu'une température du sol plus élevée, ou un sol poreux en surface en raison du labour pourrait faciliter l'émergence des M-H. Aussi, le TC permet plus de pénétration de lumière dans le sol, qui a joué un rôle dans la levée de dormance des graines des MH, ce qui augmente la germination des graines des M-H (**Mishra et al., 2022**). Sachant qu'en SD il n'y a pas d'enfouissement en profondeur ni de remonté des grains, l'augmentation du stock semencier se concentre en couche superficielle (**Henriet et al., 2014**) ; ces semences à la surface du sol sont susceptibles de germer, mais elle sont également exposés à des risques de mortalité en raison de la variabilité du temps et de la prédation ce qui influe sur la viabilité des semences par rapport aux graines enfouies et stockées dans le sol (**Anderson, 2005 ; Swanton et al., 2006 ; Chhokar et al., 2007 ; Nichols et al., 2015**). **Rahali et al. (2010)** ont été montré que stock semencier viable total des M-H était élevé en TC (13283 graines/m²) comparativement à 8416 graines/ m² en technique de SD. De plus, la présence des résidus en surface peut réduire la pénétration de la lumière solaire nécessaire à la photosynthèse ; ce qui explique la faible densité des M-H en SD (**Rashid et al., 2020 ; Mishra et al., 2022**). **Woźniak & Rachon (2019)**, notent que la plus faible densité des M-H en SD est due à l'utilisation du glyphosate qui contrôle les communautés des adventices.

D'une façon générale concernant les stades de prélèvement, la densité des M-H était diminuée du premier stade au troisième stade d'échantillonnage. Les stades 1, 2 et 3 de

prélèvement ont marqué la densité la plus élevée pour les campagnes 1, 2 et 3 respectivement (**Figure 06 « a »**) ; ce qu'il a été montré qu'il y'avait une différence de l'émergence des M-H entre les années et au cours de l'année même, en raison de la période d'apparence des adventices et les conditions agro-climatiques, comme le désherbage chimique et les précipitations. On signale qu'en SD et en TC, la densité des M-H diminue du premier stade au troisième stade d'échantillonnage (**Tableau 17**).

L'effet du type de culture sur la densité des mauvaises herbes est non significatif ($P > 0,05$). La comparaison des moyennes des trois campagnes a montré que la culture du pois fourrager a été classée premier avec une moyenne de 18,13 plantes/ m², Selon **Hetta et al. (2022)**, ont montré que la culture du pois fourrager est très sensible à la concurrence des M-H, suivie par la lentille avec 16,84 plantes/ m² puis la culture de blé avec une valeur de 15,94 plantes/ m² et enfin la culture de triticales avec une densité de 15,06 plantes/m² (**Figure 05 « a »**). **Gawęda et al. (2018)** ont observé une diminution de la densité des M-H de la culture de blé qui a précédé par une culture de légumineuse. **Bennioui et al. (2016)** ont trouvé que le nombre des adventices le plus élevé est observé en assolement avec légumineuses sur la quelle **on n'a pas désherbé**. L'introduction des céréales dans la rotation des cultures diminue la densité des M-H (**Doucet et al., 1999**), car les céréales ont établi un couvert végétale dense ce qui réduit l'établissement et fécondité des M-H (**Gurusinghe et al., 2022**).

Durant la première campagne (2016/17), soit en technique SD ou TC, les quatre cultures ont donné des densités élevées en premier stade de prélèvement (**Tableau 17**). Alors, en deuxième campagne (2017/18), les cultures de lentille, de blé et de triticales ont été marquées par une densité élevée en deuxième stade de prélèvement, à l'inverse le troisième stade de recensement, en faveur de la culture du pois fourrager. D'autre part, le premier stade d'échantillonnage pour l'ensemble des cultures mises en SD a enregistré la densité la plus élevée. Pour la troisième campagne (2018/ 19), en travail conventionnel, le premier stade d'échantillonnage a enregistré la plus élevée densité d'adventices en culture de blé, pois fourrager et lentille mais le troisième stade de recensement était en faveur de la culture de triticales. Par ailleurs, le troisième stade de recensement a marqué la densité la plus élevée pour le pois fourrager, triticales et le blé et le premier stade de recensement concernant la lentille en technique de SD (**Tableau 17**).

*En résumé, au sein des cultures, les M-H ont été plus fréquentes en stades végétatifs qu'en stades reproductifs. Cette conclusion corrobore à celle de **Mercado et Lapitan (2018)**. D'après **Blackshaw et al. (2001)**, l'effet du système de travail du sol et la rotation des cultures sur la population des M-H varie selon la période d'évaluation durant l'année.*

*En effet, dans notre étude, l'année, le système de travail du sol et le stade d'échantillonnage ont des effets importants sur la densité totale des M-H, tandis que l'effet de la culture était moins important que les autres facteurs. En ajoutant que la densité des adventices dans les rotations en système de semis direct est inférieure à celle du système de labour et cela confirmé par **Weisberger et al. (2019)**.*

b) Densité des monocotylédones

L'analyse de la variance a montré une différence très hautement significative de la densité des monocotylédones en fonction de la technique de travail du sol ($P < 0,001$).

Lors des trois campagnes agricoles, le SD a enregistré des valeurs élevées comparé au TC ; ce qui est en accord avec les résultats de **Rahali et al. (2010)** et ceux de **Mohammedi et al. (2021)** et ceux de **Zhang & Wu (2021)**. On a noté que le SD a eu des valeurs de : 2,65 plantes/ m², 2,24 plantes/ m² et 7,39 plantes/ m² comparé au TC (avec 1,51, 1 et 1,54) respectivement pour la 1^{ère}, la 2^{ème} et la 3^{ème} campagne (**Figure 04 «b»**). Les résultats de **Debaeke & Orlando (1994)** et de **Matloob et al. (2015)**, ont montré que l'élimination du travail du sol (SD) favorise l'émergence des plantes de types monocotylédones.

L'interaction de la technique de travail du sol avec le stade de prélèvement a un effet hautement significatif sur la densité des monocotylédones ($P < 0,01$). Durant la première campagne, le SD a enregistré la valeur la plus élevée en troisième stade de recensement avec 4,24 plantes/ m², tandis que le TC a marqué la densité la plus élevée en premier stade d'échantillonnage avec 1,70 plantes/ m². En deuxième campagne, le non labour (SD) a enregistré une densité plus élevée en deuxième stade de recensement avec 2,66 plantes/ m² par contre, le TC a marqué la valeur plus élevée en premier stade avec une plante/ m². En troisième campagne, le premier stade d'échantillonnage en SD a marqué la densité la plus élevée (7,95 plantes/ m²), tandis que le deuxième stade de recensement en TC a enregistré la valeur la plus élevée (2,29 plantes/ m²) comme le montre le **tableau 17**.

L'ANOVA a révélé un effet année très hautement significatif ($P < 0,001$) sur la densité des monocotylédones. La comparaison des moyennes entre les campagnes agricoles a montré que la 3^{ème} campagne a enregistré la densité la plus élevée avec 3,6 plantes/ m², suivie par la première campagne (2,08 plantes/ m²) puis la 2^{ème} campagne avec 1,62 plantes/ m² (**Figure 03 « b »**). Alors l'interaction campagne agricole avec le stade de prélèvement a un effet significatif ($P < 0,05$) sur la densité des monocotylédones. La première campagne a enregistré la densité la plus élevée durant le troisième stade de recensement, tandis que la 2^{ème} et 3^{ème} campagne ont enregistré la densité la plus élevée en deuxième stade (**Figure 06 « b »**) et cela coïncide avec les périodes de l'augmentation de la pluviométrie dans ces campagnes d'études.

Le type de culture et le stade de prélèvement n'ont pas d'effet significatif sur la densité des monocotylédones ($P > 0,05$). Alors la comparaison des moyennes de cette dernière entre les cultures montre que la culture de lentille a donné une densité de monocotylédones plus élevée (2,87 plants/ m²) comparé au triticales (2,77 plants/ m²), pois fourrager (2,67 plants/ m²) et le blé (2,56 plants/ m²) (**Figure 05 « b »**). La densité élevée des monocotylédones en cultures de légumineuses peut être expliqué par l'effet précédent ; qui est forcément une céréale (blé ou triticales) et ce dans les trois campagnes.

La comparaison de la moyenne de la densité des monocotylédones entre les trois stades d'échantillonnage a montré que le troisième stade de recensement a enregistré la densité la plus élevée (2,89 plantes/ m²) suivi par le deuxième stade d'échantillonnage avec

2,72 plantes/ m² puis le premier stade d'échantillonnage (2,55 plantes/ m²) comme le montre le **tableau 17**. Tandis que l'interaction type de culture et le stade de prélèvement a un effet significatif ($P < 0.05$) sur la densité des monocotylédones. En première campagne, la culture de lentille et de pois fourrager ont enregistré des valeurs de monocotylédones élevée en troisième stade et ce pour le SD et en premier stade de recensement pour le TC (**Tableau 17**). Quant aux cultures de céréales, le triticale a de valeur en monocotylédones plus élevée en deuxième stade d'échantillonnage pour les deux modes de travail du sol. Pour la culture de blé, en SD c'est le troisième stade de prélèvement qui a marqué le nombre le plus élevé tandis qu'en TC c'est le premier stade (**Tableau 17**). Pour la deuxième campagne, en SD, le deuxième stade de recensement pour la culture de triticale et du pois fourrager et le troisième stade de recensement pour la culture de blé et de lentille, qui ont enregistré des valeurs élevées des monocotylédones. Par contre, en TC, toutes les cultures ont marqué valeurs élevées en premier stade. Pour la troisième année, le premier stade d'échantillonnage de la culture de blé, lentille et pois fourrager et deuxième stade de la culture de triticale, qui ont enregistré de valeur élevé en SD. En revanche pour le TC, la culture de triticale, lentille et pois fourrager ont la densité la plus grande des monocotylédones en deuxième stade, par contre, la culture de blé a enregistré la valeur la plus élevé en premier stade (**Tableau 17**).

c) Densité des dicotylédones

Les résultats de l'analyse de variance montrent que la densité des dicotylédones varie de manière très hautement significative en réponse à la technique de travail du sol (MTS) ($P < 0,001$), année ($P < 0,001$) et hautement significative sous l'effet stade de prélèvement ($P < 0,01$). Un effet significatif ($P < 0,05$) sous l'effet de l'interaction MTS x campagne agricole.

La comparaison des moyennes entre les années d'étude a montré que la densité des dicotylédones a diminué de la première campagne à la troisième campagne (**Fig.03 « c »**). Le taux de diminution entre les deux premières années est de 27,15 % et celle des deux dernières années est de 19,52 %. La sécrétion des matières allélochimiques par les racines des cultures précédentes a réduit la densité des dicotylédones dans la rotation des cultures (**Farooq et al., 2022**). Les histogrammes de la **figure 06 «c»** montrent que le premier stade de recensement présente une densité élevée en première campagne, tandis que le deuxième stade de prélèvement enregistre une densité maximale en deuxième campagne, et le troisième stade de recensement a marqué une densité maximale en 3^{ème} campagne.

Durant la première campagne (2016/17), la densité des dicotylédones a été significativement élevé dans le TC (22,88 plantes/ m²) comparé au SD (17,34 plantes/ m²) (**Figure 04 «c»**). Durant cette année, la densité des plantes dicotylédones diminue de manière significative avec les stades de prélèvement : 26.52 plantes/ m² pour le premier stade de recensement, 21,28 plantes/ m² pour le deuxième stade de recensement et 12,53 plantes/ m² pour le troisième stade de recensement comme le montre la **figure 06 «c»**. Cela peut être expliqué par la longue période de sécheresse durant cette campagne. On a remarqué aussi que la densité des dicotylédones maximale est enregistrée dans les cultures légumières, à savoir la lentille et le pois fourrager par rapport aux céréales (blé et triticale) (**Figure 05 «c»**). Pendant la deuxième campagne (2017/18), la densité des dicotylédones a varié de manière

significative en fonction de système de travail du sol (**Figure 04 «c»**), où le TC a présenté une densité maximale avec 19,3 plantes/ m² comparé au SD (10 plantes/ m²). En revanche, le deuxième stade d'échantillonnage a marqué une densité maximale avec 16,11 plantes/ m² suivi respectivement par le premier et le troisième stade de recensement (**Figure 06 «c»**), parce qu'en stade 2, les précipitations sont importantes ce qui a favorisé le développement de la flore adventice. Durant la troisième campagne (2018/19), la densité des plantes dicotylédones a été significativement élevée dans le TC (17,68 plantes/ m²) comparé au SD (5,89 plantes/ m²). Durant cette troisième année, la densité des dicotylédones augmente du premier stade d'échantillonnage jusqu'au troisième (**Figure 06 «c»**). En résumé, la densité des dicotylédones maximale est notée chez le TC, ce résultat corrobore celle de **Zhang & Wu (2021)**. D'après **Debaeke & Orlando (1994)**, la levée des "M-H" de type dicotylédones est diminuée avec la réduction du travail du sol. Alors que le TC a marqué une densité maximale des M-H de type dicotylédones (**Matloob et al., 2015**).

La comparaison des moyennes de la densité des dicotylédones entre les cultures durant les trois campagnes agricoles montre que la densité des dicotylédones des légumineuses est supérieure à celle des céréales (**Tableau 17**). L'utilisation des herbicides sur les cultures céréalières a influé sur la réponse de la dynamique de la flore adventices (**Derksen et al., 1994**), contre la difficulté de désherbage sur les cultures des légumineuses.

D'une façon générale, la densité des espèces dicotylédones est plus élevée en TC, ce qui est en accord avec les conclusions de Derksen et al. (1993), également, la densité des plantes dicotylédones est diminuée fonction de l'avancement du stade de culture. Zhang & Wu (2021), ont montré que la diminution de densité des adventices au stade épiaison-floraison est liée au couvert dense de la culture.

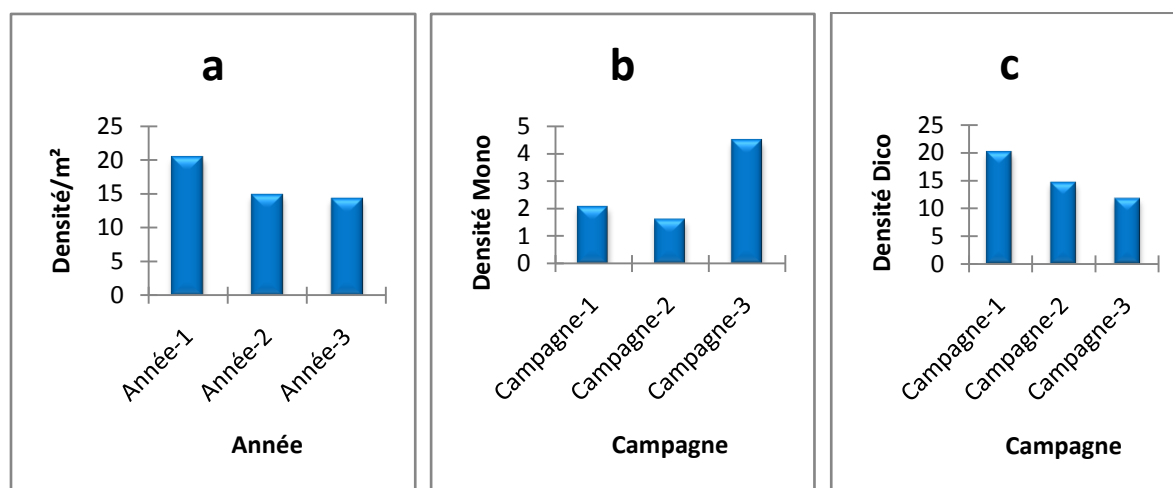


Figure 03: Densité totale des MH (a), densité des monocotylédones (b) et des dicotylédones (c) durant les trois années d'étude.

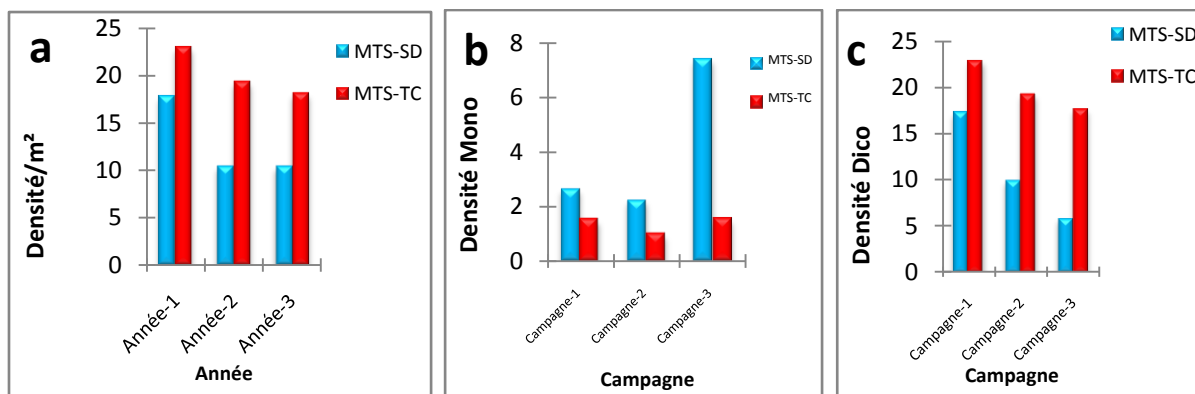


Figure 04: Densité totale des MH (a), la densité des monocotylédones (b) et des dicotylédones (c) en fonction du mode de travail du sol dans les trois années d'étude.

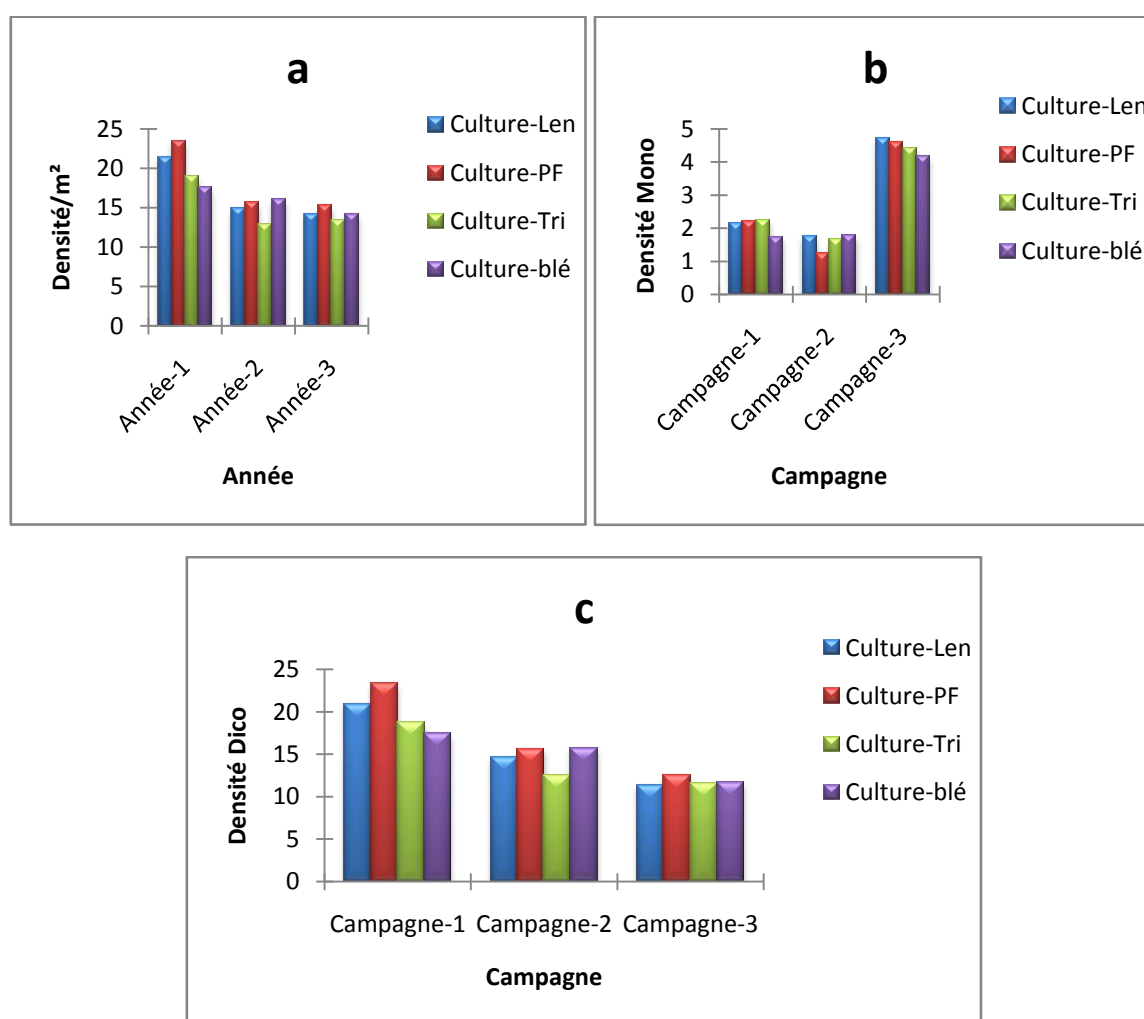


Figure 05 : Densité totale des MH (a), la densité des monocotylédones (b) et dicotylédones (c) en fonction du type de culture dans les trois années d'étude.

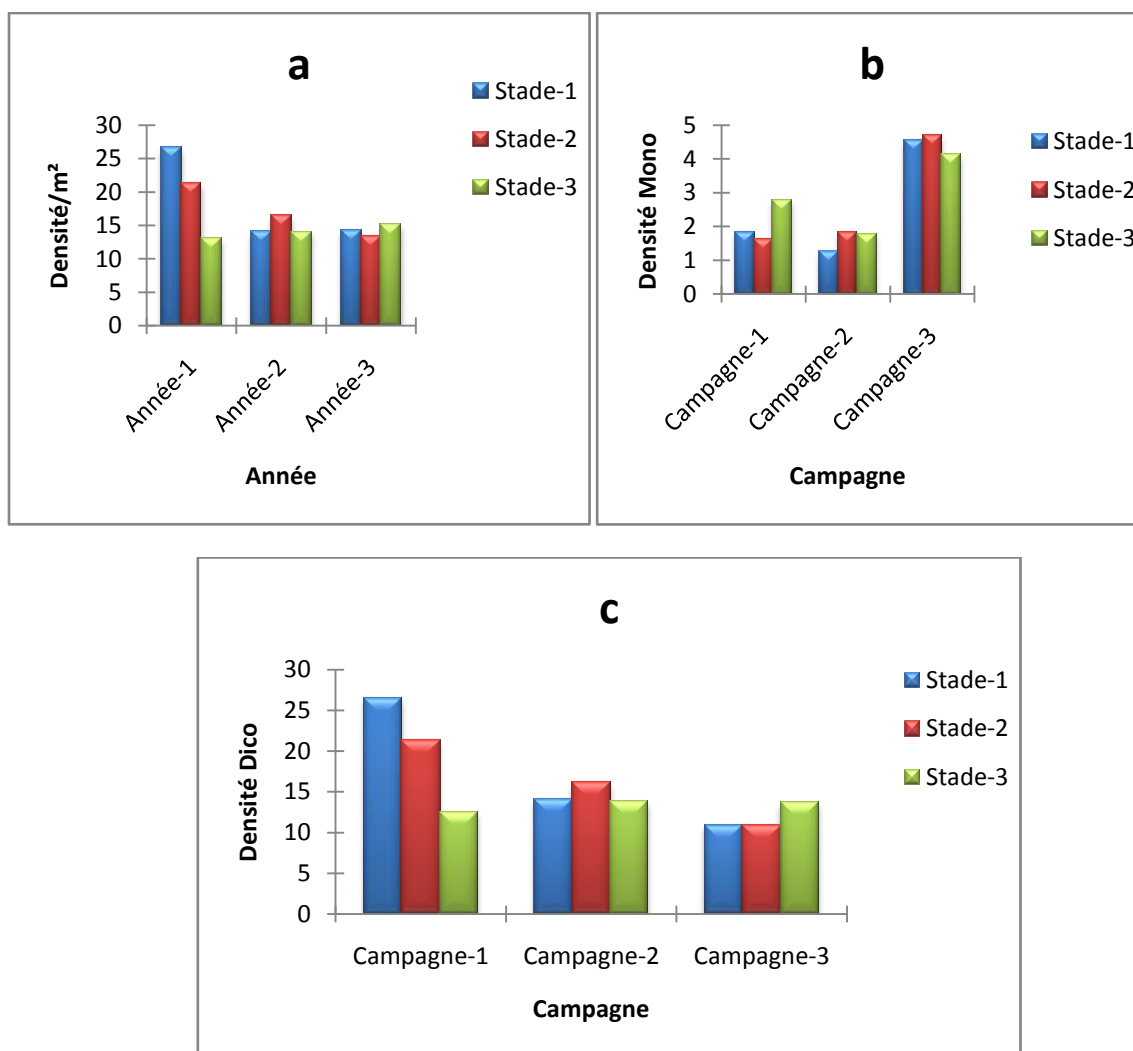


Figure 06 : Densité totale des MH (a), la densité des monocotylédones (b) et des dicotylédones (c) en fonction des stades d'échantillonnage dans les trois années d'étude.

3.4. Biomasse fraîche totale des M-H, de la biomasse des monocotylédones et des dicotylédones

a) Variation de la biomasse totale

La biomasse fraîche des M-H varie très hautement significativement sous l'effet de l'année ($P < 0,001$), ce résultat corrobore les résultats obtenus par **Smith & Gross (2007)**. La comparaison des moyennes entre les années a montré que la deuxième campagne a marqué une biomasse élevée (20,41 g/ m²) suivi par la troisième année avec 12,46 g/ m² et enfin la première campagne avec 11,11 g/ m² (**Figure 07 «a»**). La biomasse des M-H est influencée par les conditions météorologiques des saisons agricoles où on a enregistré une biomasse élevée en années pluvieuses. Durant ces trois années, les expérimentations dévoilent que le TC a enregistré une biomasse élevée comparée au SD (**Figure 08 «a»**). Ces résultats sont confirmés par les travaux d'**Auškalnienė et al. (2018)**, qui ont remarqué que le SD a enregistré une biomasse faible quelque soit l'augure de l'année. Egalement, les résultats de **Ghosh et al. (2022)**, qui ont montré que la biomasse des adventices était significativement plus élevée en TC ; cet est en contradiction avec les résultats de **Rahali et al. (2010)**, qui ont

détecté que le TC présente une biomasse faible. **Bilalis et al. (2001)**, a supposé que la croissance rapide des cultures dans le SD a réduit la croissance des M-H ce qui a réduit leur biomasse.

L'analyse de la variance a indiqué un effet culture très hautement significatif ($P < 0,001$) sur la biomasse fraîche des mauvaises-herbes. La moyenne des trois années montre que les cultures légumières (pois fourrager et lentille) ont une valeur maximale en biomasse des adventices comparée à celle des cultures céréalières (blé et triticale) qui ont été classées en troisième et quatrième rang (**Figure 09 «a»**). La faible biomasse des adventices en cultures céréalières (comme le triticale et le blé) est due à son forte activité allélopathique qui inhibe efficacement la croissance des adventices (**Saxena et al., 2016**). La difficulté de désherbage chimique dans les cultures de légumineuses induit par un développement complet des mauvaises-herbes ce qui a augmenté leur biomasse.

L'effet du stade de prélèvement est non significatif ($P > 0,05$), tandis que l'interaction des stades de prélèvement x système de travail du sol et stade de prélèvement x années sont hautement significatif ($P < 0,01$). En première campagne, le premier stade de recensement a marqué une biomasse élevée en deux modes de travail du sol. En deuxième campagne, le deuxième stade d'échantillonnage en TC et le premier stade de recensement en SD ont enregistré la biomasse la plus élevée. En troisième campagne, le deuxième stade de recensement qui a marqué une grande biomasse soit en TC ou en SD (**Tableau 17**). A souligner que l'humidité et les conditions environnementales favorables durant ces stades a permis à la croissance et le développement des adventices, ce qui traduit par une biomasse plus élevée.

b) Variation de la biomasse des monocotylédones

D'après l'ANOVA, le mode de travail du sol (MTS), la campagne et leur interaction, stade, ainsi que l'interaction campagne * stade et l'interaction MTS * campagne * stade ($P < 0,001$), affectent significativement la biomasse fraîche des monocotylédones. Cette paramètre a aussi significativement influencé par l'interaction culture * stade ($P < 0,05$).

La valeur maximale de la biomasse des monocotylédones est observée en SD (6,19 g/m²) comparé au TC (1,84 g/m²). Une augmentation de la biomasse fraîche a été remarquée à partir de la première campagne jusqu'à la troisième campagne (**Figure 07 «b»**). La biomasse des monocotylédones a été diminuée significativement sous l'effet de travail du sol : 50 % en campagne 2016/17, 75,85 % en deuxième campagne (2017/18) et 74,25 % en troisième campagne (2018/19) comme le montre la **figure 08 «b»**. **Matloob et al. (2015)** ont montré que la biomasse des mauvaises herbes monocotylédones est élevée en technique de SD.

Le stade d'échantillonnage n'a aucun effet significatif sur la biomasse des monocotylédones. La comparaison entre les stades de recensement durant les trois années agricoles d'expérimentation montre que le troisième stade de recensement avec 4,15 g/m² et le deuxième stade d'échantillonnage avec 3,82 g/m² et 9,37 g/m² ont donné une biomasse élevée des monocotylédones respectivement en année agricole : 2016/17, 2017/18 et 2018/19

(**Figure 10 «b»**) ; ce sont les stades ou les précipitations et les conditions météorologiques sont favorables à la croissance des monocotylédones.

Le type de culture ne présente aucun effet sur la biomasse des monocotylédones. Le classement des moyennes de l'interaction culture X stade de prélèvement a montré que la culture de triticale et de pois fourrager ont donné une biomasse élevée en deuxième stade d'échantillonnage tandis que le troisième stade d'échantillonnage a une biomasse élevée pour la lentille et le blé (**Tableau 17**).

c) Variation de la biomasse des dicotylédones

La biomasse des dicotylédones varie de manière hautement significative sous l'effet du type de culture ($P < 0,01$). Durant les trois campagnes agricoles, la culture du pois fourrager a une biomasse des dicotylédones élevée (14,66 g/ m²), suivi par la lentille et de blé avec des moyennes de 13,68 g/ m² et 11,92 g/ m² respectivement (**Figure 09 «c»**). Alors, la culture de triticale a enregistré une biomasse faible, avec une moyenne de 10,48 g/ m² (**Tableau 17**) ; cela est expliqué par le fait allélopathique du triticale qui inhibe le développement des M-H. L'absence de désherbage chimique spécifique pour les légumineuses a un effet important sur le développement des adventices et par conséquent une augmentation de la biomasse des adventices.

La **figure 08 «c»** montre la biomasse des dicotylédones est très hautement significativement ($P < 0,001$) affectée par le type de travail du sol. Une biomasse élevée a été enregistrée lorsque le sol est labouré, ce résultat corrobore à ceux de **Matloob et al. (2015)**. On note une diminution de la biomasse avec l'élimination des pratiques de travail conventionnel. Les taux de diminution de la biomasse sont : 27,19 % pour l'année 2016/17 ; 8,28 % pour la deuxième année (2017/18) et 64.13 % pour l'année 2018/19 (**Figure 08 «c»**).

La biomasse des dicotylédones dépend de manière très hautement significative ($P < 0,001$) de l'année. La **figure 07 «c»** montre qu'il y a une différence très importante entre les années d'étude ; la deuxième campagne (2017/ 2018) présente une biomasse élevée (19,80 g/ m²), alors qu'en première (2016/ 2017) et en troisième campagne (2018 /2019), où on a enregistré une moyenne de 10,42 g/ m² et 7,84 g/ m² respectivement. La valeur maximale obtenue en 2^{ème} campagne est due aux conditions environnementales favorables à la croissance des dicotylédones. En revanche, l'effet du stade de prélèvement sur la biomasse des dicotylédones est très hautement significatif ($P < 0,001$) pour la première et troisième campagne, en deuxième campagne l'effet est non significatif (**Figure 10 «c»**).

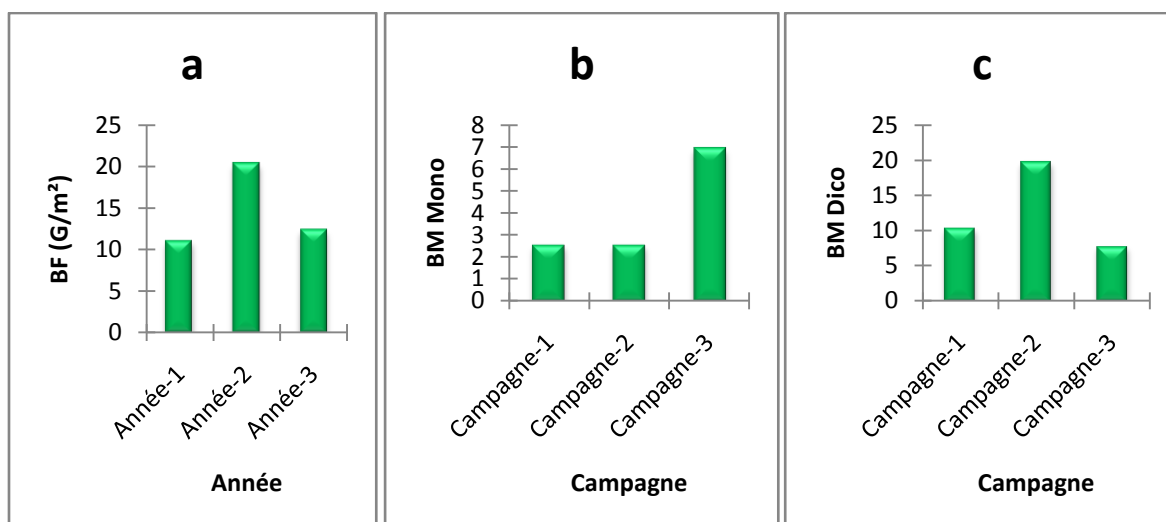


Figure 07: Biomasse totale des MH (a), la biomasse des monocotylédones (b) et dicotylédones (c) durant les trois campagnes d'étude.

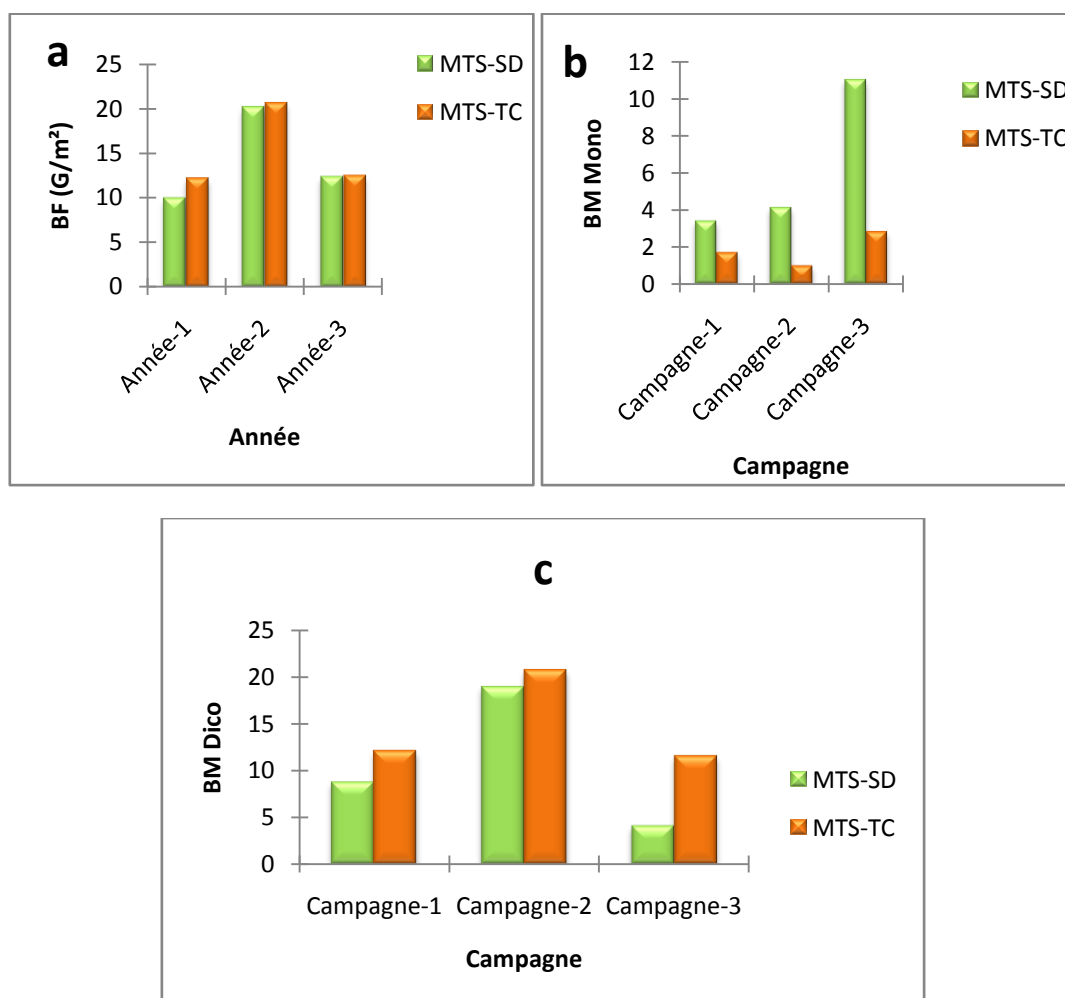


Figure 08: Biomasse totale des MH (a), de la biomasse des monocotylédones (b) et des dicotylédones (c) en fonction du type de travail du sol durant les 3 campagnes.

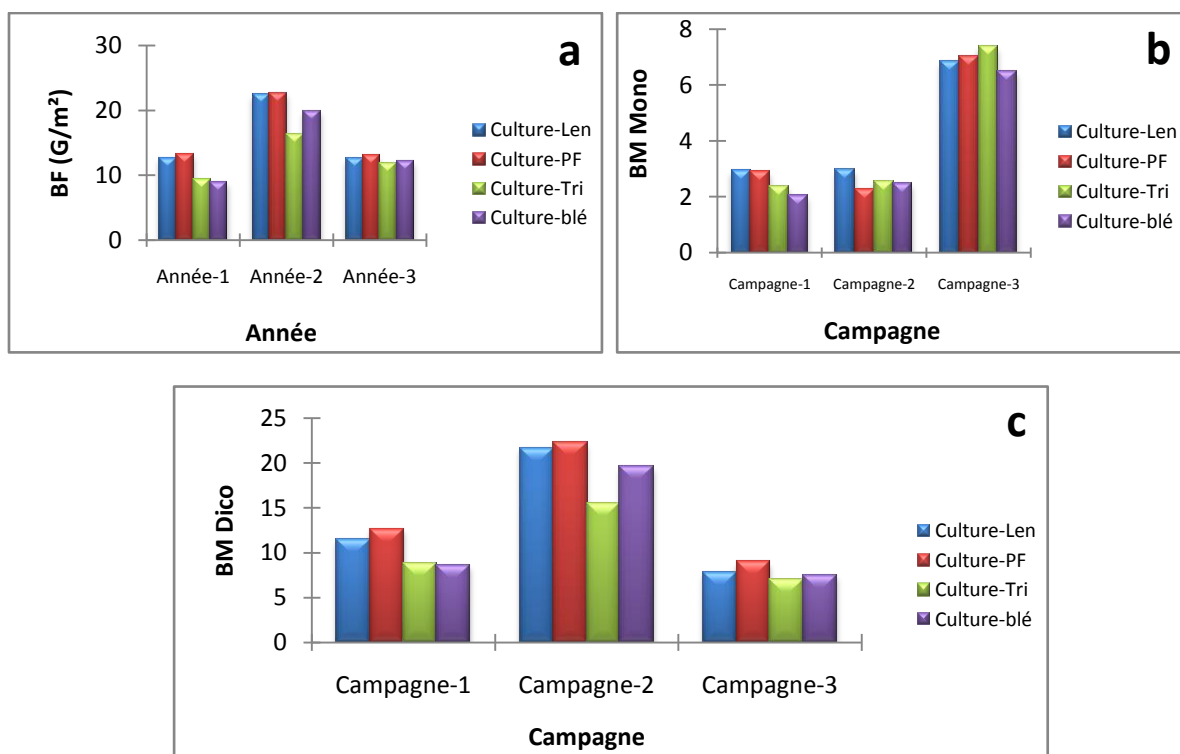


Figure 09 : Biomasse totale des MH (a), de la biomasse des monocotylédones (b) et des dicotylédones (c) en fonction des cultures durant les campagnes d'étude.

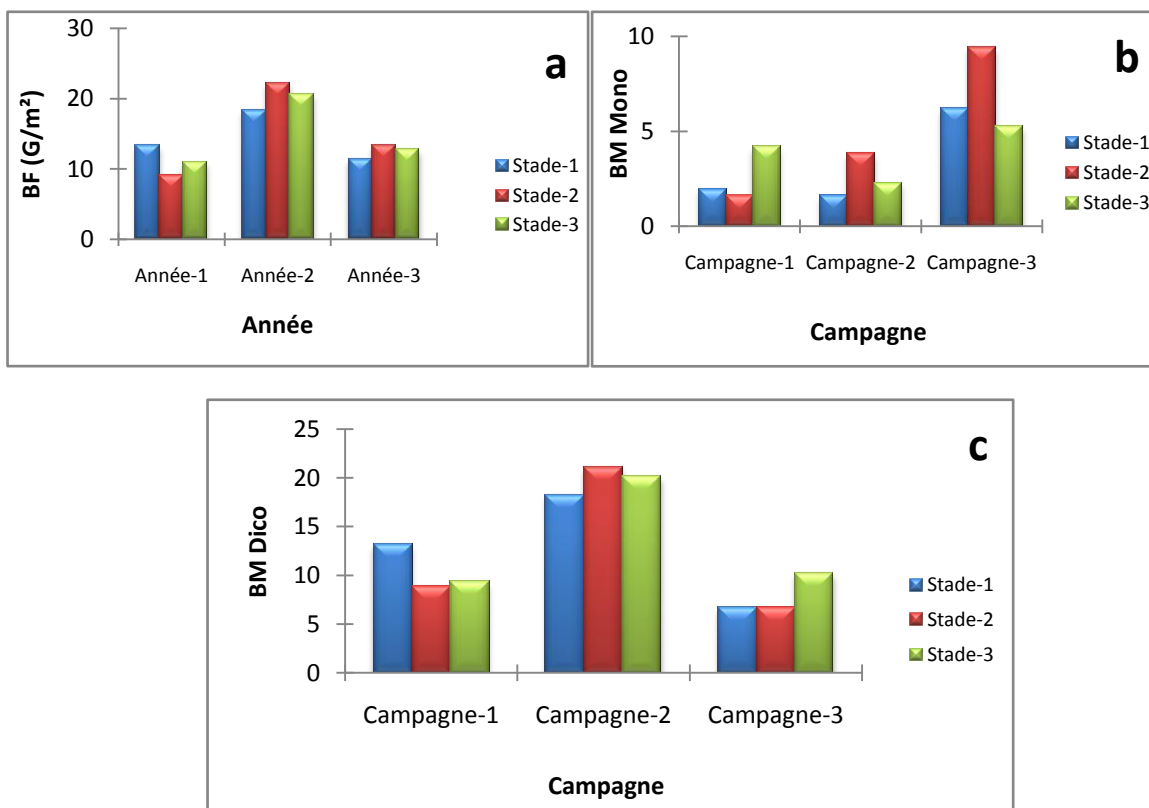


Figure 10: Biomasse totale des MH (a), de la biomasse des monocotylédones (b) et des dicotylédones (c) durant les trois stades de prélèvement.

3.5. Matière sèche totale, la matière sèche des monocotylédones et des dicotylédones

a) Matière sèche totale des MH

L'analyse de la variance a révélé un effet culture hautement significatif ($P < 0,01$) sur la matière sèche des M-H. En première campagne, la culture de pois fourrager et de la lentille ont enregistré une matière sèche élevée : 7,95 g/ m² et 7,47 g/ m² respectivement contre, la culture de triticales et de blé avec 5,40 g/ m² chacune. En deuxième campagne, la culture de pois fourrager a été classée en premier avec 11,99 g/ m² suivi par la culture de lentille avec 11,85 g/ m² puis la culture de blé (11,35 g/ m²) et en dernier la culture de triticales (8,74 g/ m²). En 3^{ème} campagne agricole, le triticales a enregistré la valeur maximale de matière sèche des M-H avec 7,95 g/ m², suivi par le pois fourrager (7,89 g/ m²), la lentille (7,83 g/ m²) et le blé (7,67 g/ m²) (**Figure 13 «a»**).

Un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) de l'année a été détecté sur la matière sèche ; l'année 2 a été enregistré une matière sèche élevée avec 10,89 g/ m², suivi par la troisième campagne (7,84 g/ m²) et la première campagne (6,55 g/ m²) comme le montre la **figure 11 «a»**. Alors, un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) a concerné l'effet du stade de prélèvement sur la matière sèche des M-H. Quant à l'effet des interactions du stade de prélèvement avec la MTS, l'année et la culture ont un effet significatif ($P < 0,05$) sur la matière sèche des MH. Les trois stades de prélèvement ont enregistré une matière sèche élevée en 2^{ème} campagne (**Figure 14 «a»**). Les campagnes agricoles 2016/17, 2017/18 et 2018/19 ont enregistré une matière sèche élevée durant les stades 1, 3 et 2 de prélèvement par ordre (**Figure 14 «a»**).

Le mode de travail du sol (MTS) n'a aucun effet significatif ($P > 0,05$) sur la matière sèche des M-H. En première campagne agricole, le TC a enregistré une matière sèche élevée comparé au SD (19,17 %) ; ce qui est en accord avec les résultats obtenus par **Ali et al. (2014)** ; **Sharma et al. (2023)**. En 2^{ème} et 3^{ème} campagne, le semis direct a obtenu des taux de matière sèche élevés comparé au TC (0,1 % et 13,23 % respectivement) (**Figure 12 «a»**). En première campagne, le premier et le troisième stade de recensement ont marqué une matière sèche élevée en TC et SD. En deuxième année, c'est le troisième stade de recensement qui a enregistré une matière sèche élevée soit en SD ou TC, tandis que le deuxième stade de recensement a enregistré une valeur élevée en MS en deux modes de travail du sol (TC et SD) pour la troisième campagne (**Tableau 17**). **Woźniak & Soroka (2018)** ont montré que la matière sèche des adventices est élevée en SD qu'en TC.

b) Matière sèche des monocotylédones (MS Mono)

L'analyse de variance montre que la modalité de travail du sol présente un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) sur la matière sèche des monocotylédones.

A travers les histogrammes de la **figure 12 «b»**, la comparaison des moyennes des essais montre que le SD a enregistré une MS élevée comparé à celle du TC. La différence entre les modes de travail du sol varie en fonction de l'année agricole avec des taux d'augmentation de : 47,76 % ; 67,32 % et 70,83 % respectivement pour 2016/17, 2017/18 et 2018/19.

La biomasse sèche des monocotylédones a varié de manière très hautement significative ($P < 0,001$) sous l'effet d'année. La comparaison des moyennes a montré l'existence de deux groupes, la troisième campagne enregistre une moyenne élevée ($4,96 \text{ g/m}^2$) ; c'est le groupe A, suivi par la première et la deuxième année, avec des moyennes respectives de ($2,04 \text{ g/m}^2$) et ($2,03 \text{ g/m}^2$) ; c'est le groupe B (**Figure 11 «a»**).

L'ANOVA a révélé un effet stade hautement significatif ($P < 0,01$) pour la matière sèche des monocotylédones. En première année, la MS est significativement variée en fonction du stade végétatif dont le troisième stade de recensement présente une matière sèche élevée. Cependant, en deuxième et troisième année, une MS élevée a été observée en deuxième stade de recensement avec $2,74 \text{ g/m}^2$ et $6,69 \text{ g/m}^2$ respectivement (**Figure 14 «b»**). Alors le type de culture n'a pas d'effet significatif ($P > 0,05$) sur la biomasse sèche des monocotylédones durant les trois années d'études (**Figure 13 «b»**)

c) Matière sèche des dicotylédones

L'analyse de la variance a montré que le type de travail du sol a un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) sur la matière sèche des dicotylédones. La comparaison des moyennes montre que le TC présente une biomasse sèche des dicotylédones élevée dans les trois campagnes agricoles. Le taux d'augmentation de la matière sèche sous le labour est de : $32,31 \%$ en 2016/17, $9,75 \%$ en 2017/18 et de $59,60 \%$ en 2018/19 (**Figure 12 «c»**).

Les analyses statistiques ont révélé un effet année très hautement significatif ($P < 0,001$) sur la matière sèche des dicotylédones. On souligne que la deuxième année a enregistré une biomasse sèche élevée avec $10,45 \text{ g/m}^2$, suivie par la première année ($5,99 \text{ g/m}^2$) et enfin la troisième année avec $5,53 \text{ g/m}^2$ (**Figure 11 «c»**).

La matière sèche des dicotylédones a varié très hautement significativement ($P < 0,001$) sous effet type de culture. Durant les trois années d'étude. Le pois fourrager a enregistré une matière sèche élevée avec une moyenne de $7,96 \text{ g/m}^2$, suivi par la culture de lentille ($7,37 \text{ g/m}^2$), le blé ($6,77 \text{ g/m}^2$) et le triticale ($5,87 \text{ g/m}^2$) (**Figure 13 «c»**).

La **figure 14 «c»** montre que les stades de prélèvement et leur interaction avec l'année ont un effet significatif ($P < 0,05$) sur la matière sèche des dicotylédones. Durant la première campagne, le premier stade de recensement a enregistré une matière sèche élevée avec $6,97 \text{ g/m}^2$, alors le troisième stade 3 a marqué une matière sèche élevée en deuxième et troisième campagne ($13,07 \text{ g/m}^2$) et ($6,13 \text{ g/m}^2$) respectivement.

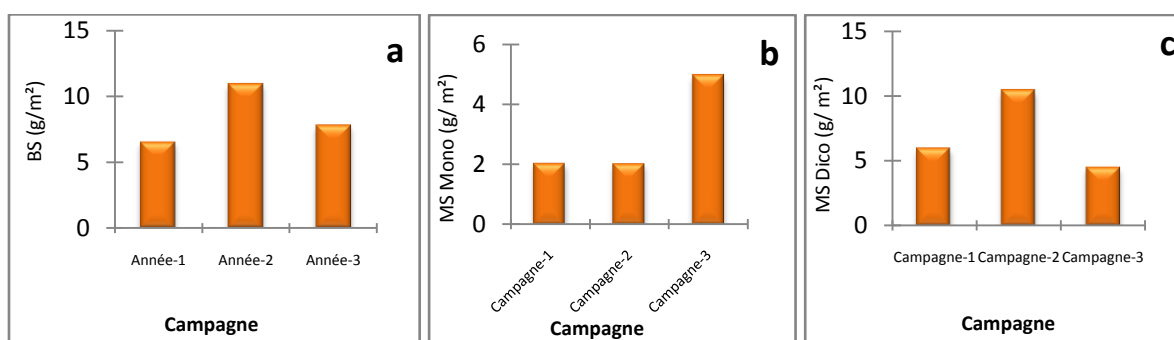


Figure 11 : Matière sèche totale des adventices (a), des monocotylédones (b) et dicotylédones (c) lors des trois campagnes d'étude.

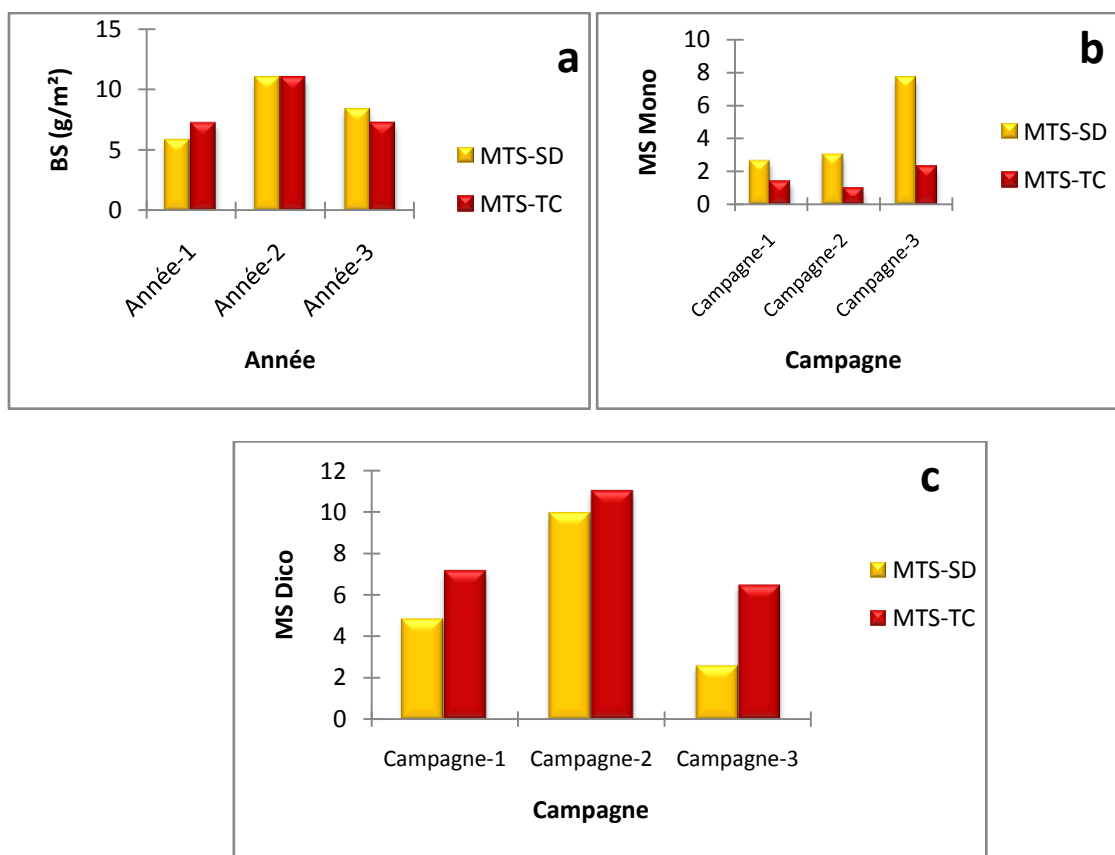


Figure 12 : Matière sèche des MH (a), des monocotylédones (b) et des dicotylédones (c) en fonction du type de travail du sol par année d'étude.

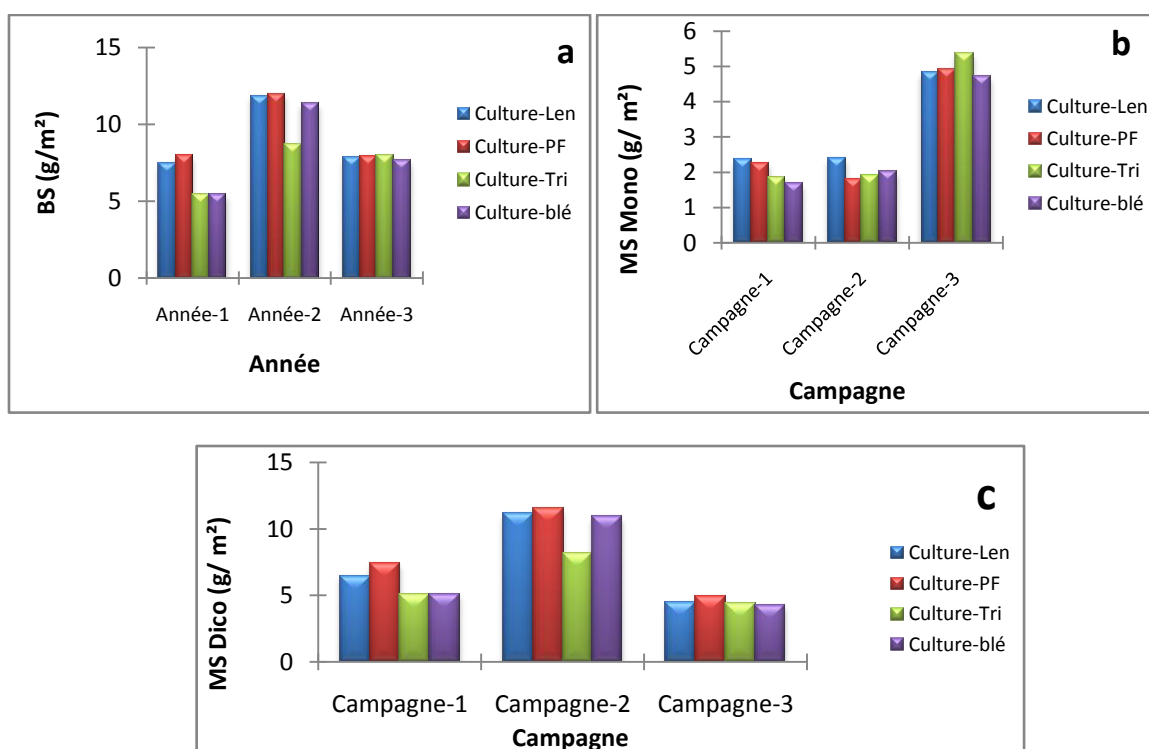


Figure 13 : Matière sèche des MH (a), monocotylédones (b) et des dicotylédones (c) en fonction des cultures par année d'étude.

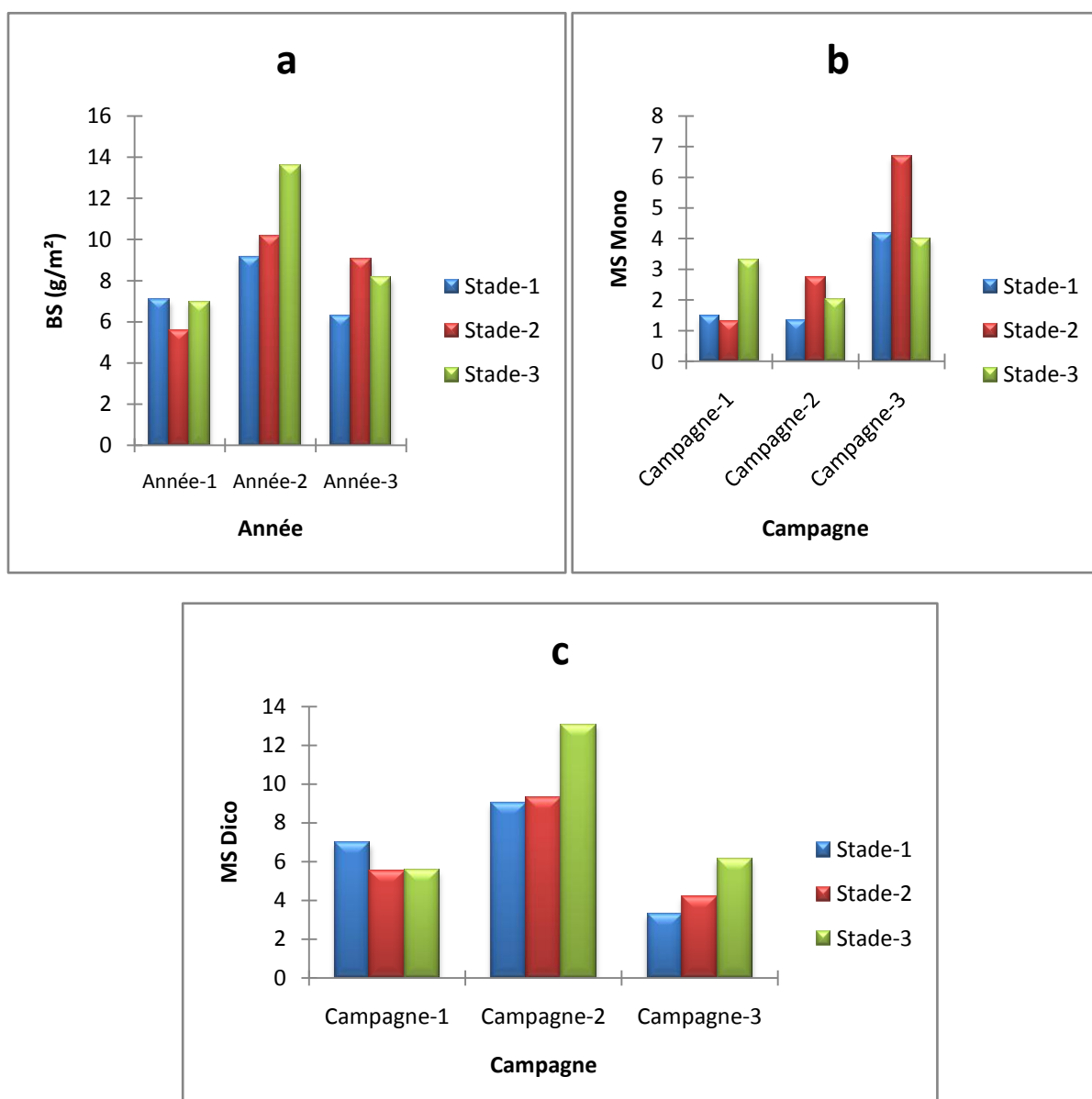


Figure 14: Matière sèche des MH (a), des monocotylédones (b) et des dicotylédones (c) en fonction des stades de prélèvement par année d'étude.

Tableau.17: Densité, Biomasse fraîche et matière sèche des M-H, des monocotylédones et des dicotylédones sous l'effet du mode de travail du sol, de cultures et de stades de prélèvement.

Cult ure	Para mètre	Semis direct									Travail conventionnel								
		Campagne 1			Campagne 2			Campagne 3			Campagne 1			Campagne 2			Campagne 3		
		S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
Blé	D	20,44	17,51	8,18	13,88	13,32	8,97	8,24	6,58	12,63	26,18	17,58	15,67	18,03	23,73	18,27	21,74	18,33	17,66
	DM	1,96	1	3,66	1,77	2,32	3,66	8,24	6,29	7,47	1,41	1	1,41	1	1	1	1	1	1
	DD	20,36	17,51	7,32	13,77	13,14	7,53	1	1,87	9,26	26,15	17,58	15,63	18,03	23,73	18,27	21,74	18,33	17,66
	BF	12,87	3,45	7,23	28,13	24,29	17,11	13,15	14,23	11,10	11,89	6,71	11,96	13,26	21,35	15,83	10,77	10,74	13,41
	BMM	2,07	1	4,86	2,65	4,86	4,36	13,15	13,24	9,45	1,56	1	1,72	1	1	1	1	1	1
	BMD	12,72	3,45	5,26	27,93	23,67	15,44	1	3,92	5,45	11,81	6,71	11,84	13,26	21,35	15,83	10,77	10,74	13,41
	MS	6,27	2,43	5,46	16,90	10,35	12,48	9,14	8,73	8,32	6,51	4,33	7,38	7,23	10,07	11,1	5,60	5,89	8,31
	MSM	1,53	1	3,88	1,81	3,43	3,83	9,14	8,66	7,40	1,21	1	1,48	1	1	1	1	1	1
	MSD	6,17	2,43	3,88	16,78	9,71	10,61	1	1,39	3,60	6,48	4,33	7,26	7,23	10,07	11,10	5,60	5,89	8,31
	D	18,55	15,52	10,83	10,35	7,70	5,2	7,33	10,4	15,87	32,16	21,65	14,71	13,03	22,56	18,47	14,44	15,00	17,19
Triticale	DM	1	2,92	2,91	1,24	3,99	1,82	6,29	7,35	7,33	2,58	2,75	1,41	1	1	1	1	2,75	1,67
	DD	18,55	15,23	10,40	10,32	6,28	5,03	3,09	6,82	13,43	32,05	21,50	14,67	13,03	22,56	18,47	14,44	14,68	17,11
	BF	11,48	3,31	7,87	18,72	15,55	11,80	11,03	14,94	13,09	13,00	9,11	11,44	9,89	26,12	16,28	7,33	11,88	12,95
	BMM	1	2,05	3,74	1,54	9,54	1,34	10,63	14,61	8,44	2,71	3,14	1,78	1	1	1	1	8,21	1,43
	BMD	11,48	2,75	6,66	18,63	10,69	11,76	2,16	2,89	9,58	12,70	8,24	11,30	9,89	26,12	16,28	7,33	7,23	12,88
	MS	5,52	2,33	4,75	9,38	8,33	6,51	7,20	10,75	8,95	7,37	5,94	6,48	5,28	11,90	11,06	3,29	11,59	5,91
	MSM	1	1,55	2,86	1,24	5,93	1,28	7,04	10,54	6,69	1,98	2,18	1,55	1	1	1	1	5,72	1,18
	MSD	5,52	2,01	3,70	9,31	4,96	6,46	1,44	2,15	5,42	7,17	5,60	6,33	5,28	11,90	11,06	3,29	8,15	5,88
	D	26,52	26,16	8,06	6,48	8,37	10,51	9,36	8,29	8,01	28,84	22,54	16,39	18,15	26,35	19,42	22,72	20,68	16,33
	DM	2,04	1,55	5,86	1,79	2,11	3,74	9,14	8,02	6,18	1,41	1	1	1	1	1	1,67	2,33	1
Lentille	DD	26,42	26,13	5,63	6,14	8,02	9,64	1,87	1,87	4,60	28,81	22,54	16,39	18,15	26,35	19,42	22,67	20,41	16,33
	BF	14,07	11,63	11,59	16,59	15,47	27,26	11,16	11,34	10,81	12,68	14,03	12,45	21,57	29,72	24,14	13,48	16,16	12,75
	BMM	2,15	1,44	10,53	3,13	4,16	7,45	11,03	11,26	10,02	1,46	1	1	1	1	1	2,34	5,47	1
	BMD	13,85	11,54	4,64	15,48	14,52	24,80	1,80	1,57	3,62	12,60	14,03	12,45	21,57	29,72	24,14	13,19	13,92	12,75
	MS	6,71	6,45	8,64	8,63	6,87	16,56	7,04	7,84	7,91	7,27	8,72	7,03	8,6	14,02	16,43	6,03	10,37	7,82
	MSM	1,58	1,21	8,20	2,31	3,02	6,07	7,01	7,81	6,47	1,24	1	1	1	1	1	1,53	5,22	1
	MSD	6,56	6,42	2,78	7,77	5,88	14,19	1,25	1,23	3,55	7,21	8,72	7,03	8,60	14,02	16,43	5,89	7,39	7,82
	D	28,69	18,54	14,36	19,14	10,15	11,12	10,86	10,62	17,01	31,37	31,32	16,65	14,11	18,88	20,60	19,79	17,07	16,10
	DM	2,94	1,41	4,52	1,24	2,18	1	8,15	6,90	7,41	1,41	1,41	1	1	1	1	1	3,08	1
	DD	28,49	18,52	13,58	19,10	9,93	11,12	5,77	6,25	14,77	31,34	31,30	16,63	14,11	18,88	20,60	16,01	16,74	16,10
Pois Fourrager	BF	15,32	8,71	12,39	24,85	16,37	25,89	10,17	12,18	15,57	15,21	15,27	12,91	13,94	28,66	27,09	13,46	14,95	12,41
	BMM	3,12	1,36	7,78	1,65	7,98	1	9,26	11,63	9,63	1,59	1,73	1,80	1	1	1	1	9,59	1
	BMD	14,87	8,66	9,46	24,71	13,80	25,89	3,33	2,52	11,77	15,11	15,16	12,81	13,93	28,66	27,09	13,46	10,32	12,41
	MS	8,45	4,99	8,32	11,19	8,16	16,52	6,03	8,56	10,22	8,58	9,55	7,79	6,09	11,83	18,19	6,07	8,75	7,74
	MSM	2,13	1,17	6,08	1,33	5,51	1	5,70	8,30	7,37	1,24	1,42	1,54	1	1	1	1	6,24	1
	MSD	8,17	4,96	5,55	11,06	5,72	16,52	1,84	1,72	6,73	8,52	9,47	7,70	6,09	11,83	18,19	6,07	5,46	7,74

D : densité ; DM : densité monocotylédone ; DD : densité dicotylédone ; BF : biomasse fraîche ; BMM : biomasse monocotylédones ; BMD : biomasse dicotylédone ; MS : matière sèche totale ; MSM : matière sèche monocotylédone ; MSD : matière sèche dicotylédone.

3.6. Richesse des espèces des adventices «R»

L'année a un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) sur la richesse en espèces des MH. La deuxième campagne a exprimé une valeur de R élevée avec une moyenne de 3,72 espèces, suivi par la première campagne avec une valeur de 3,56 espèces et enfin la troisième campagne avec une moyenne de 2,51 espèces (**Figure 15 «a»**). Et donc en deuxième campagne agricole, les conditions de températures et d'humidité sont favorables au développement et l'apparition de nouvelles espèces des MH.

Le mode de travail du sol n'a aucun effet significatif ($P > 0,05$) sur la richesse des mauvaises-herbes ; en moyenne le TC est premier avec une valeur de 3,33 espèces contre 3,19 espèces pour SD. En revanche l'effet de l'interaction MTS x années est très hautement significatif ($P < 0,001$). En première et troisième campagne, le TC a enregistré des moyennes élevées (3,72 et 3 espèces) respectivement contre (3,39 et 2,03 espèces) pour le SD. En deuxième campagne, le SD est en tête avec une moyenne de 4,17 contre 3,28 espèces pour le TC (**Figure 15 «b»**). Nos résultats sont contradictoires avec ceux de **Govindasamy et al. (2020)**, où ils ont remarqué que la richesse en espèces était relativement élevée en SD comparé au TC. Selon **Ulber et al. (2009)**, la rotation des cultures dans le système de travail du sol conventionnel pourrait seulement contribuer à augmenter la richesse en MH.

ANOVA a révélée un effet non significatif ($P > 0,05$) du type de culture sur la richesse des adventices. La comparaison des moyennes a montré que le pois fourrager et la lentille ont exprimé un nombre d'espèces adventices élevé avec une moyenne de 3,50 espèces suivi par le

triticale (3,09 espèces) et le blé (2,96 espèces) (**Figure 15 «c»**). D'après **Nichols et al. (2015)**, chaque culture applique un ensemble unique de contraintes biotiques et abiotiques sur la communauté et la dynamique des M-H ; cela favorise la croissance de certains types de MH toute en inhibant d'autres espèces. L'augmentation des espèces adventices en cultures légumières peut être expliquée par la levée de la dormance de certaines plantes adventices probablement en raison du nitrate due à la fixation d'azote atmosphérique par les légumineuses (**Mhlanga et al., 2015**).

Le stade de prélèvement et leur interaction avec l'année ont un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) sur la richesse en espèces d'adventices. Durant la première campagne, cette richesse diminue du premier stade de recensement jusqu'au troisième stade de recensement (**Figure 15 «d»**) par l'effet d'une sécheresse sévère durant cette campagne. En deuxième et troisième campagne agricole, le deuxième stade de recensement est se place premier avec une moyenne de 5,46 et 2,79 espèces respectivement (**Figure 15 «d»**). L'analyse de l'interaction MTS x stades de recensement a montré un effet hautement significatif ($P < 0,01$) ; ce qui est en accord avec les résultats de **Zhang & Wu (2021)**. Le premier stade de recensement qui a exprimé une valeur élevée dans les deux modes de travail du sol en première campagne. En deuxième campagne, c'est le deuxième stade de recensement qui accapare la première place pour les deux techniques de travail du sol. Le deuxième stade d'échantillonnage et le troisième stade d'échantillonnage ont enregistré une grande valeur de R en TC et SD respectivement en troisième campagne (**Tableau 18**). Selon **Woźniak (2018)**, la plus part des espèces des MH sont apparue dans la seconde moitié de la saison végétative des cultures et ont subi un cycle complet de développement sur le champ.

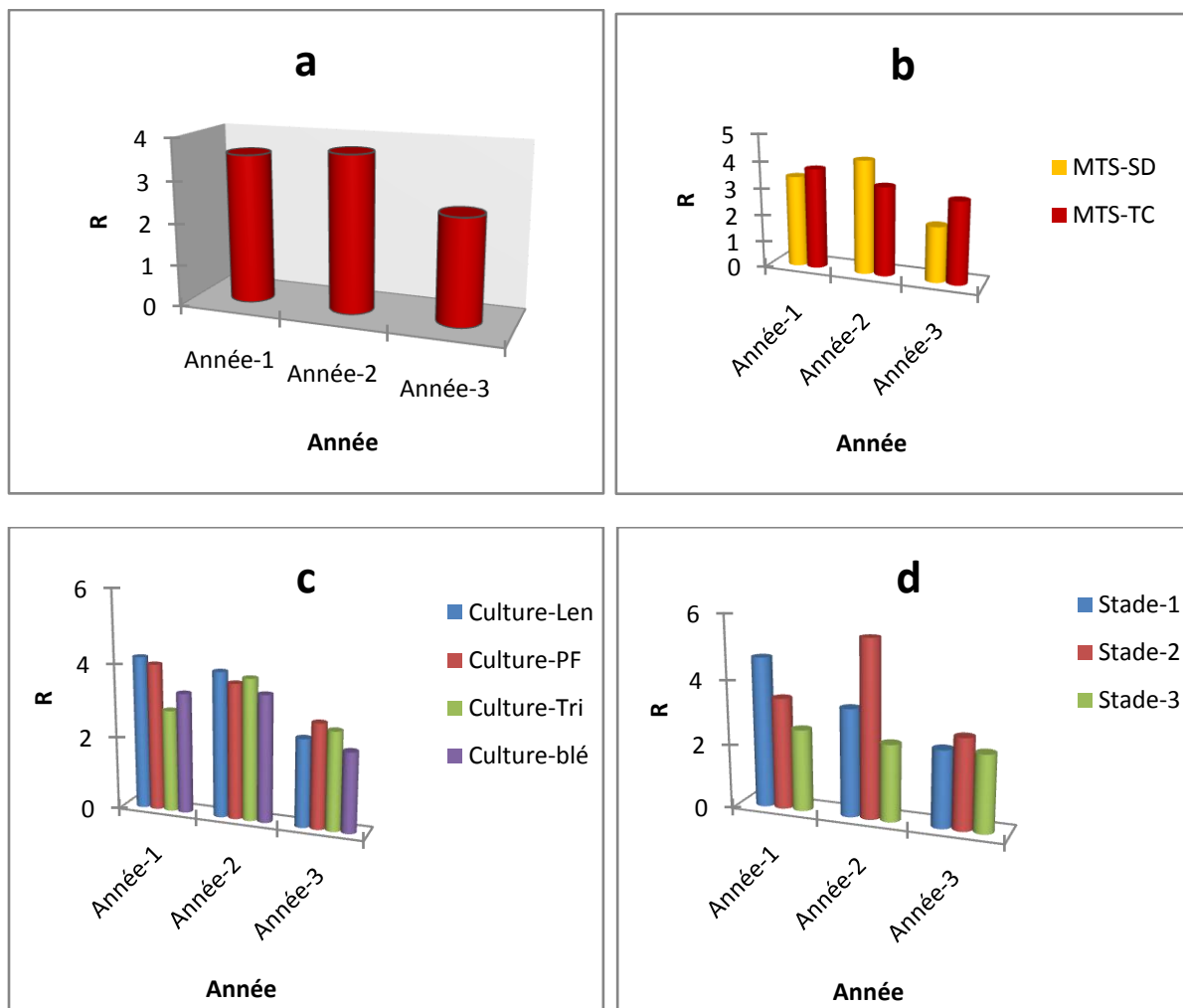


Figure 15 : R iche des espèces des adventices en fonction d'année (a), système de travail du sol (b), culture (c) et du stade de prélèvement (d).

3.7.Indice de Shannon-Wiener (H')

La valeur de l'indice de Shannon-Wiener élevée indique que nombreuses espèces rares étaient présentes (**Hosseini et al., 2014**) et donc une grande diversité (**Murphy et al., 2006**).

L'analyse de la variance de l'effet des campagnes agricoles sur l'indice de Shannon-Wiener indique que l'expression de cet indice varie très hautement significatif ($P < 0,001$) entre les années agricoles; passant d'une valeur moyenne de 1,29 en deuxième campagne à 1,18 pour la première campagne à 1,16 pour la troisième campagne (**Figure 16 «a»**). On souligne qu'au cours de la deuxième année, les précipitations sont supérieures à la moyenne ; ce qui a créé des conditions favorables à la germination des semences des M-H et favorise l'apparition et le développement des nouvelles espèces, ce qui a pu expliquer la valeur de H' élevée.

Le type de culture n'a aucun effet significatif ($P > 0,05$) sur l'indice H' . En revanche, l'interaction de l'année avec les cultures a indiqué un effet significatif ($P < 0,05$). En première campagne, les cultures légumières: lentille et pois fourrager ont exprimé une valeur élevée de l'indice H' (1,22 et 1,21 respectivement) contre 1,16 et 1,12 pour les cultures de céréales : blé

et triticales (**Figure 16 «c»**). En deuxième et troisième campagne, le triticale et la lentille ont été classés en premières positions, suivi par le blé et PF (**Tableau 18**). Donc, on peut conclure que la compétitivité des cultures au M-H varie en fonction des conditions climatiques (**Moghaddam et al., 2011**), de la banque de semences dans le sol et du précédent culturale. Les cultures de triticale et de blé sont des cultures allélopathiques, qui exercent un effet inhibiteur sur les mauvaises herbes par des substrats sécrétés par leurs racines ou les résidus de cultures en surface qui devient un obstacle à l'apparition de nouvelles espèces.

L'analyse de variance de l'effet du mode de travail du sol sur l'indice H' indique qu'il est non significatif ($P > 0,05$) ce qui est en accord avec les résultats de **Plaza et al. (2011)**, tandis que l'interaction année x MTS a un effet hautement significatif ($P < 0,01$). La **figure 16 «b»** montre qu'en première et troisième campagne, le TC est premier comparé au SD, en deuxième campagne, le SD présente une expression de H' élevée (1,34) contre (1,2) pour le TC. En générale, le SD présente une diversité faible ; ce qui a montré qu'après un certain temps d'adoption du SD, la diversité des espèces des M-H diminue. Ce ci a été conclu par **Hossain et al. (2021)**, où ils ont montré qu'après 5 ans d'application de SD, la diversité des espèces adventices diminue de 11 %. **Feledyn-Szewczyk et al. (2020)** ont trouvé que dans certains cas le système de travail du sol simplifié a entraîné une réduction de diversité des communautés des adventices par rapport au TC en raison de la dominance de certaines espèces des M-H.

L'analyse de la variance a révélé un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) pour le facteur stade d'échantillonnage sur H' . La comparaison entre les stades de recensement par campagne agricole a montré que l'indice de Shannon-Wiener a une expression majeure en premier stade de recensement de la première campagne agricole contre le deuxième stade de recensement de deux dernières campagnes (**Figure 16 «d»**). Une grande diversité des espèces adventices est observée en stade de floraison ce qui suggère que le meilleur moment d'observation de la composition des plantes adventices est le stade de floraison (**Zhang & Wu, 2021**). L'analyse de variance de l'interaction MTS x stades d'échantillonnage révélée un effet très hautement significatif ($P < 0,001$). En première campagne, les stades d'échantillonnage 1 et 3 ont exprimé une valeur de H' élevée pour le TC et SD respectivement. En deuxième campagne, c'est le deuxième stade de recensement qui a exprimé la valeur la plus élevée de H' pour les deux modes de travail du sol. Pour la troisième campagne, c'est le deuxième stade de recensement pour le TC et le troisième stade d'échantillonnage pour le SD (**Tableau 18**).

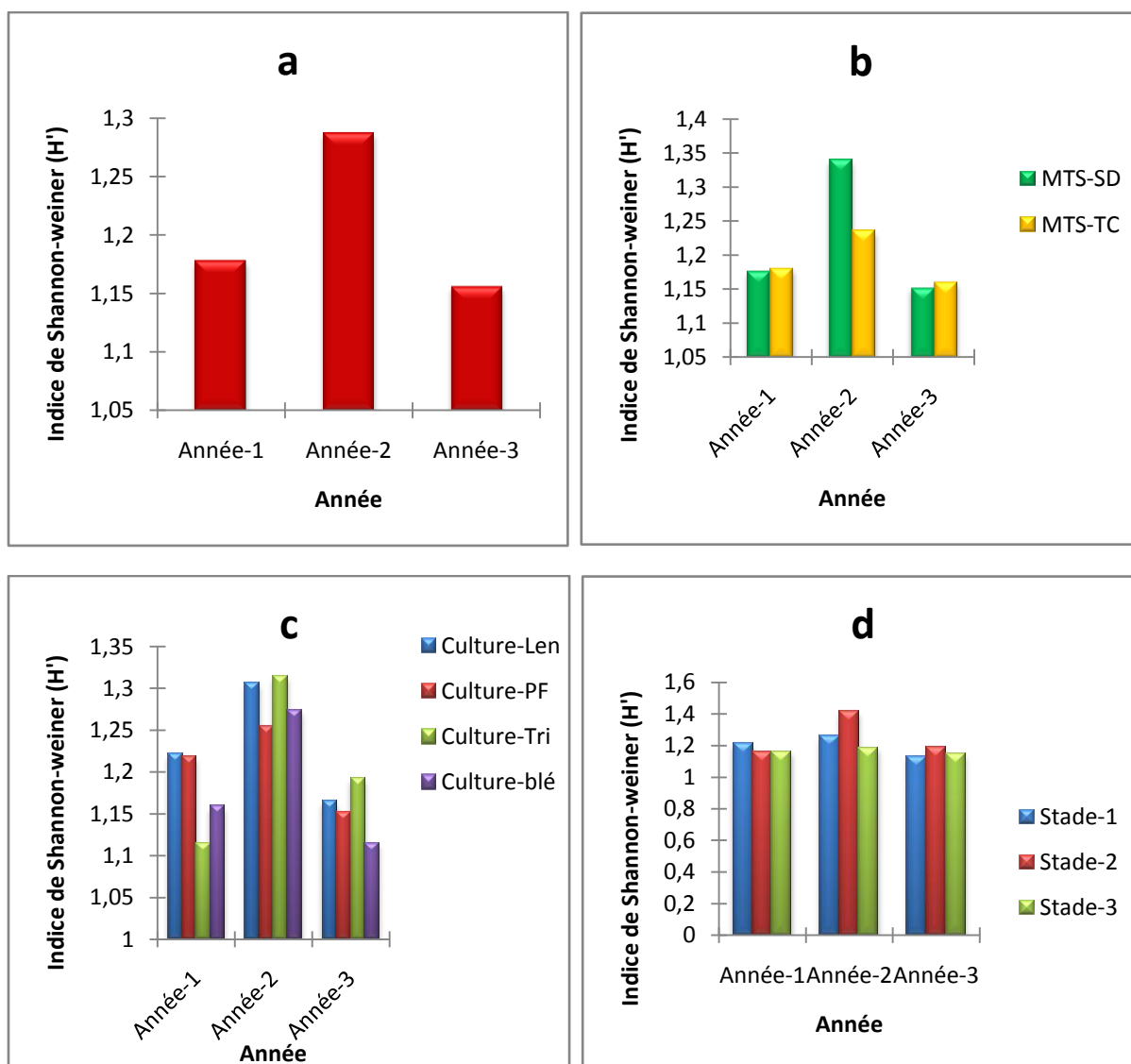


Figure 16: Indice de Shannon-Wiener «H'» en fonction de : (a) l'année agricole, (b) de système de travail du sol, (c) des cultures et (d) les stades d'échantillonnage.

3.8. Indice de Simpson (C)

L'indice de Simpson se situe entre 0 et 1, alors les valeurs élevées de cet indice indiquent une forte dominance par une ou quelques espèces et une faible diversité (**Topham & Lowson, 1982**). Il faut noter que de notre cas l'indice de Simpson est supérieur à 1, à cause qu'on a transformé les données.

L'analyse de la variance de l'indice de Simpson (C) montre un effet hautement significatif ($P < 0,01$) pour le système de travail du sol et le stade de prélèvement et un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) pour l'année.

L'étude des valeurs moyennes de l'indice de Simpson pour l'effet de l'année fait apparaître deux groupes homogènes. Le premier groupe est représenté par la deuxième année qui affiche une moyenne élevée (1,17) suivi par la première année (1,1) et en dernière position

la troisième année (1,09). La première et la troisième année constituent le deuxième groupe (**Figure 17 «a»**).

Pour l'interaction année x stade de prélèvement, l'analyse de la variance a montré un effet très hautement significatif ($P < 0,001$). Dans la première campagne, nous avons constaté une régression indice de Simpson du premier stade au troisième stade de recensement. Les valeurs de l'indice (C) pour stade de recensement 1, 2 et 3 sont respectivement de: 1,11 ; 1,09 et de 1,10. Par contre en deuxième campagne, le deuxième stade ayant une forte expression de l'indice de Simpson (1,23) comparé au premier et troisième stade de recensement avec 1,15 et 1,12 respectivement. Pour la troisième campagne, l'indice de Simpson était de 1,11 en deuxième stade de recensement; 1,09 en troisième stade d'échantillonnage et de 1,08 en premier stade de recensement (**Figure 17 «d»**).

En conclusion, les résultats des trois campagnes montrent que l'indice de Simpson observé en SD était supérieur à ce observé en TC, ce qui est en accord avec les résultats de **Haliniavz et al. (2014)** et ceux de **Feledyn-Szewczyk et al (2020)** ; cela peut être due à l'absence de perturbation du sol et la présence des résidus qui sont des obstacles au développement et l'apparition des nouvelles espèces. L'expression maximum de l'indice (C) était en deuxième année pour les deux modes de travail du sol suivi par la première année puis la troisième année (**Figure 17 «b »**). L'analyse de la variance a détecté un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) de l'interaction MTS x stade de prélèvement. D'une façon générale, le SD a exprimé un indice de Simpson élevé en troisième stade d'échantillonnage contre le deuxième stade d'échantillonnage pour le TC (**Tableau 18**).

Pour le type de culture, aucune différence significative n'a été détectée ($P > 0,05$) sur l'indice de Simpson (C). Tandis que l'interaction année x cultures a un effet significatif sur (C) ($P < 0,05$). La culture de lentille présente une valeur de (C) élevée (1,14), suivi par le triticales (1,12), le pois fourrager (1,12) et le blé (1,11). La comparaison des moyennes de l'indice de Simpson des cultures dans les trois campagnes montre que toutes les cultures ont exprimé un indice de Simpson maximale en deuxième campagne (**Figure 17 «c»**).

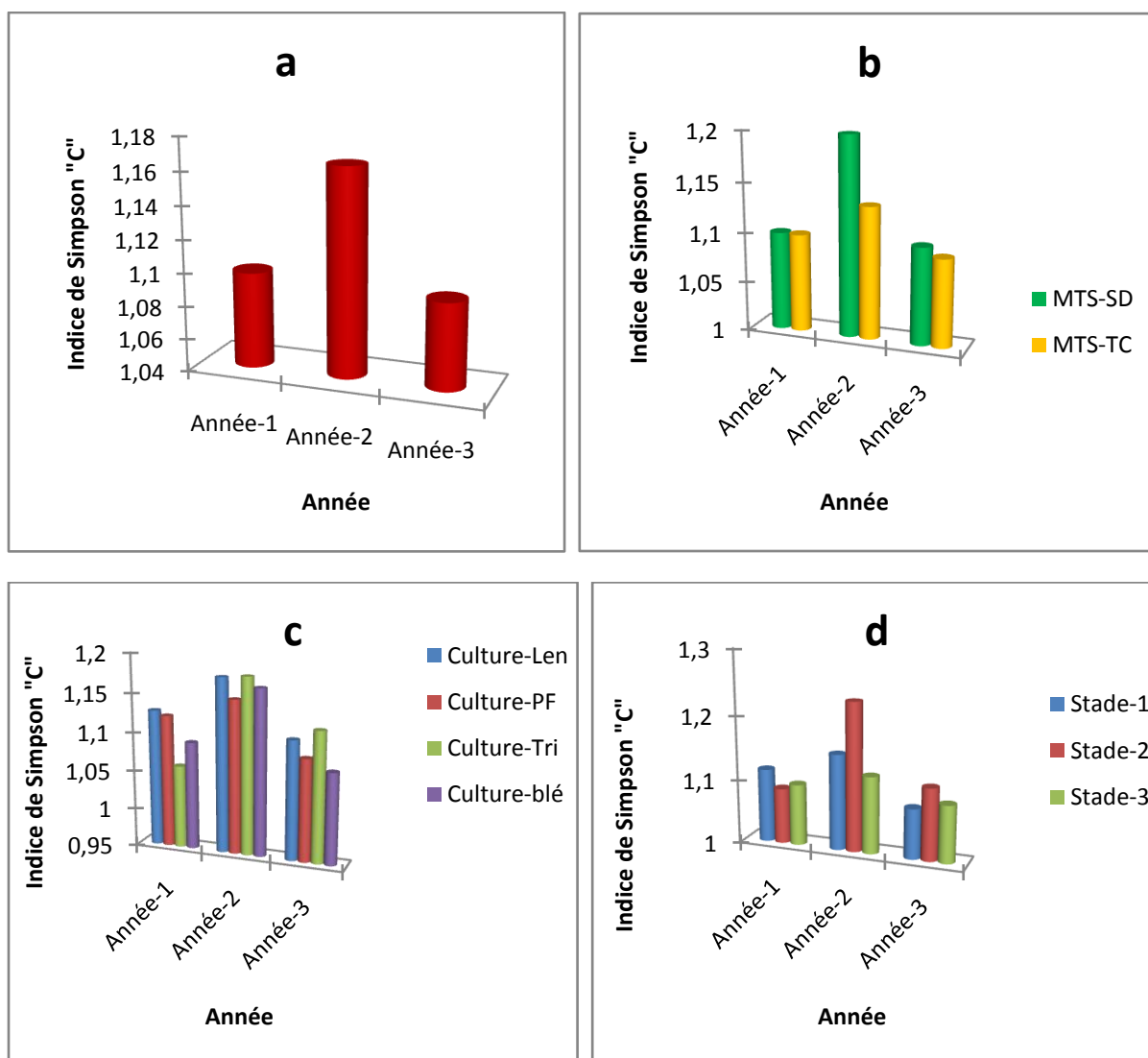


Figure 17 : Indice de Simpson «C» en fonction de la campagne agricole (a), système de travail du sol (b), de la culture (c) et du stade d'échantillonnage (d).

3.9. Indice de Peilou (J)

Une plus grande valeur de "J" signifie une plus grande uniformité entre les abondances des espèces des adventices (Mhlanga et al., 2015).

L'indice de Peilou "J" a montré une différence très hautement significative ($P < 0,001$) sous l'effet d'année. la comparaison des moyennes a montré que la deuxième campagne agricole a exprimé une valeur de "J" élevée avec une moyenne de 1,23 suivi par la troisième campagne avec une moyenne de 1,15 et en dernier lieu la première campagne avec une valeur de 1,14 (**Figure 18 «a»**).

ANOVA a détecté un effet mode de travail du sol hautement significatif ($P < 0,01$). Alors, la comparaison des moyennes montre que durant les trois campagnes agricoles, le SD a enregistré des moyennes élevées de : 1,15 ; 1,26 et 1,16 contre 1,13 ; 1,20 et 1,13 pour le TC comme le montre la **figure 18 «b»**. Selon Santín-Montanyá et al. (2013), l'uniformité des espèces des adventices dans les champs de blé a été augmentée dans le SD.

Le stade de prélèvement n'a aucun effet significatif ($P > 0,05$) sur l'indice de Peilou (J). La comparaison des moyennes a indiqué que le deuxième stade de recensement a exprimé une valeur maximale avec 1,19 suivi par le troisième stade avec une valeur de 1,17 suivi par le premier stade de recensement avec une moyenne 1,16 (**Tableau 18**). En revanche, l'interaction du MTS avec le stade de prélèvement a un effet hautement significatif ($P < 0,01$) sur l'indice de Peilou (J). Les stades 3, 2 et 3 de recensement ont enregistré des moyennes élevées en SD durant les trois campagnes (1, 2 et 3 respectivement) (**Tableau 18**) tandis que, chacun des stades 1 et 2 qui a exprimé des moyennes élevées en TC (**Tableau 18**).

En outre, la comparaison des moyennes des cultures a montré que la culture de la lentille a une moyenne élevée (1,18) suivi par la culture de triticale (1,18), le pois fourrager (1,17) et en dernière position le blé avec une valeur de 1,16 (**Figure 18 «c»**).

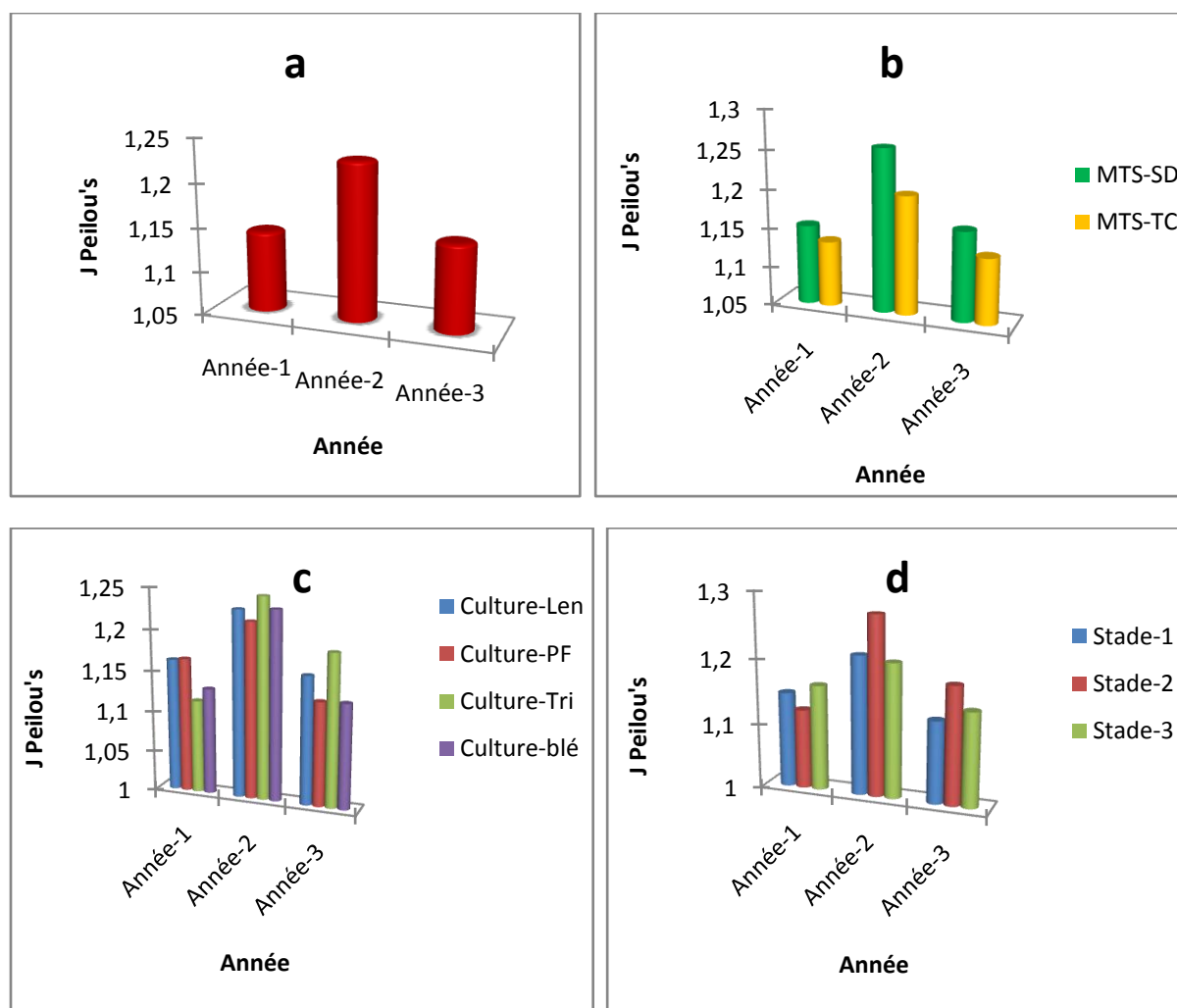


Figure 18: Indice de Peilou's « J » des adventives en fonction de ; (a) campagnes d'étude, (b) MTS, (c) type de culture et (d) les stades de prélèvement.

3.10. Indice de Margalef (Dmg)

L'analyse de la variance a détecté un effet année, stade et leur interaction très hautement significatif ($P < 0,001$) sur le Dmg. La comparaison des moyennes entre les années

a montré que la deuxième campagne a marqué une valeur élevée avec 1,24 suivi par la première campagne (1,19) et la troisième campagne avec une valeur de 1,13 (**Figure 19 «a»**). On note qu'en première campagne, le Dmg diminue du premier stade au troisième stade (**Figure 19 «d»**). En deuxième campagne, le stade 2 est leader avec une valeur de 1,37 suivi par le premier stade avec une valeur de 1,21 et enfin le stade 3, avec une moyenne de 1,13. En troisième campagne, le stade 2 a exprimé une moyenne élevée avec une valeur de 1,15 suivi par le stade 3, avec une valeur de 1,12 et enfin stade 1, avec une moyenne de 1,11 (**Figure 19 «d»**).

L'ANOVA a révélé un effet MTS non significatif ($P > 0,05$), l'effet l'interaction MTS avec l'année agricole a été très hautement significatif ($P < 0,001$) ce qui corrobore les résultats de **Demjanovà et al. (2009)**. En première et troisième campagne, le TC est leader avec des moyennes de : 1,20 et 1,16 respectivement tandis que, en deuxième campagne, le SD a présenté une moyenne élevée, avec une valeur de 1,3 (**Figure 19 «b»**). En revanche, l'interaction du MTS avec le stade de prélèvement a un effet hautement significatif sur le Dmg ($P < 0,01$). Le premier stade est leader pour les deux modes de travail du sol en première année contre le stade 2 pour la deuxième année tandis que, les stades 2 pour TC et stade 3 pour le SD ont enregistré des moyennes élevées en troisième campagne (**Tableau 18**).

Le type de culture n'a aucun effet significatif ($P > 0,05$) sur le Dmg; ce qu'est en accord avec **Demjanovà et al. (2009)**, où ils ont montré que la rotation des cultures n'a pas d'effet sur la variabilité de la richesse des espèces des MH par l'indice de Margalef. La comparaison des moyennes entre les cultures a montré que la lentille et le pois fourrager ont exprimé une valeur élevée avec 1,21 et 1,20 respectivement contre 1,18 et 1,16 pour le triticale et le blé par ordre (**Figure 19 «c»**).

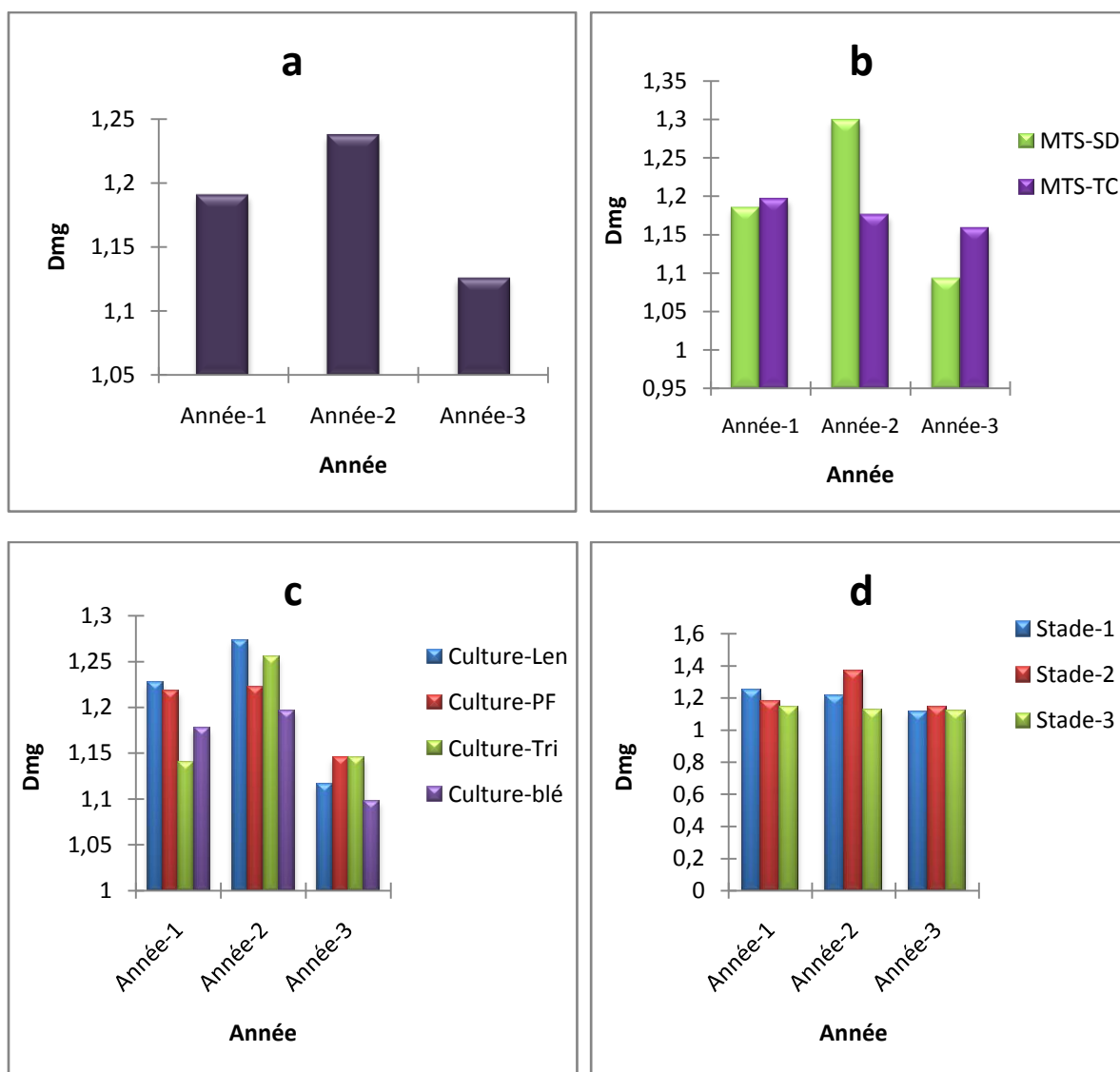


Figure 19 : Dmg en fonction de l'année (a), système de travail du sol (b), culture (c) et stade de prélèvement (d).

Tableau 18: Indice de diversité des MH sous l'effet du mode de travail du sol, les stades de prélèvement et les cultures.

Cultu re	Paramè tres	SD									TC								
		C1			C2			C3			C1			C2			C3		
		S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
Blé	C	1,0 3	1,0 02	1,1 6	1,2 7	1,2 1	1,1 1	1 1	1,0 6	1,1 6	1,1 5	1,1 7	1,0 3	1,0 9	1,2 1	1,0 4	1,0 7	1,11 7	1,0 2
	H'	1,0 8	1,0 1	1,2 5	1,4 4	1,4 1	1,2 3	1 1	1,0 8	1,2 5	1,2 8	1,2 7	1,0 7	1,1 3	1,3 6	1,0 7	1,1 4	1,19 4	1,0 4
	R	4 3	1,3 3	2,6 7	4,3 3	6,6 7	2 1	1 1	1,3 3	2,6 7	5,6 7	3,6 7	2,3 3	1,6 7	4,3 3	1,6 7	3,3 3	2,67 3	2 2
	J	1,0 7	1,0 1	1,2 5	1,3 3	1,2 3	1,3 2	1 1	1,1 1	1,2 7	1,1 7	1,2 2	1,0 6	1,1 2	1,2 7	1,1 1	1,1 3	1,21 3	1,0 5
	Dmg	1,2 1	1,0 3	1,1 8	1,2 8	1,4 5	1,1 1	1 1	1,0 4	1,1 5	1,3 2	1,2 1	1,1 2	1,0 6	1,2 3	1,0 6	1,1 8	1,14 8	1,0 8
Tri	C	1,0 7	1,0 4	1,0 9	1,1 7	1,2 9	1,1 3	1,0 8	1,1 6	1,1 4	1,0 6	1,0 7	1,0 1	1,1 4	1,2 4	1,0 9	1,1 5	1,16 5	1,0 2
	H'	1,1 4	1,0 8	1,1 5	1,3 2	1,5 2	1,2 2	1,1 2	1,2 3	1,2 3	1,1 5	1,1 4	1,0 3	1,2 4	1,4 5	1,1 6	1,2 6	1,29 9	1,0 4
	R	2,6 7	2,3 3	2,3 3	4,3 3	5 3	2,3 7	1,6 7	2 3	2,6 7	4,3 3	3,3 3	1,6 7	3 7	5,6 7	2,6 7	3,3 3	4,33 3	2 2
	J	1,1 3	1,1 0	1,1 9	1,2 3	1,3 4	1,2 0	1,1 1	1,3 1	1,2 3	1,1 1	1,0 2	1,0 5	1,2 3	1,2 9	1,1 7	1,2 2	1,2 2	1,0 5
	Dmg	1,1 3	1,1 1	1,1 3	1,3 2	1,4 1	1,1 6	1,0 7	1,1 1	1,1 5	1,2 2	1,1 8	1,0 6	1,1 8	1,3 3	1,1 4	1,2 4	1,27 4	1,0 8
Len	C	1,1 4	1,0 7	1,2 6	1,2 4	1,3 0	1,1 6	1,0 3	1,0 5	1,1 6	1,1 7	1,1 1	1,0 2	1,1 2	1,1 4	1,0 9	1,1 4	1,17 4	1,0 4
	H'	1,2 7	1,1 4	1,3 9	1,4 0	1,5 6	1,2 5	1,0 6	1,0 7	1,2 2	1,2 9	1,1 9	1,0 4	1,2 2	1,2 6	1,1 6	1,2 1	1,33 1	1,0 9
	R	6 7	4,6 7	3 3	4 3	6,6 7	2,6 7	1,3 3	1,3 3	2 3	5,3 3	4,3 3	1,6 7	3,3 3	4,3 3	2,6 7	3,6 7	4 7	2 2
	J	1,1 6	1,0 8	1,3 6	1,3 1	1,3 2	1,2 1	1,0 9	1,1 1	1,2 5	1,1 9	1,1 3	1,0 6	1,1 9	1,1 8	1,1 6	1,1 7	1,25 7	1,0 9
	Dmg	1,3 3	1,2 3	1,2 2	1,3 7	1,5 4	1,1 6	1,0 4	1,0 4	1,1 1	1,2 9	1,2 4	1,0 6	1,1 9	1,2 4	1,1 3	1,2 3	1,23 3	1,0 9
PF	C	1,0 8	1,1 2	1,1 3	1,0 2	1,2 3	1,2 1	1,1 1	1,0 6	1,1 7	1,2 1	1,1 2	1,0 7	1,1 5	1,2 1	1,0 7	1,0 5	1,12 5	1 1
	H'	1,1 6	1,2 2	1,2 3	1,0 4	1,4 3	1,2 8	1,1 5	1,1 0	1,3 2	1,3 5	1,2 5	1,1 5	1,2 8	1,3 7	1,1 3	1,1 0	1,24 0	1 1
	R	4,3 3	4 3	3,3 3	2,3 3	6,6 7	3 1	1,6 7	2 3	4,6 7	5 1	4 3	3,3 3	3,6 7	4,3 3	2 3	3 3	4,67 3	1 1
	J	1,1 2	1,1 6	1,2 1	1,0 4	1,2 7	1,2 8	1,0 1	1,2 8	1,2 2	1,2 3	1,1 5	1,1 3	1,2 4	1,2 7	1,1 9	1,0 9	1,17 9	1 1
	Dmg	1,2 2	1,2 2	1,2 1	1,1 1	1,4 9	1,1 9	1,0 7	1,0 8	1,2 9	1,2 6	1,2 1	1,2 2	1,2 2	1,2 6	1,0 8	1,1 6	1,28 6	1 1

SD : semis direct ; TC : travail conventionnel ; C1 : campagne 2016/17 ; C2 : campagne 2017/18 ; C3 : campagne 2018/19.

3.11. Etude des corrélations

L'analyse des corrélations entre les différentes paires de variables dans les deux modes de travail du sol (SD et TC) montre que la matière sèche est positivement et fortement corrélée avec la biomasse fraîche des adventices, et cette dernière est corrélée positivement avec la densité totale des adventices (**Tableaux 19 & 20**). En technique du SD, la densité des monocotylédones, leur biomasse et leur matière sèche sont corrélées négativement avec la densité totale des M-H ($r = - 0,212$; $r = - 0,315$ et $r = - 0,305$ respectivement) tandis que, la densité des plantes dicotylédones, leur biomasse et leur matière sèche sont corrélées positivement avec la densité totale des M-H ($r = 0,965$; $r = 0,421$ et $r = 0,380$ respectivement) (**Tableau 19**). Par contre, dans le travail conventionnel du sol, la densité des

monocotylédones est corrélée positivement à la densité des M-H totale (**Tableau 20**). Alors, dans le semis direct la densité des plantes dicotylédones est négativement et fortement liée à la densité des monocotylédones (**Tableau 19**). En outre, l'indice de H' (Shannon-Wiener) est fortement et positivement corrélée avec l'indice de Simpson (C), la richesse des espèces, la régularité de Peilou (J) et Dmg (Indice de Margalef) dans les deux techniques culturales (**Tableaux 19 & 20**). En technique de conservation (SD), la richesse en espèces est négativement corrélée à la densité des monocotylédones ($r = - 0,305$) (**Tableau 19**), contrairement, la richesse en espèces est positivement corrélée à la densité des monocotylédones en technique conventionnelle ($r = 0,319$) (**Tableau 20**). La régularité «J» est négativement corrélée avec la densité des M-H.

Tableau 19: Matrice de corrélations entre les variables étudiées en SD.

Variables	Dens	BF	MS	D Mono	D Dico	BF Mono	BF Dico	MS Mono	MS Dico	« C »	H'	R	J	D mg
Densi	1													
BF	0,289 **	1												
MS	0,167	0,924 ***	1											
D Mono	- 0,212 *	- 0,129	0,064	1										
D Dico	0,965 ***	0,288 **	0,136	- 0,422 ***	1									
BF Mono	- 0,315 ***	0,002	0,193 *	0,863 ***	- 0,486 ***	1								
BF Dico	0,421 ***	0,893 ***	0,738 ***	- 0,478 ***	0,510 ***	- 0,409 ***	1							
MS Mono	- 0,305 ***	0,006	0,218 *	0,846 ***	- 0,47* **	0,984 ***	- 0,397 ***	1						
MS Dico	0,380 ***	0,857 ***	0,793 ***	- 0,447 ***	0,468 ***	- 0,406 ***	0,959 ***	- 0,389 ***	1					
« C »	- 0,178	0,236 **	0,227 *	- 0,074	- 0,069	0,036	0,283 **	0,034	0,273 **	1				
H'	- 0,120	0,238 **	0,189 *	- 0,128	- 0,006	- 0,001	0,310 ***	- 0,006	0,271 **	0,978 ***	1			
R	0,367 ***	0,309 ***	0,139	- 0,305 **	0,449 ***	- 0,175	0,446 ***	- 0,186	0,338 ***	0,588 ***	0,706 ***	1		
J	- 0,231 *	0,145	0,181	- 0,007	- 0,123	0,063	0,184	0,062	0,205 *	0,921 ***	0,865 ***	0,366 ***	1	
Dmg	0,134	0,237 **	0,082	- 0,306 **	0,244 **	-0,15	0,373 ***	- 0,159	0,267 **	0,726 ***	0,830 ***	0,950 ***	0,518 ***	1

Densi : densité ; BF : biomasse fraîche ; MS : matière sèche ; D. mono : densité monocotylédones, D. dico : densité dicotylédones ; BF mono : biomasse fraîche monocotylédones ; BF dico : biomasse fraîche dicotylédones ; MS mono : matière sèche monocotylédones ; MS dico : matière sèche dicotylédones.

Tableau 20: Matrice de corrélation entre les variables étudiées en TC

Variables	Den	BF	MS	D Mono	D Dico	BF Mono	BF Dico	MS Mono	MS Dico	« C »	H'	R	J	D mg
Densi	1													
BF	0,334 ***	1												
MS	0,343 ***	0,826 ***	1											
D Mono	0,128	0,008	0,106	1										
D Dico	0,989 ***	0,334 ***	0,346 ***	0,115	1									
BF Mono	-0,043	0,051	0,159	0,872 ***	-0,055	1								
BF Dico	0,354 ***	0,971 ***	0,774 ***	-0,172	0,357 ***	-0,181	1							
MS Mono	-0,065	0,062	0,187	0,830 ***	-0,078	0,975 ***	-0,166	1						
MS Dico	0,385 ***	0,804 ***	0,934 ***	-0,162	0,392 ***	-0,184	0,836 ***	-0,172	1					
« C »	-0,069	0,202 *	0,061	0,060	-0,055	0,091	0,176	0,104	0,019	1				
H'	-0,060	0,229 *	0,071	0,121	-0,048	0,155	0,189	0,162	0,011	0,980 ***	1			
R	0,206 *	0,183	0,043	0,319 ***	0,201 *	0,297 **	0,120	0,266 **	-0,041	0,638 ***	0,743 ***	1		
J	-0,145	0,199 *	0,082	0,003	-0,130	0,049	0,181	0,067	0,051	0,932 ***	0,908 ***	0,484 ***	1	
Dmg	0,040	0,131	-0,009	0,307 **	0,036	0,319 ***	0,061	0,294 **	-0,108	0,675 ***	0,779 ***	0,980 ***	0,542 ***	1

Densi : densité ; BF : biomasse fraîche ; MS : matière sèche ; D. mono : densité monocotylédones, D. dico : densité dicotylédones ; BF mono : biomasse fraîche monocotylédones ; BF dico : biomasse fraîche dicotylédones ; MS mono : matière sèche monocotylédones ; MS dico : matière sèche dicotylédones.

3.12. Analyse des composantes principales (ACP)

Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée afin de vérifier la localisation des variables mesurées par rapport aux traitements, à savoir la technique de travail du sol (SD et TC) et les cultures précédentes (blé, triticales, lentille et pois fourrager) comme le montre la **figure 20**.

Pour la première campagne (2016/17) (**Figure 20 « A »**), les deux axes de l'ACP expliquent **79,54 %** de la variation totale. **L'axe 1** explique **43,24 %** de la variation totale et est constitué des variables suivantes : **Densité totale des M-H/ m² (12,79 %)**, **Biomasse Fraîche (11,24 %)**, **Biomasse Sèche (7,28 %)**, **densité dico (12,71 %)**, **Biomasse Fraîche dicotylédones (13,75 %)**, **Biomasse Sèche dicotylédones (13,15 %)**, **richesse en espèces des M-H (10,80 %)** et **l'indice de Margalef (Dmg) (7,87 %)** dans le sens positif. Dans le sens négatif, on trouve les variables **densité Mono (2,74 %)**, **Biomasse Fraîche Monocotylédones (2,39 %)**, **Biomasse Sèche Monocotylédones (2,71 %)** (**Figure 20 «A»**). On peut conclure que lorsque la densité des dicotylédones augmente, la densité les monocotylédones diminue.

L'axe 2, qui représente **36,30 %** de l'information totale, illustre la variation des variables **indice de H' (14,55 %)**, **Indice de Simpson (15,12 %)**, **indice de Peilou (J) (16,93**

%), *densité Monocotylédones* (11,67 %), *Biomasse Fraiche Monocotylédones* (13,53 %), *Biomasse Sèche Monocotylédones* (13,39 %) dans la direction positive, et les variables *densité totale des M-H* (0,58 %), *densité dicotylédones* (0,97 %), *Biomasse Fraiche Dicotylédones* (0,39 %), *Biomasse Sèche Dicotylédones* (0,38 %) dans la direction négative (**Figure 20 «A»**). D'après ces résultats, on peut conclure qu'il existe une forte corrélation positive entre l'indice de Shannon-Wiener et l'indice de Simpson.

La projection des systèmes de travail du sol et des cultures incluses dans la rotation sur le plan (1-2) a montré que les parcelles cultivées sous gestion de semis direct sont associées aux espèces monocotylédones, tandis que les parcelles cultivées de manière conventionnelle sont associées aux espèces dicotylédones. De plus, les cultures de légumineuse (pois fourrager et lentille) sous labour traditionnel sont associées à une densité élevée des mauvaises herbes et à une richesse en espèces d'adventices élevée, en raison de la difficulté du désherbage chimique. En outre, les cultures conduites en semis direct se distinguent par un indice de Peilou élevé, ce qu'indique que les mauvaises herbes des parcelles en semis direct sont plus uniformes (**Figure 20 «A»**).

Pour la deuxième campagne (2017/18), les deux premiers axes de l'ACP expliquent 73,11 % de la variation totale (**Figure 20 «B»**). *L'axe 1* explique 47,94 % de la variance totale et est principalement formé par les variables : *indice de Shannon-Wiener* (9,36 %), *indice de Simpson* (9,22 %), *Dmg* (9,48 %), *densité Monocotylédones* (7,3 %), *Biomasse Fraiche Monocotylédones* (9,14 %), *Biomasse Sèche Monocotylédones* (8,27 %), *indice de Peilou (J)* (8,09 %) et *richesse en espèces (R)* (6,20 %) dans la direction positive. Dans le sens négatif, on trouve les variables *densité totale des M-H* (8,76 %), *densité dico* (9,02 %), *Biomasse Fraiche dicotylédones* (4,03 %), *Biomasse Sèche dicotylédones* (5,65 %), *Biomasse Fraiche totale des M-H* (2,38 %), *Biomasse Sèche totale des M-H* (3,08 %) (**Figure 20 «B»**). On peut conclure qu'il existe une corrélation positive et forte entre la densité totale des M-H et la densité des dicotylédones. De plus, on peut conclure que lorsque la densité des monocotylédones augmente, la densité des dicotylédones diminue.

L'axe 2 explique 25,17 % de l'information totale et est formé par *la biomasse fraiche totale des M-H* (21,85 %), *la matière sèche totale des M-H* (14,03 %), *la biomasse fraiche des dicotylédones* (19,09 %) et *la matière sèche des dicotylédones* (11,97 %) dans la direction positive (**Figure 20 «B»**). Cela montre qu'il existe une forte corrélation positive entre la biomasse et la matière sèche totale des M-H et celle des dicotylédones.

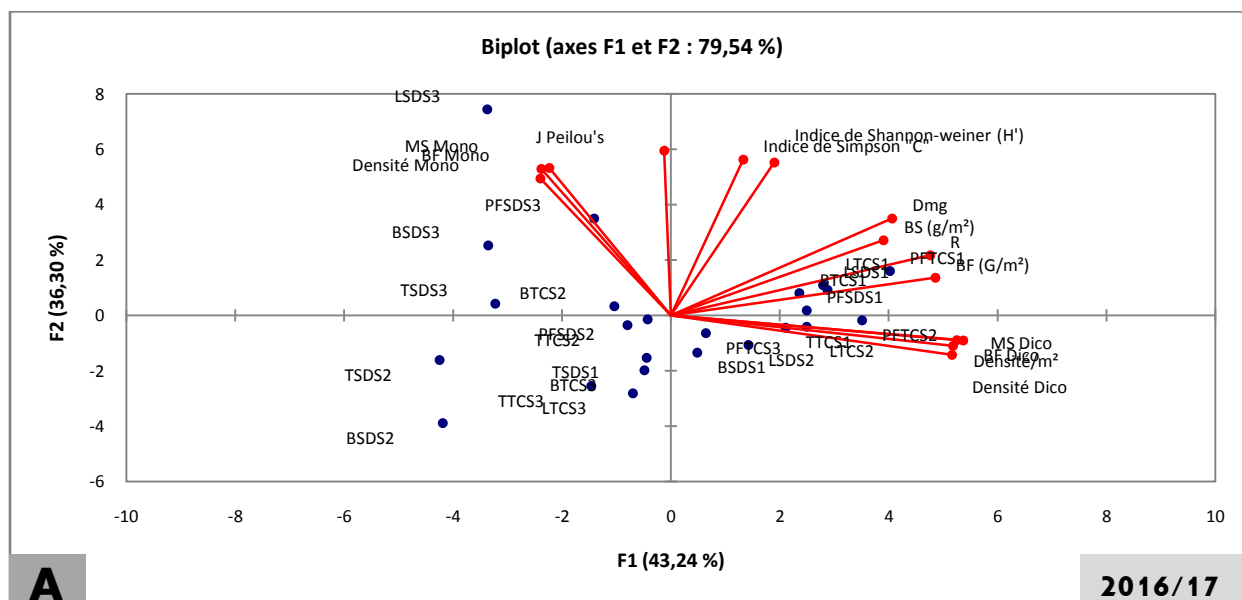
La projection des systèmes de travail du sol et des cultures incluses dans la rotation sur le plan (1-2) a montré une nette opposition entre les deux systèmes de travail du sol. Les parcelles cultivées en semis direct sont associées à des valeurs élevées de densité des monocotylédones, d'indice de Shannon-Wiener (H'), d'indice de Peilou (J), d'indice de Margalef (Dmg), d'indice de Simpson (C) et de richesse en espèces (R). En revanche, les parcelles cultivées de manière conventionnelle se distinguent par des valeurs élevées de densité totale, de densité des dicotylédones, de biomasse totale et de biomasse des dicotylédones (**Figure 20 «B»**).

Pour la troisième campagne (2018/19), les deux premiers axes de l'ACP expliquent 79,27 % de la variation totale (**Figure 20 «C»**). *L'axe 1* explique 48,22 % de la variance

totale et est principalement formé par les variables : **Dmg (6,85 %)**, **richesse en espèces (7,54 %)**, **densité totale des M-H (13,37 %)**, **densité des dicotylédones (14,25 %)**, **Biomasse Fraîche dicotylédones (12,84 %)** et **Matière Sèche dicotylédones (11,52 %)** dans le sens positif. Dans le sens négatif, on trouve les variables **densité monocotylédones (10,49 %)**, **Biomasse Fraîche monocotylédones (9,75 %)** et **Matière Sèche monocotylédones (8,65 %)** (Figure 20 «C»). Ce résultat indique qu'il existe une forte relation positive entre la richesse en espèces des M-H (R) et l'indice de Margalef (Dmg) ; ainsi lorsque la richesse en espèce augmente, la valeur de Dmg augmente également.

L'axe 2 explique 31,05 % de l'information totale, et est formé par **l'indice de Simpson (18,18 %)**, **l'indice de Shannon-Wiener (H') (17,74 %)**, **l'indice de Peilou (J) (16,15 %)**, **Dmg (9,84 %)** et **richesse en espèces (8,35 %)** dans la direction positive. Dans le sens négatif, on trouve les variables : **densité totale des M-H (0,1 %)**, **densité des dicotylédones (0,08 %)**, **biomasse dicotylédones (0,65 %)** et **matière sèche dicotylédones (0,06 %)** (Figure 20 «C»). Ce résultat indique qu'avec l'augmentation de l'indice de Shannon-Wiener (H'), la richesse en espèces augmente (R), ce qui démontre une forte corrélation positive entre ces deux indices de diversité.

La projection des systèmes de travail du sol et des cultures incluses dans la rotation sur le plan (1-2) a montré une nette opposition entre les deux systèmes de travail du sol. Les parcelles cultivées en semis direct se caractérisent par une densité élevée de monocotylédones, une biomasse fraîche et sèche des monocotylédones ainsi qu'une biomasse sèche totale importante. En revanche, dans le travail conventionnel, la densité des dicotylédones, la densité totale des M-H, l'indice de Shannon-Wiener, l'indice de Simpson (C) et la richesse en espèces des M-H affichent des valeurs élevées (Figure 20 «C»).



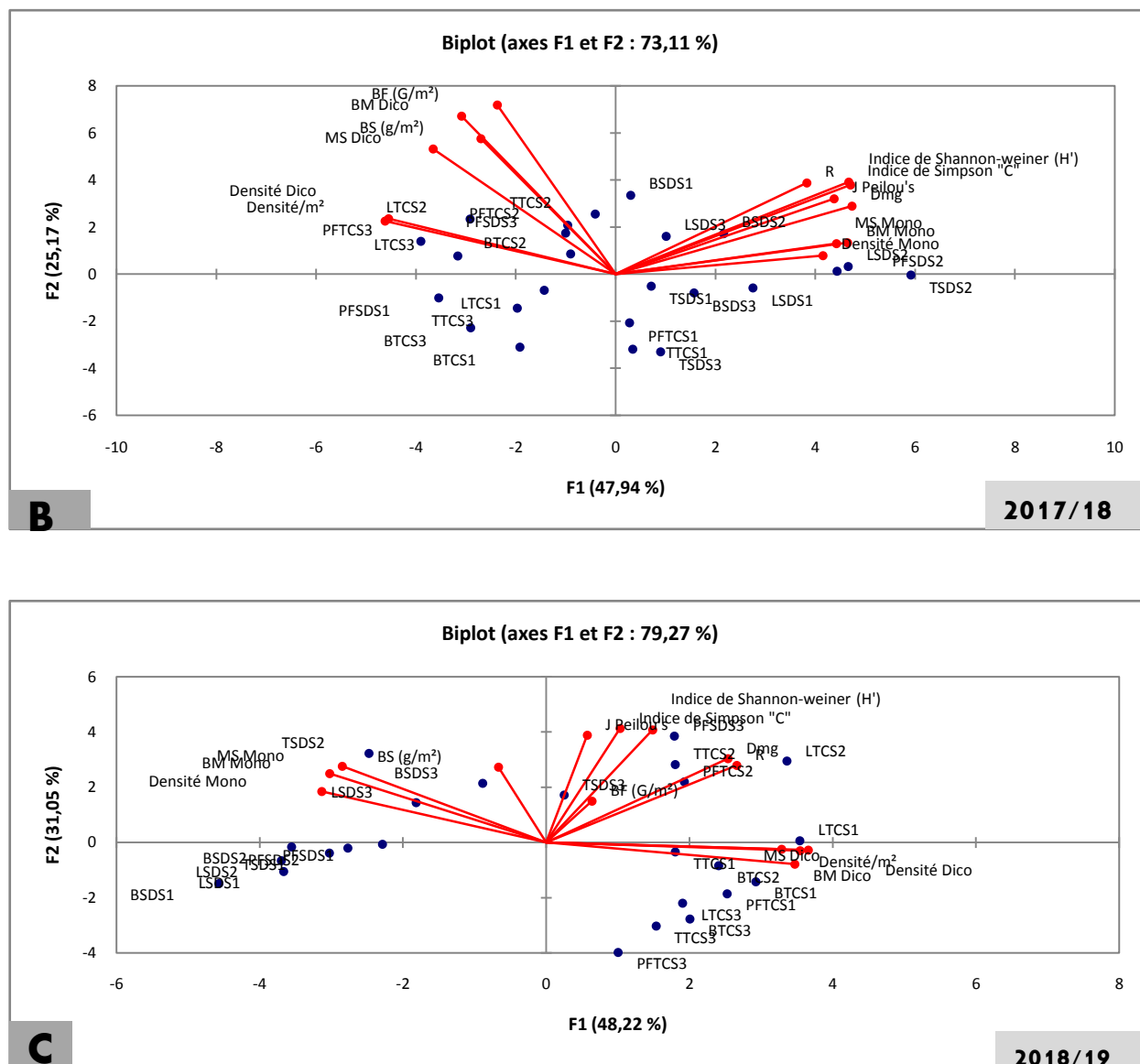


Figure 20: Représentation temporelle évolutive des variables mesurées, par rapport aux facteurs étudiés par campagne : 2016/17 (A), 2017/18 (B) et 2018/19 (C).

4. Conclusion

En rappel, dans la présente étude, différents caractères ont été évalués, en estimant les effets de la rotation des cultures combinée à la techniques de travail du sol, à savoir le semis direct et le travail conventionnel sur la dynamique de la flore adventice dans la zone semi-aride de l'est d'Algérie.

Dans les deux techniques du travail du sol, la *renouée des oiseaux* était l'espèce la plus dominante dans les quatre culturales incluses dans la rotation en première campagne. La réduction du taux de dominance de la *renouée des oiseaux* a été observée avec la réduction de travail du sol et la diversification des cultures par la rotation, les espèces *séneçon commun* et le *brome rigide* ont été les espèces les plus dominantes en SD pour la 2^{ème} et la 3^{ème} campagne (années humides) contre la dominance de la *renouée des oiseaux* pour le TC. Ainsi, on a

observé que le semis direct favorise l'apparition et l'installation des mauvaises herbes bisannuelles et vivaces.

La densité totale des adventices, des monocotylédones et des dicotylédones diminue significativement de la première année à la troisième année. Le TC présente une densité totale des mauvaises herbes élevée comparé au SD. Alors, le SD présente une densité des monocotylédones élevée, tandis que le TC présente une densité des dicotylédones élevée. Les cultures de légumineuses ont enregistré une densité des adventices élevée en raison de la difficulté de désherbage.

Durant la période d'étude, les années humides ont enregistré une biomasse et une matière sèche des mauvaises herbes élevée. La biomasse et la matière sèche sont élevées en TC. Le SD a enregistré une biomasse et une matière sèche des monocotylédones élevée, tandis que, le TC a marqué une biomasse et une matière sèche des dicotylédones élevées. Les cultures légumières ont marqué une biomasse et une matière sèche élevée comparé aux céréales.

Quant à l'indice de Shannon-Wiener (H') et la richesse en espèces des mauvaises herbes (R) ont montré des valeurs élevées dans la technique conventionnelle et dans la rotation des cultures avec les légumineuses. En d'autre côté l'indice de Simpson (C) et l'indice de l'uniformité (J) ont présenté les valeurs les plus élevées en technique du semis directe. Le type de culture et la technique culturale de travail du sol n'a aucun effet sur l'indice de Margalef (Dmg).

Références bibliographiques

1. **Ali H., Tahir M., Nadeem M. A., 2014.** Determining critical period of weed competition in wheat under different tillage systems. *Pak. J. Life Soc. Sci.*, 12 (2) : 74-79.
2. **Anderson R. L., 2005.** A multi-tactic approach to manage weed population dynamics in crop rotations. *Agron. J.*, 97 : 1579-1583.
3. **Auškalniene O., Kadžienė G., Janušauskaitė D., Suproniene S., 2018.** Changes in weed seed bank and flora as affected by soil tillage systems. *Zemdirbyste-Agriculture*, 105(3): 221-226.
4. **Benniou R., 2008.** Les systèmes de production dans les milieux semi-arides en Algérie : analyse agronomique de leur diversité et des systèmes de culture céréalières dans les hautes plaines Sétifiennes. *Ed. Thèse de doctorat*, ENSA (ex INA) Alger, 293p.
5. **Benniou R., Souadia D., Nasri H., Benkherbache N., Hamdani M., Sersou D. Laouer S., Bendada H., Belguet H., 2016.** Etude de l'effet de semis direct sur la dynamique des adventices en fonction de l'assolement culturale en milieu semi-aride cas de la région de ouled mansour M'sila. *Revue Agriculture*, numéro spéciale 1 : 246-253.
6. **Bhagat R. M., Bhuiyan S. I., Moody K., Estorninos L. E., 1999.** Effect of water, tillage and herbicide on ecology of weed communities in intensive wet-seeded rice system. *Crop Protection*, 18 (5): 293-303.
7. **Bilalis D., Efthimiadis P., Sidiras N., 2001.** Effect of three tillage systems on weed flora on a 3-year rotation with four crops. *J. Agronomy and Crop Science*, 186 : 135-141.
8. **Bitton G., 1997.** Formula Handbook for Environmental Engineers and Scientists. Vol 117, John Wiley & Sons, 312 p. en ligne: <https://books.google.dz/books?id=7PDS6jb8XtkC&pg=PA190&dq=Bitton+G.,+1997.+Formula>

[+Handbook+for+Environmental+Engineers+and+Scientists&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwjRrNal39D3AhXC3oUKHXyBzsQ6AF6BAGJEAI](#)

9. Blackshaw R. E., Larney F. J., Lindwall C. W., Watson P. R., Derksen D. A., 2001. Tillage intensity and crop rotation affect weed community dynamics in a winter wheat cropping system. *Can. J. Plant Sci.*, 81 : 805-813.
10. Buhler D. D., 1995. Influence of tillage systems on weed population dynamics and management in corn and soybean in the central USA. *Crop Science*, 35 (5) : 1247-1258.
11. Chauhan B. S., Singh R. G., Mahajan G., 2012. Ecology and management of weeds under conservation agriculture: A review. *Crop Protection*, 38: 57-65.
12. Chhokar R. S., Sharma R. K., Jat G. R., Pundir A. K., Gathala M. K., 2007. Effect of tillage and herbicides on weeds and productivity of wheat under rice-wheat growing system. *Crop Protection*, 26 : 1689-1696.
13. Cordeau S., Baubron A., Adeux G., 2020. Is tillage a suitable option for weed management in conservation agriculture ? *Agronomy*, 10 : 1746.
14. Cruz-Reyes A., & Camargo-Camargo B., 2000. Glosario de términos en Parasitología y Ciencias Afines. Plaza y Valdes, 347 p. en ligne : <https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=Hgi4bbEduUgC&oi=fnd&pg=PA11&dq=Glosario+de+t%C3%A9rminos+en+Parasitolog%C3%ADa+y+Ciencias+Afinas&ots=59JgASV3Rk&sig=ZYSRXQu7eKsXWCkzPCFZvx0ffLc>
15. Das G. K., 2021. Forests and Forestry of West Bengal: Survey and Analysis. Springer Nature, 248 p. en ligne : <https://books.google.dz/books?id=pBLEAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fr>
16. Das T. K., 1999. Is transformation of weed data always necessary. *Annals of Agricultural Research*, 20 : 335-41.
17. 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 : *Simplification du travail du sol*, France : Ed. INRA. No. 65, pp. 35-62.
18. Demjanová E., Macák M., Ďalović I., Majerník F., Tyr S., Smatana J., 2009. Effects of tillage systems and crop rotation on weed density, weed species composition and weed biomass in maize. *Agronomy Research*, 7(2): 785-792.
19. Derksen D. A., Lafond G. P., Thomas A. G., Loeppky H. A., Swanton C. J., 1993. Impact of agronomic practices on weed communities : tillage systems. *Weed Science*, 41 : 409-417.
20. Derksen D. A., Thomas A. G., Lafond G. P., Loeppky H. A., Swanton C. J., 1994. Impact of agronomic practices on weed communities : Fallow within tillage systems. *Weed Science*, 42 : 184-194.
21. Dey P. & Pandit P., 2020. Relevance of Data Transformation Techniques in Weed Science. *Journal of Research in Weed Science*, 3 (1) : 81-89.
22. Dimopoulos P. & Kokkoris L. P., 2021. Protection and Management of Species, Habitats, Ecosystems and Landscapes. MDPI, 200 p. en ligne : <https://books.google.dz/books?id=Qb4qEAAAQBAJ&pg=PA37&dq=Peilou+index+formulation&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwjRqPreztD3AhWK4IUKHU4ATEQ6AF6BAGBEAI>
23. Djennadi-Aït-Abdallah F., Chaou L., Benlakhel Z., 2015. Guide des mauvaises herbes de la région de Sétif (Algérie). 1^{ère} Ed. Algérie. ITGC, ICARDA, Australian Center for International Agricultural Research, Government of South Australia (Edit), 143 p.
24. Doucet C., Weaver S. E., Hamill A. S., Zhang J., 1999. Separating the effects of crop rotation from weed management on weed density and diversity. *Weed Science*, 47: 729-735.
25. Farooq M., Nawaz A., Nadeem F., Bajwa H. R., Salim M. A., Rehman A., Ullah A., 2022. Brown manuring and sorghum allelopathy affects weeds, soil health, and paddy yield. *Agronomy Journal*, 114(5) : 3040-3051.

26. Feledyn-Sewczyk B., Smagacz J., Kwiatkowski C. A., Harasim E., Woźniak A., 2020. Weed flora and soil seed bank composition as affected by tillage system in three year crop rotation. *Agriculture*, 10 : 186.
27. Fracchiolla M., Stellacci A. M., Cazzato E., Tedone L., Ali S. A., De Mastro G., 2018. Effects of conservative tillage and nitrogen management on weed seed bank after a seven- year durum wheat-faba bean rotation. *Plants*, 7 (4) :82.
28. Gawęda D., Woźniak A., Harasim E., 2018. Weed infestations of winter wheat depend on the forecrop and the tillage system. *Acta agrobotanica*, 71 (3): 1744-1752.
29. Ghosh S., Das T. K., Shivay Y. S., Bhatia A., Biswas D. R., Bandyopadhyay K. K., Sudhishri S., Yeasin Md., Raj R., Sen S., Rath N., 2021. Conservation agriculture effects on weed dynamics and maize productivity in maize-wheat-green gram system in north-western Indo-Gangetic plains of India. *Indian Journal of Weed Science*, 53 (3) : 244-251.
30. Ghosh S., Das T. K., Shivay Y.S., Bandyopadhyay K. K., Bhatia A., Yeasin M. D., 2022. Weed interference and wheat productivity in a conservation agriculture- based maize-wheat-mungbean system. *Journal of Crop and Weed*, 18 (1) : 111-119.
31. González-Díaz L., Van Den Berg F., Ven Den Bosch F., González-Andújar J. L., 2012. Controlling annual weeds in cereals by deploying crop rotation at the landscape : *Avena sterilis* as an example. *Ecologie Applications*, 22 (3) : 982-992.
32. Govindasamy P., Sarangi D., Provin T., Hons F., Bagavathiannan M., 2020. No-tillage altered weed species dynamics in long-term (36 years) grain sorghum experiment in Southeast Texas. *Weed Science*, 68 (5): 476-484.
33. Gurusinghe S., Haque K. M. S., Weston P. A., Brown W. B., Weston L. A., 2022. Impact of rotational sequence selection on weed seed bank composition in Australian Broadacre crops. *Agronomy*, 12(2): 375.
34. Hajjaj B., Bouhache M., Mrabet R., Taleb A., 2018. Stock semencier des mauvaises herbes dans le sol et évolution de la flore de surface sous système de semis direct. *Revue Marocaine de Protection des Plantes*, 12 : 1-17.
35. Haliniavz M., Gawęda D., Kwiatkowski C., Frant M., Róžańska-Boczula M., 2014. Weed biodiversity in field pea under reduced tillage and different mineral fertilization conditions. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 20(6) : 1340-1348.
36. Henriot F., Jaunard D., Gillemann A., Monty A., Mahy G., Bodson B., 2014. Lutte contre les mauvaises herbes. In livre Blanc « Céréales », pp : 3-31. <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/164677/1/3.%20Lutte%20mauvaises%20herbes.pdf>
37. Hetta G., Rana S.S., Kumar S., Mujahed B. A., 2022. Promising cultural weed management practices to limit crop-weed competition in pea (*Pisum sativum* L.) in the North Himalayan region. *The Pharma Innovation Journal*, 11(3) : 633-641.
38. Hossain M. M., Begum M., Hashem A., Rahman Md. M., Haque Md. E., Bell R. W., 2021. Continuous practice of conservation agriculture for 3-5 years in intensive rice-based cropping patterns reduces soil weed seedbank. *Agriculture*, 11: 895.
39. Hosseini P., Karimi H., Babaei S., Mashhadi H. R., Oveisi M., 2014. Weed seed bank as affected by crop rotation and disturbance. *Crop Protection*, 64: 1-6.
40. Koocheki A., Nassiri M., Alimoradi L., Ghorbani R., 2009. Effect of cropping systems and crop rotations on weeds. *Agron. Sustain. Dev.*, 29: 401-408.
41. Lee N., Thierfelder C., 2017. Weed control under conservation agriculture in dryland small holder farming systems of Southern Africa. A review *Agron. Sustain. Dev.*, 37 (5) : 1-25.
42. Maclaren C., Labuschagne J., Swanepoel P. A., 2021. Tillage practices affect weeds differently in monoculture vs. crop rotation. *Soil & tillage Research*, 205: 104795.

43. Matloob A., Khaliq A., Tanveer A., Hussain S., Aslam F. & Chauhan B. S., 2015. Weed dynamics as influenced by tillage system, sowing time and weed competition duration in dry-seeded rice. *Crop Protection*, 71 : 25-38.
44. Meiss H., Médiène S., Waldhardt R., Caneill J., Bretagnolle V., Reboud X. & Munier-Jolain N., 2010. Perennial lucerne affects weed community trajectories in grain crop rotations. *Weed Research*, 50 : 331-340.
45. Mercado M. J. T. & Lapitan V. C., 2018. Interaction of weed composition and species abundance under different crop rotation pattern. *J. Bio. Env. Sci*, 13 (1) : 59-70.
46. Mhlanga B., Cheesman S., Maasdorp B., Muoni T., Mabasa S., Mangosho E., Thierfelder C., 2015. Weed community responses to rotations with cover crops in maize-based conservation agriculture systems of Zimbabwe. *Crop Protection*, 69: 1-8.
47. Mishra J. S., Kumar R., Kumar R., Koteswara Rao K., Bhatt B. P., 2019. Weed density and species composition in rice- based cropping systems as affected by tillage and crop rotation. *Indian Journal of Weed Science*, 51 (2): 116-122.
48. Mishra J. S., Kumar R., Mondal S., Poonia S. P., Rao K. K., Dubey R., Kumar Raman R., Dwivedi S. K., Kumar R., Saurabh K., Monobrullah Md., Kumar S., Bhatt B. P., Malik R. K., Kumar V., Mc Donald A., Bhaskar S., 2022. Tillage and crop establishment effects on weeds and productivity of a rice-wheat-mungbean rotation. *Field crop research*, 284 : 108577.
49. Moghaddam A., Ramroudi H. M., Koohkan Sh. A., Fanaei H. R., Moghaddam A. A. R., 2011. Effects of crop rotation systems and nitrogen levels on wheat yield, some soil properties and weed population. *International Journal of Agriscience*, 1 (3): 156-163.
50. Mohammedi Z., Bougdal D., Hechad S. & Labad R., 2021. Effect of agricultural practices on weeds seedbank in nord Algeria. *Algerian Journal of Environmental Science and technology*, 7 (4) : 2151-2166.
51. Muminove M. A., Guo L., Song Y., Gu X., Cen Y., Meng J., Jiang G., 2018. Comparisons of weed community soil health and economic performance between wheat-maize and garlic-soybean rotation systems under different weed management. *Peer. J.*, 6: e4799.
52. Murphy S. D., Clement D. R., Belaoussoff S., Kevan P. G., Swanton C. J., 2006. Promotion of weed species diversity and reduction of weed seed-banks with conservation tillage and crop rotation. *Weed Science*, 54: 69-77.
53. Narwal S. S. & Haouala R., 2013. Role of allelopathy in weed management for sustainable agriculture. *Allelopathy: Current trends and future applications*, 217-249. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-30595-5_10
54. Nichols V., Verhulst N., Cox R., Govaerts B., 2015. Weed Dynamics and conservation agriculture principles : A review. *Field Crops Research*, 183 : 56-68.
55. Ozpinar S. & Ozpinar A., 2011. Influence of tillage and crop rotation systems on economy and weed diversity in a semi-arid region. *J. Agr. Tech.*, 13 : 769-784.
56. Plaza E. H., Kozak M., Navarrete L., Gonzalez-Andujar J. L., 2011. Tillage system did not affect weed diversity in a 23-year experiment in mediterranea dryland. *Agriculture, Ecosystems and environment*, 140 (1-2): 102-105.
57. Rahali A., Makhlouf M., benkharbache N., 2010. Influence de l'itinéraire technique sur le stock semencier de mauvaises herbes de la zone semi-aride de Sétif. *Options Méditerranéennes*, 96 : 153-162.
58. Rashid H. Ur., Muhammad D., Khan M. A., Arif M., Tahir N., Zamin M., Afridi R.A., Azeem M. T., Azam F., 2020. Impact of integrated weed management in maize on weed density, biological yield and soil physicochemical properties. *Int. J. Biosci.*, 16 (5) : 232-244.
59. Rebouh N. Y., Latati M., Polityko P., Maisam Z., Kavhiza N. J., Garmasch N., Pakina E., Lyshko M., Engeribo A., Orujov E., Vedenskiy V., 2021. Improvement of weeds management

system and fertilisers application in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivation technologies. *Agriculture*, 67 (2) : 76-86.

60. Rouabhi A., Kebiche M., Hafsi M., 2018. Climate Change during the last century in Sétif Province. *Agriculture*. 8(2): 61-75.

61. Santín-Montanyá M. I., Martín-Lammerding D., Walter I., Zambrana E., Tenorio J. L., 2013. Effects of tillage, crop systems and fertilization on weed abundance and diversity in 4-year dry land winter wheat. *Europ. J. Agronomy*, 48 : 43-49.

62. Santín-Montanyá M. I., Martín-Lammerding D., Zambrana E., Tenorio J. L., 2016. Management of weed emergence and weed seed bank in response to different tillage, cropping systems and selected soil properties. *Soil & Tillage Research*, 161 : 38-46.

63. Saxena R., Tomar R. S., Kumar M., 2016. Allelopathy : A green approach for weed management and crop production. *Int. J. Curr. Biosci. Plant Biol*, 3 (4) : 43-50.

64. Sharma T., Das T. K., Sudhishri S., Matty P. P., Biswas S., Govindasamy P., Raj R., Sen S., Singh T., Paul A. K., Roy A., Saha P., Babu S., 2023. Weed dynamics, wheat (*Triticum aestivum*) yield and irrigatio water-use efficiency under conservation agriculture. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 93 (3) : 328-331.

65. Singh M., Bhullar M. S., Chauhan B. S., 2015. Influence of tillage, cover cropping, and herbicide on weeds and productivity of dry direct-seeded rice. *Soil and Tillage research*, 147 : 39-49.

66. Smith R. G. & Gross K. L., 2007. Assembly of weed communities along a crop diversity gradient. *Journal of Applied Ecology*, 44 : 1046-1056.

67. Swanton C. J., Booth B. D., Clements D. R., Shrestha A., 2006. Management in a modified no-tillage corn-soybean-wheat rotation influences weed population and community dynamics. *Weed Science*, 54 : 47-58.

68. Tanji A., 2005. Adventices du blé et de l'orge au Maroc. Edition INRA, Maroc, Rabat, 458 p.

69. Tannouche A., Sbai K., Rahmani A., Ghanou Y., Rahmoune M., 2013. Détection automatisé des adventices dans la culture des oignons. Proceeding of 4th workshop on codes cryptography and communication systems, EST-Meknès 7-8 November, WCCCS, pp : 262-266.

70. Topham P. B. & Lawson H. M., 1982. Measurement of weed species diversity in crop weed competition studies. *Weed Research*, 22 (5): 285-293.

71. Travlos I. S., Cheimona N., Roussis L., Bilalis D. J., 2018. Weed-species abundance and diversity indices in relation to tillage systems and fertilization. *Front. Environ. Sci.*, 6: 1-10.

72. Ulber L., Steinmann H-N., Klimek S., Isselstein J., 2009. An on-farm approach to investigate the impact of diversified crop rotation on weed species richness and composition in winter wheat. *Weed Research*, 49 : 534-543.

73. Upasani R. R., Barla S., Puran A. N., 2017. Effect of tillage and weed control methods in maize (*Zea mays*)-wheat (*Triticum aestivum*) cropping system. *International Jouranl of Bio-ressource and Stress Management*, 8 (6) : 758-766.

74. Weisberger D., Nichols V., Liebman M., 2019. Does diversifying crop rotations suppress weeds ? A meta analysis. *Plos One*, 14 (7) : 1-12.

75. Woźniak A & Rachon L., 2019. Effect of tillage systems on pea crop infestation with weeds. *Archives of Agronom and Soil Science*, 65 (7) : 877-885.

76. Woźniak A., 2018. Effect of tillage system on the structure of weed infestation of winter wheat. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 16 (4): e1009.

77. Woźniak A. & Soroka M., 2018. Effect of crop rotation and tillage system on the weed infestation and yield of spring wheat and on soil properties. *Applied Ecology and Environmental Research*, 16(3): 3087-3096.

78. Zhang J. & Wu L. F., 2021. Impact of tillage and crop residue management on the weed community and wheat yield in a wheat-maize double cropping system. *Agriculture*, 11 : 265.

Chapitre II : Effet de la rotation culturale dans le semis direct et le travail conventionnel sur la diversité des Champignons Mycorhiziens Arbusculaires (CMA) et des vers de terre dans la zone semi-aride de l'Est d'Algérie (Cas de Sétif)

Résumé

L'étude a été menée sur les sols de la ferme expérimentale de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC- Sétif). Elle vise à évaluer l'impact de la rotation des cultures avec quatre cultures (blé, triticale, lentille et pois fourrager) dans deux systèmes de travail du sol (semis direct et travail conventionnel) sur la diversité des champignons mycorhiziens arbusculaire et des vers de terre. Les résultats montrent que le taux de colonisation total des racines par les champignons mycorhiziens arbusculaires était plus élevé dans les parcelles en semis direct que dans celles en travail conventionnel. Les racines des céréales (blé et triticale) ont enregistré un taux de colonisation total plus élevé semis direct, tandis que les légumineuses (lentille et pois fourrager) ont présenté un taux plus élevé en travail conventionnel. Les indices de diversité (Shannon, Simpson et Margalef), des champignons mycorhiziens à arbusculaires n'ont pas été significativement affectés par les cultures incluant dans la rotation ni par les systèmes de travail du sol, bien que la diversité ait été plus élevée dans les parcelles en semis direct. En raison des températures élevées et de l'humidité insuffisante du sol, aucun ver de terre n'a été observé dans les quatre cultures, que ce soit en semis direct ou en travail conventionnel. L'agriculture de conservation basée sur la rotation des cultures et le semis direct permet de maintenir la diversité des champignons mycorhiziens arbusculaires et donc d'améliorer la durabilité des systèmes agricoles dans la zone semi-aride.

Mots clés: Champignons mycorhiziens arbusculaires, vers de terre, semis direct, labour, céréales, légumineuses, semi-aride.

I. Introduction

Les vers de terre et les champignons mycorhiziens à arbuscule (CMA) sont des composantes importantes de la vie biologique du système souterrain. Les CMA jouent un rôle vital dans l'amélioration de la qualité du sol en augmentant la stabilité des agrégats du sol par la production de glomaline (**Curaqueo et al., 2011**). De plus, les CMA améliorent l'efficacité d'absorption d'eau et la résistance à la sécheresse des cultures (**Hu et al., 2022**), et ils réduisent les effets des pathogènes et des ravageurs (**Schaefer et al., 2021**). Selon **Kahiluoto et al. (2009)** et **Prasanna et al. (2016)**, les CMA favorisent la nutrition et la croissance des plantes, tout en réduisant le lessivage des éléments nutritifs, en particulier les éléments immobiles tels que le phosphore, le zinc et le cuivre.

Les vers de terre jouent un rôle important dans le fonctionnement du sol. Ils décomposent la litière et l'incorporent au sol, construisent et maintiennent la structure du sol en creusant des galeries et en modifiant l'agrégation du sol, et contrôlent en partie la diversité et l'activité microbienne (**Blanchart & Jouquet, 2015**). De plus, les lombrics émettent des signaux chimiques qui stimulent la résistance des plantes aux parasites notamment les nématodes (**Pouge, 2016**).

Les pratiques agricoles conventionnelles (labour, jachère nue, monoculture) pratiquées dans les zones arides et semi-arides ont une influence négative sur la communauté des vers de terre et les CMA. Le travail conventionnel du sol a entraîné une réduction importante de la densité de la population et de la masse de vers de terre dans les 20 cm supérieures du sol (**Vitro et al., 2007**). De plus, le travail conventionnel (TC) du sol enfouit et/ ou expose les des champignons mycorhiziens à arbuscule à des contraintes environnementales, ce qui dilue et détruit les propagules et réduit par conséquent le potentiel d'inoculum du sol (**Sebbane et al., 2023**).

La monoculture entraîne une faible diversité des CMA (**Verbruggen & Toby Kiers, 2010**), car elle sélectionne les espèces des champignons mycorhiziens à arbuscules qui poussent et sporulent rapidement, mais qui offrent le moins d'avantages à la plante car elles détournent plus de ressources pour leur propre croissance et reproduction (**Gosling et al., 2006**). De même, le remplacement de la culture par une période de jachère nue réduit l'infectivité des CMA (**Jansa et al., 2006**), car l'absence de plante hôte entraîne une réduction des réserves de propagules mycorhiziennes (**Miller & Jastrow, 1992**).

La conservation de la communauté des vers de terre et des champignons mycorhiziens à arbuscule est un aspect essentiel pour développer des stratégies visant à accroître la productivité des systèmes agricoles de manière plus durable. Ainsi, la recherche de techniques de gestion du sol permettant de maintenir et d'améliorer la diversité des CMA et des lombrics est essentiel. Dans ce contexte, l'agriculture de conservation apparaît comme une solution prometteuse de conserver la diversité biologique du sol.

La pratique de l'agriculture de conservation fondée sur le semis direct (SD) et la diversification des cultures par la rotation culturale contribue à maintenir la diversité des communautés de champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) et de lombrics et par conséquent, permet de préserver la durabilité agricole dans les zones semi-arides. La réduction de l'intensité du travail du sol a modifié la distribution verticale du carbone organique dans la couche arable, ce qui a eu des effets positifs sur la biodiversité des lombrics et a permis de préserver le fonctionnement du sol (**Ernst & Emmerling, 2009**). De plus, le travail de conservation du sol, en évitant la perturbation du sol, a fourni un environnement favorable à la multiplication des spores des CMA et à l'augmentation de leur potentiel d'inoculum (**Castelli et al., 2014**).

La rotation des cultures prenant en compte un plus grand nombre d'espèces végétales peut entraîner une plus grande diversité des communautés de CMA dans le sol et empêcher la sélection de champignons mycorhiziens opportunistes (**Jansa et al., 2006 ; Parihar et al., 2020**). De plus, la rotation des cultures a un effet positif sur les lombrics : une rotation de 4 ans incluant des légumineuses favorise le développement des populations de vers de terre (**Rodriguez et al., 2020**).

L'objectif de la présente étude était de comparer la diversité des champignons mycorhiziens et des vers de terre dans la rotation des cultures en semis direct et en travail conventionnel et de déterminer les effets des cultures précédentes sur les espèces des CMA et de lombrics. Les questions spécifiques abordées dans cette étude sont les suivantes :

(i) Le type de cultures de la rotation et la technique de travail du sol (semis direct et travail conventionnel) ont-ils une incidence sur la colonisation des racines et l'abondance des spores de la communauté de CMA et la diversité des populations des vers de terre ?

(ii) Les différents types de culture de rotation analysés et leur mode de gestion (semis direct ou travail conventionnel) peuvent-ils être distingués par des assemblages spécifiques de CMA associés aux racines ?

II. Matériel et Méthodes

II.1 Site d'étude

L'expérimentation a été menée au cours de la campagne agricole 2018/2019, sur le site de la ferme expérimentale agricole de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Sétif, située à 4 Km au sud-ouest de la ville de Sétif, sur le lieu dit R'Mada. Les coordonnées géographiques du site sont les suivantes : 962 m d'altitude, latitude 36°08' Nord et la longitude 5°20' Est. Le climat de la région d'étude est de type continental semi-aride méditerranéen, caractérisé par des températures hivernales très basses et des températures estivales très élevées. En automne et au printemps, les températures sont plus douces bien que les gelées soient fréquentes au début du printemps. La pluviométrie moyenne est de 400 mm/an (Benider et al., 2021).

II.2. Caractéristiques pédoclimatiques du site expérimental

Les caractéristiques pédoclimatiques du site expérimental sont les suivantes : le sol possède une texture limono-argileuse, un pH de 7,82, un taux de matière organique de 1,69 %. Le sol a une teneur modérée en calcaire, en potassium et en magnésium, une teneur moyenne en azote, une bonne teneur en phosphore, et faible teneur en sodium.

Afin de déterminer les conditions climatiques de la campagne 2018-2019, un suivi régulier a été réalisé par la station météorologique de l'ITGC de Sétif. Les principales données sont présentées dans la courbe ombrothermique de la **figure 1**. Le cumul annuel des précipitations s'élève à 356,2 mm pour la période allant de septembre à juin. La période humide s'étend d'octobre à avril, avec le mois de janvier enregistrant la plus forte pluviométrie avec 77,1 mm. Les températures moyennes varient de 3,6 °C en janvier (mois le plus froid) à 28,8 °C en juin (mois le plus chaud) pour la campagne agricole 2018-2019 (**Figure 01**).

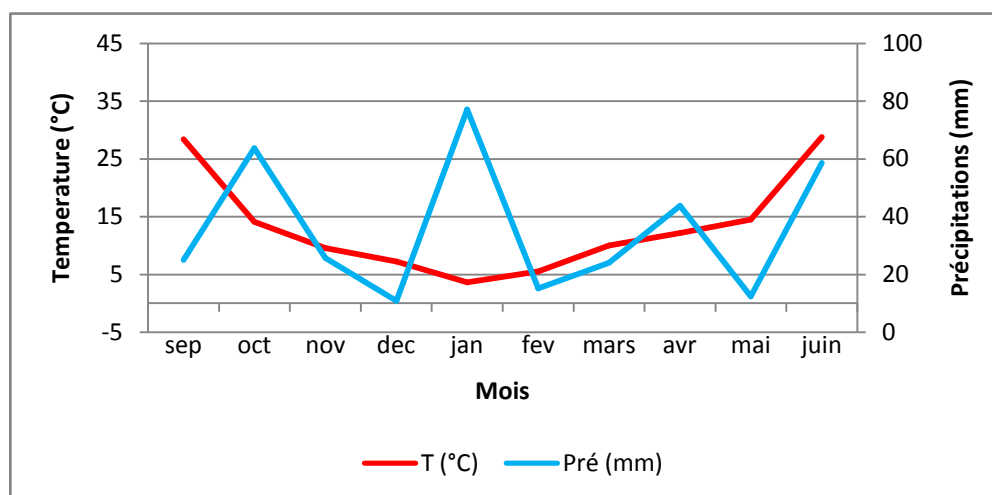


Figure 01: Diagramme ombrothermique de la campagne agricole 2018/19.

II.3. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé comprenait : i) Bousselem (pedigree : Can2109 // jo / aa / 3 / s15 / cr) comme variété de blé dur (*Triticum durum*, Desf), ii) triticales (*Triticum secale* Wittm), variété Clercal, iii) Syrie 229 variété de lentille (*Lens culinaris* L.) et iv) Seffrou, variété de pois fourrager (*Pisum sativum* L.).

II.4. Installation et conduite de l'expérimentation

Le dispositif expérimental adopté est un strip-plot ou nommé split-block (ou parcelles divisées), organisé en bloc aléatoire complet avec trois répétitions. Les parcelles élémentaires ont une superficie de 50 m de longueur 10 m de largeur. L'espace entre les blocs et les parcelles élémentaires est respectivement 5 m et 2 m. Le premier facteur dispose de deux modalités: semis direct et travail conventionnel. Le deuxième facteur correspond aux rotations (**Figure 02 chapitre 04**).

II.4.1. Techniques de travail du sol

Deux techniques de travail du sol qui diffèrent par leur degré de fragmentation de la couche arable et par l'effet de retournement ou non de la couche du sol travaillée ont été comparées :

- **Travail conventionnel** : un travail profond du sol a été effectué à l'aide d'une charrue à soc jusqu'à une profondeur d'environ 30 cm, suivi d'un passage de cover-crop et un hersage.
- **Le semis direct (non labour)** : Aucun travail du sol n'a été effectué avant le semis. Le semis a été réalisé directement avec un semoir spécialisé à dents de type John Shearer d'Australie, avec un espacement entre les rangs de 0,23 m.

II.4. 2 Mise en place des cultures

La mise en place des cultures a été réalisée fin décembre pour le semis direct et le travail conventionnel. La dose de semis appliquée est de 300 grains/ m² pour les céréales et de 250 grains/ m² pour les légumineuses.

II.4.3 Entretien des cultures

II.4.3.1. Fertilisation du sol

La fertilisation de fond a été appliquée au moment du semis pour le semis direct et avant le semis pour le travail conventionnel, avec 100 kg/ha de TSP 46% (0, 46, 0). Pour les céréales, l'épandage d'engrais de couverture sous forme d'Urée 46% a été effectué mécaniquement en deux fractions : la première au stade trois feuilles à raison de 40 kg et la deuxième au stade épi un centimètre à raison de 60 kg (soit 27.5 unité d'azote). Aucun apport d'engrais azoté n'a été effectué pour les légumineuses.

II.4.3.2. Désherbage

Afin d'éliminer l'ensemble des mauvaises herbes des essais, l'opération de désherbage a été effectuée en deux passages pour le système semis direct et en un seul passage pour le système conventionnel comme le montre le **tableau 01**.

Tableau 01 : Désherbage chimique de l'essai

Système	Herbicide	Dose	Date
Semis direct	Herbicide total: Glyphosate	3 l/ha	Avant semis (Toutes les cultures)
	Double action: Topik/ Zoom	0.75 l/ha et 150 g/ha	12/03/2019 (Les céréales)
Travail conventionnel	Double action: Topik/ Zoom	0.75 l/ha et 150 g/ha	12/03/2019 (Les céréales)

II.5. Mesures effectuées

II.5.1 Etude de l'effectif des vers de terre

L'impact de la technique de travail du sol, à savoir le semis direct et le travail conventionnel, sur l'effectif des vers de terre a été étudié dans les différentes rotations culturales (blé/ lentille, triticales/ pois fourrager, pois fourrager/ triticales, lentille/ blé en 2018 et triticales/ pois fourrager/ blé, blé/ lentille/ triticales, lentille/ blé/ pois fourrager et pois fourrager/ triticales/ lentille en 2019). Cette étude a été menée de mars 2018 et mars 2019 selon la méthode décrite par **Vigot & Cluzeau (2014)**. Cette méthode consiste à diluer 300 g de moutarde fine et forte dans 10 litres d'eau, puis à verser les 10 litres sur une placette de 1 m² dans une zone représentative de la parcelle. Après 15 minutes, un deuxième arrosage est réalisé sur la même placette. Les vers qui sortent sont alors récoltés à l'aide d'une pince et placés dans une boîte d'au moins 10 cm de hauteur contenant de l'eau (**Figure 02**) (**annexe 02**).



Figure 02: Photos montrent le diagnostic des vers de terre sur champs. (Photo originale).

II.5.2. Etude de la diversité des champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA)

II.5.2.1. Mesure du taux de colonisation des racines par CMA

Au stade de floraison des quatre cultures, des échantillons de racines ont été prélevés, nettoyés, éclaircis dans une solution de KOH (10%) et colorés dans une solution d'encre (Scheffer noir) (5%) et d'acide acétique (5%), selon la méthode de **Vierheilig et al. (1998)**. Le taux de colonisation total (TCT), ainsi que arbusculaire (TCA) et vésiculaire (TCV) ont été calculés par l'observation microscopique de quatre lames contenant 15 fragments racinaires chacune, en suivant la méthode de **McGonigle et al. (1990)** (**annexe 01**).

➤ **Calcul des pourcentages de colonisation des racines par les CMA**

- $TCT \% = (G - P) / G * 100$,
- $TCA \% = (q + s) / G * 100$,
- $TCV \% = (r + s) / G * 100$.

Avec **G**: nombre total des fragments, **P**: aucune structure mycorhizienne, **q**: présence d'arbuscules, **r**: présence de vésicules, **s**: présence d'arbuscules et de vésicules.

II.5.2.2. Densité des spores

La densité des spores (DS) dans la rhizosphère des plantes cultivées a été calculée par observation sous une loupe (x 45) après leur extraction suivant la méthode **d'Ianson & Allen (1986)**. 3 g de sol séché et tamisé sont placés dans un tube à centrifuger (15 ml) puis le tube est rempli d'eau distillée jusqu'au repère de 14 ml. Le tube est soigneusement agité pour s'assurer que le sol soit totalement humidifié, puis laissé en repos pendant 15 minutes. Une première centrifugation pendant 10 minutes à 2500 tours/minute permet d'éliminer les débris organiques flottants. Après l'ajout de 4 ml d'une solution de sucrose (2 M) et de calgon (10%), le tube est agité de nouveau puis laissé au repos pendant 10 minutes. Une deuxième centrifugation pendant 20 minutes à 2500 tours/minute permet de récupérer les spores contenues dans la solution (sucre-caglon) à l'aide d'un papier filtre placé dans un entonnoir. Après le filtrage de la solution et le rinçage de l'excès de sucre par l'eau, le papier filtre est placé dans une boîte de Pétri sous une loupe pour observer et isoler les spores (**annexe 01**)

➤ **Identification morphologique des spores des champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA)**

Les spores isolées à partir des échantillons de sol sont triées manuellement sous la loupe binoculaire selon les caractères morphologiques comme la couleur, la forme, et la taille. Dans chaque lot homogène, quelques spores sont montrées entre lame et lamelle et observées au microscope optique (photonique). L'identification est faite grâce aux caractéristiques des spores et sporocarpes décrites par le site officiel d'INVAM (<https://invam.ku.edu/species-descriptions>) et le **Handbook of arbuscular mycorrhizal fungi (Souza, 2015)**, en se basant sur la taille des spores, la couleur, la structure de la paroi et l'attachement des hyphes.

II.5.2.3. Etude de la diversité des champignons mycorhiziens arbusculaires

L'étude de la diversité des champignons mycorhiziens arbusculaires pour les différentes rotations culturales et les deux techniques de travail du sol (semis direct, SD et travail conventionnel, TC) a fait appel au calcul de l'abondance relative (AR), l'indice de Shannon-Wiener (**H'**), de l'indice de Simpson (**C**), et de l'indice de Margalef (**Dmg**).

➤ **Abondance relative (AR)** : l'abondance relative de chaque espèce dans chaque traitement a été calculée selon la méthode fournie par **Johnson et al. (1991)** :

$$AR (\%) = (n/N) \times 100$$

D'où : n = nombre de spores identifiées, N = nombre total de spores. Cela a permis de déterminer l'abondance relative de chaque famille de spores.

➤ **Indice de Shannon-Wiener (H')** : est calculé selon la formule décrite par **Souza et al. (2010)** comme mentionné ci-dessous :

$$H' = - \sum_{i=1}^s \frac{n_i}{n} \ln(n_i/n)$$

D'où **ni**: est le nombre d'individus de l'espèce **i**, **n**: est le nombre totale des individus de tous les espèces, **S** est le nombre d'espèces de l'échantillon étudié.

➤ **Indice de diversité de Simpson (C)**: l'indice de Simpson est calculé selon la formule suivante :

$$C = 1 - \frac{\sum ni (ni-1)}{N (N-1)}$$

D'où : **ni**: est le nombre d'individus de l'espèce **i** ;

N: Nombre d'individus total des espèces de l'échantillon étudié.

➤ **Indice de Margalef (Dmg)**: Cet indice est calculé par la formule suivante :

$$Dmg = (S-1) / \ln N \text{ (Maurer et al., 2018)}$$

D'où : **S**: c'est le nombre d'espèces (la richesse) ;

N: Nombre d'individus total des espèces.

II.6. Analyses statistiques

Les données collectées à partir des différentes mesures des expérimentations ont été analysées statistiquement à l'aide du logiciel XLSTAT 2019, selon une analyse de variance basée sur la comparaison des moyennes de Fisher (LSD). La relation entre les différentes paires de variables a été étudiée par le calcul des coefficients de corrélation. Une autre analyse descriptive multidimensionnelle a également été effectuée; à savoir l'analyse en composantes principales (ACP).

III. Résultats et discussion

III.1. Etude de l'effectif des vers de terre

Il est à noter que l'étude de l'effectif des lombrics a été prise en compte suite aux observations visuelles des galeries, qui ont bien montré la présence des vers de terre principalement dans la parcelle du semis direct comparativement à la technique conventionnelle. Selon **Dree et al. (1994)**, les galeries de vers de terre étaient plus abondantes dans les parcelles de semis direct que dans celles de travail conventionnel.

L'absence des vers de terre lors des deux campagnes 2017/18 et 2018/19 dans les techniques de semis direct et de travail conventionnel peut être due aux températures élevées et à la sécheresse pendant la période d'échantillonnage (mois de mars). D'après **Johnson-Maynard et al. (2007)**, la mortalité ou l'enfouissement profond des vers de terre est probablement causé par une faible humidité du sol combinée à des températures élevées, ce qui limite leur activité. Selon **Metzke et al. (2007)**, l'absence totale de vers de terre est s'explique par l'absence de pluie pendant les deux semaines précédant la période d'échantillonnage. De plus, l'utilisation des produits phytosanitaires, notamment les herbicides, a pu affaiblir les populations des vers de terre (**Jossi et al., 2011**).

L'absence des vers de terre dans le système de travail conventionnel était due au travail du sol à long terme, à la perturbation des populations de lombrics et à la création d'un environnement pédologique défavorable (**Clapperton et al., 1997**). De plus, le labour conventionnel expose les lombrics aux prédateurs et à la dessiccation (**Bouthier et al., 2014**), ce qui réduit leur densité.

III.2. Effet des techniques de travail du sol et du type de cultures sur le taux de colonisation total (TCT), le taux d'arbuscules (TCA) et le taux de vésicules (TCV)

En association avec les racines vivantes, les champignons mycorhiziens à arbuscules produisent des hyphes, des arbuscules, des vésicules et des spores à l'intérieur du cortex racinaire (Kehri *et al.*, 2018). Les vésicules, formées à l'intérieur de la racine, inter et intracellulaire qui agissent comme des structures de stockage (Gupta *et al.*, 2019). Les arbuscules sont des structures éphémères destinées au transfert des nutriments et à la fonction d'absorption entre les deux partenaires symbiotiques (champignon et plante hôte), (Chahal *et al.*, 2021), comme le montre la **figure 03**.

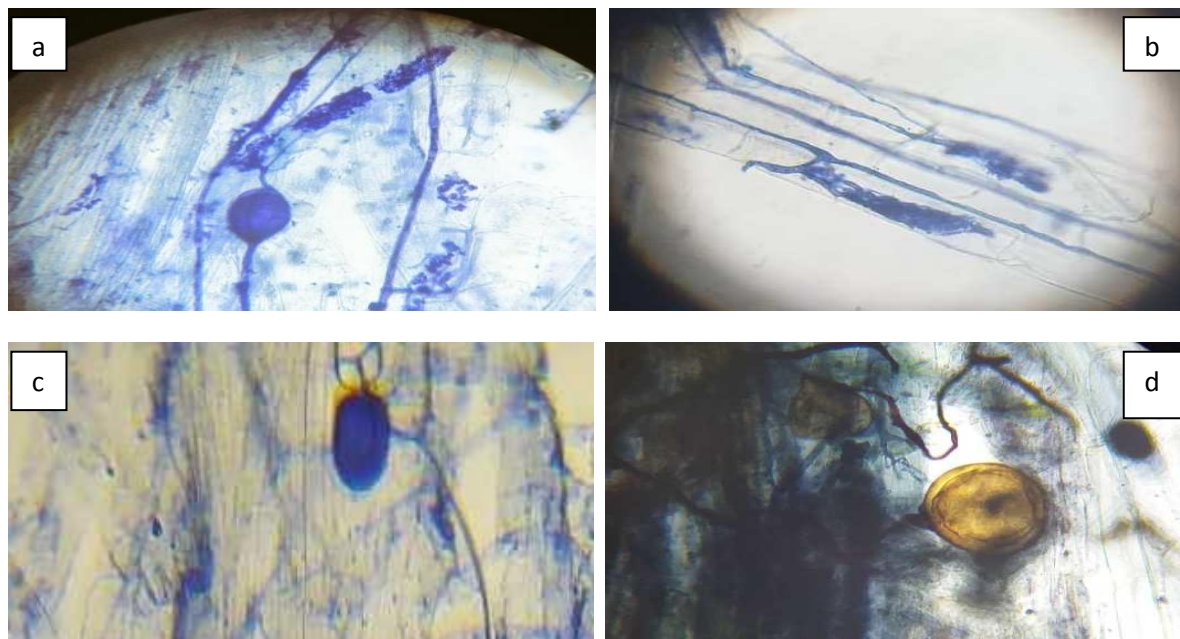


Figure 03 : Structures formés par l'association des racines avec les CMA « **a**: arbuscule + vésicule », « **b**: arbuscule », « **c**: vésicule » et « **d**: spore formé à l'intérieur du cortex racinaire » (Photos originales)

III.2.1. Taux de colonisation des racines par les arbuscules (TCA) (en %)

L'effet du système de travail du sol et du type de culture, ainsi que leur interaction n'a pas d'effet significatif ($P > 0,05$) sur le taux de colonisation par les arbuscules (**Tableau 05**). En moyenne générale, le TCA est un peu plus élevé dans les racines des plantes échantillonnées dans les parcelles de travail conventionnel (28,80 %) que dans celles conduites en semis direct (SD) (25,12 %), ce qui contredit les résultats de **Hadj Youcef Taibi *et al.* (2021)** et de **Sebbane *et al.* (2023)**, qui ont montré que le pourcentage d'arbuscules était plus faible dans les parcelles labourées.

Concernant les cultures de la rotation culturale, le taux de colonisation par les arbuscules est plus élevé dans les racines de blé (42,10 %) et plus faible dans les racines de triticales (19,51 %). Les racines de lentille et de pois fourrager ont un taux de colonisation par les arbuscules de 23,58 % et 22,65 % respectivement (**Figure 04**).

La comparaison des moyennes du taux de colonisation par les arbuscules des racines des quatre cultures dans les deux modes de travail du sol montre que les racines de céréales

(blé et triticales) ont un taux de colonisation par les arbuscules plus élevé en technique de semis direct (47,16 % et 25,68 % respectivement), tandis que les racines de lentille et pois fourrager ont enregistré un taux de colonisation par les arbuscules plus élevé en technique de labour conventionnel, avec des moyennes respectives de 27,16 % et 37,65 % (**Figure 04**).

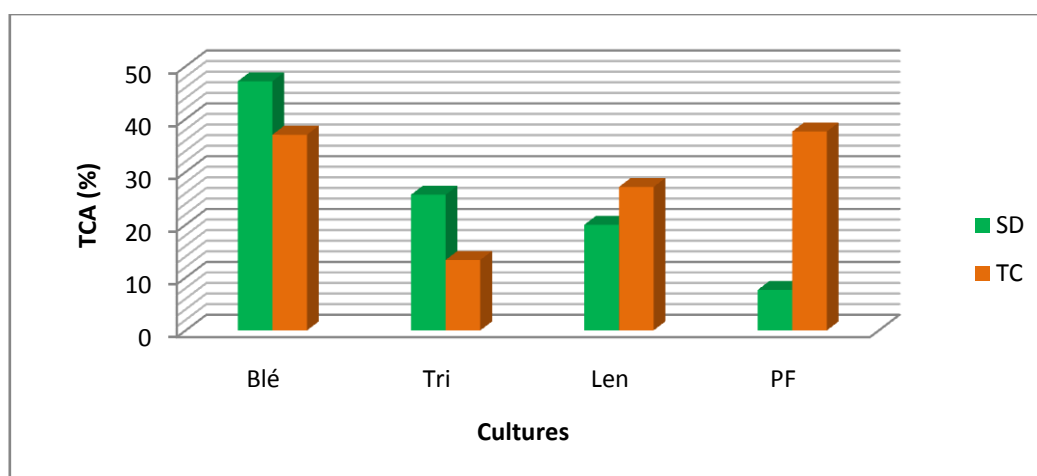


Figure 04: Taux de colonisation arbusculaire (TCA) dans les quatre cultures soumise dans deux techniques de travail du sol. (*SD: semis direct, TC: travail conventionnel, Tri: triticales, Len: lentille, PF: pois fourrager.*)

III.2.2. Taux de colonisation des racines par les vésicules (TCV) (%)

D'après le **tableau 05**, le taux de colonisation des racines par les vésicules a été très hautement significativement différent sous l'effet de la culture ($P < 0,001$) et hautement significativement différent sous l'effet des techniques de travail du sol ($P < 0,01$). L'interaction entre la technique de travail du sol et la culture n'a pas d'effet significatif sur le taux de colonisation par les vésicules.

Les racines des parcelles en semis direct (SD) ont enregistré un taux de colonisation par les vésicules plus élevé (moyenne de 16,35 %) que les racines des parcelles en travail conventionnel (TC) (10,06 %). Les racines de lentille ont enregistré le taux de colonisation par les vésicules le plus élevé (20,60 %), tandis que les racines de blé ont enregistré le taux de colonisation par les vésicules le plus faibles (6,05 %).

Selon la **figure 05**, les racines des quatre cultures (blé, triticales, lentille et pois fourrager) ont enregistré des taux de colonisation par les vésicules plus élevés dans les parcelles en SD que dans les parcelles en TC. D'après **Mouelhi et al. (2016)**, les légumineuses ont un taux de colonisation par les vésicules plus faible en TC qu'en SD.

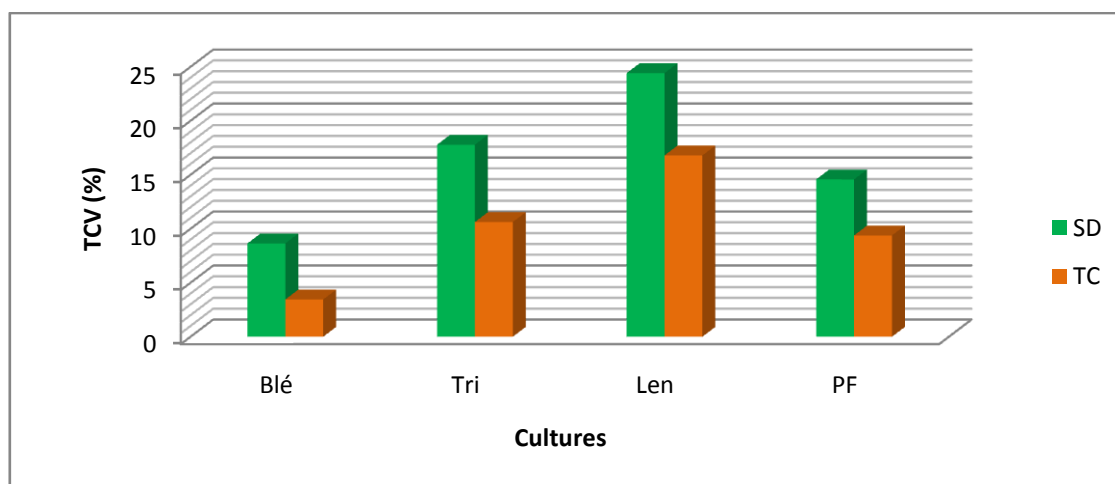


Figure 05: Taux de colonisation vésiculaire (TCV) dans les quatre cultures soumises dans deux techniques de travail du sol. (*SD*: semis direct, *TC*: travail conventionnel, *Tri*: triticales, *Len*: lentille, *PF*: pois fourrager.)

III.2.3. Taux de colonisation total des racines par les par les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA)

Le taux de colonisation total des racines a été significativement affecté par l'interaction entre la technique de travail du sol et le type de culture ($P < 0,05$). Ni la technique de travail du sol, ni le type de culture n'ont pas eu d'effet significatif seul sur le taux de colonisation total des racines ($P > 0,05$), comme le montre le **tableau 05**.

La comparaison des moyennes a montré que les racines des parcelles en semis direct (SD) ont un taux de colonisation total par les CMA légèrement plus élevé (37,65) que celles des parcelles en travail conventionnel (TC) (37,10 %). Le travail conventionnel du sol a entraîné un retard et une réduction de la colonisation mycorhizienne en raison de la perturbation physique du réseau hyphal fongique actif dans le sol et de la diminution des spores produites, ce qui a provoqué une baisse de l'inoculum dans le sol et donc une diminution du taux de colonisation des racines par les CMA (**Miller & Jastrow, 1992 ; Borie et al., 2006**). En revanche, la technique de semis direct permet de conserver les mycéliums extra-racinaires intacts et permet à la culture suivante de bénéficier du mycélium développé par la culture précédente de la rotation (**Brito et al., 2011**), entraînant ainsi une augmentation du taux de colonisation des racines par les CMA.

Les racines de blé ont une valeur de taux de colonisation élevée (46,67%) par rapport aux racines de lentille (37,04%), de pois fourrager (33,83%) et de triticales (31,98%). Le taux de colonisation par les CMA varie selon l'espèce végétale en raison de différences dans la structure des racines (**Molla & Solaiman, 2009**). Selon **Jebri et al. (2021)**, cette différence de taux de colonisation total entre les espèces peut être liée à production de glucides par ces cultures, utilisés par les CMA. De plus, le taux de colonisation total élevé des racines de blé a probablement été causé par les différences d'infectiosité du sol dues aux cultures précédentes (pois fourrager et lentille).

Les racines de blé et de triticales ont des taux de colonisation total par les CMA plus élevés dans les parcelles de SD, atteignant respectivement 53,58% et 40,99% que dans les

parcelles en TC. Selon **Brito et al. (2012 a)**, le taux de colonisation par les CMA des racines de blé et de tritcale était plus élevé dans les parcelles en SD que dans celles en TC. D'après **Chaieb et al. (2021)**, le pourcentage de colonisation total des racines d'avoine par les CMA est également plus élevé en SD qu'en TC. En revanche, les racines de lentille et de pois fourrager ont enregistré un taux de colonisation total par les CMA plus élevé dans les parcelles conduites de manière conventionnelle, avec des moyennes respectives de 39,26% et 46,42% (**Figure 06**).

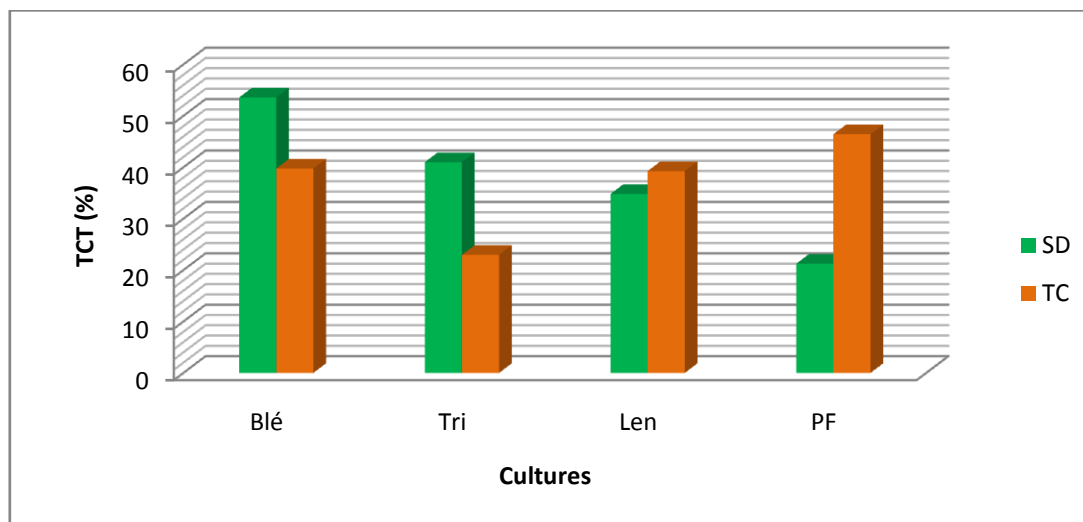


Figure 06: Taux de colonisation total (TCT) dans les quatre cultures soumises dans deux techniques de travail du sol. (SD: semis direct, TC: travail conventionnel, Tri: tritcale, Len: lentille, PF: pois fourrager.)

III.3. Etude de la diversité des Champignons Mycorhiziens Arbusculaires (CMA)

III.3.1. Effet des techniques de travail du sol et les différentes cultures sur la densité des spores des CMA dans le sol

Les techniques de travail du sol n'ont pas d'effet significatif ($P > 0,05$) sur la densité des spores des CMA dans le sol (**Tableau 05**). Ce résultat corrobore ceux de **Curaqueo et al. (2011)** et de **Hu et al. (2015)**, qui n'ont pas observé de différence significative dans la densité des spores entre les deux systèmes de travail du sol. La densité des spores a varié de 61,33 à 67,33 spores/ g de sol dans les parcelles conduites conventionnellement et dans les parcelles en non-labour, respectivement. La densité des spores des champignons mycorhiziens arbusculaires est plus élevée dans les parcelles en non-labour que dans les parcelles labourées. Selon **Borie et al. (2006)** ; **Castillo et al. (2006)**, le nombre des spores des CMA est plus élevé dans les parcelles en semis direct (SD) que celles en travail conventionnel (TC).

L'analyse de la variance a révélé un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) de la culture sur la densité des spores des CMA (**Tableau 05**). Les parcelles de tritcale et de blé ont enregistré une densité de spores plus élevée (81,67 et 63,17 spores/g de sol, respectivement) que les parcelles de pois fourrager et de lentille (59,17 et 53,33 spores/g de sol, respectivement). Les précédentes cultures de lentilles et de pois fourrager semblent avoir augmenté la capacité de sporulation des CMA dans les parcelles de tritcale et de blé, expliquant la densité de spores plus élevée dans ces céréales. À l'inverse, les céréales

n'augmentent pas la sporulation des CMA (Vestberg *et al.*, 2011), ce qui explique la faible densité de spores dans les parcelles de lentille et de pois fourrager, probablement due à l'effet de la culture précédente, qui était une céréale.

La densité des spores des CMA dépend significativement ($P < 0,05$) de l'interaction entre la culture et les techniques de travail du sol (Tableau 05). Dans les deux techniques de travail du sol (SD et TC), les parcelles de triticales ont enregistré les densités de spores des CMA les plus élevées (84,33 et 79 spores/g de sol, respectivement) (Figure 07). Les parcelles de triticales, de lentille et de pois fourrager ont enregistré des densités de spores plus élevées en SD qu'en TC, tandis que les parcelles de blé ont enregistré une densité élevée dans les parcelles labourées (68,67 spores/g de sol) que dans celles en non-labour (57,67 spores/g de sol) (Figure 07).

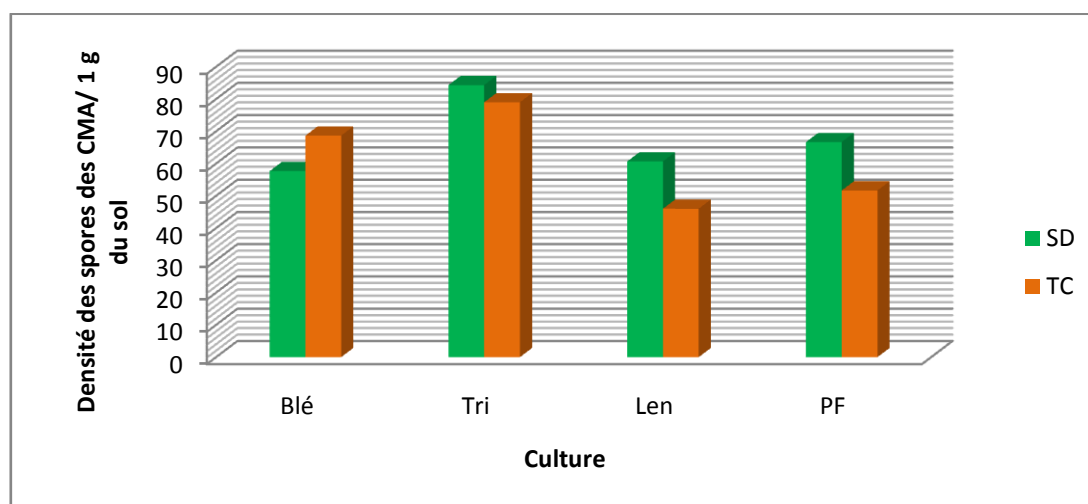
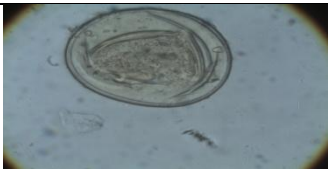
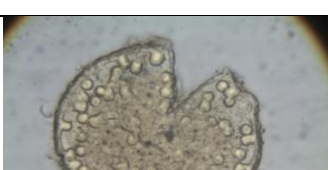
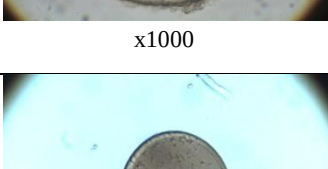
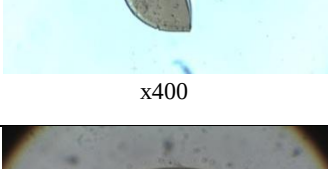


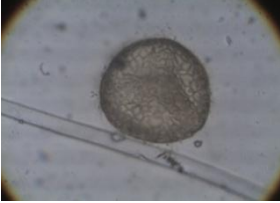
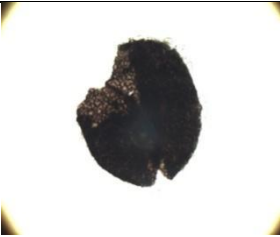
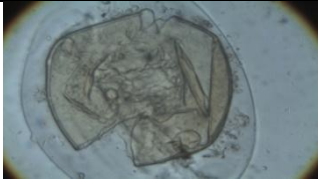
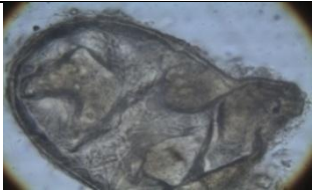
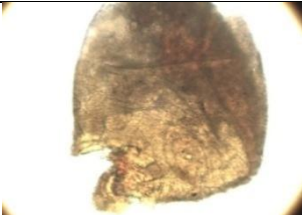
Figure 07: Densité des spores (DS) dans les quatre cultures soumises dans deux techniques de travail du sol. (SD: semis direct, TC: travail conventionnel, Tri: triticales, Len: lentille, PF: pois fourrager.)

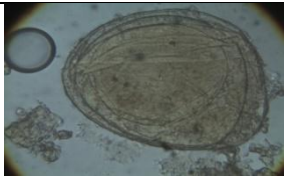
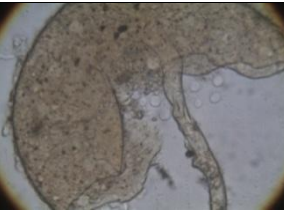
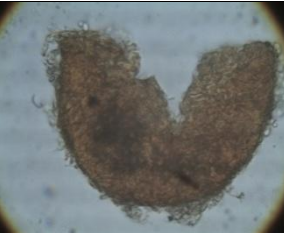
III.3.2. Etude de la diversité des champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) à l'aide d'indices de diversité

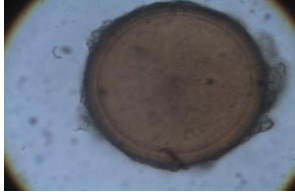
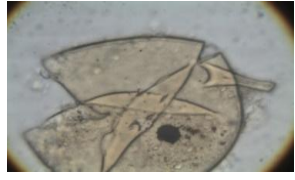
Au total, 39 espèces des champignons mycorhiziens arbusculaires appartenant à 7 familles ont été identifiées (Tableau 02); *Acaulosporaceae* avec 13 espèces, *Glomeraceae* avec 17 espèces, *Paraglomeraceae* avec une espèce, *Gigasporaceae* avec 4 espèces, *Diversisporaceae* avec deux espèces, *Claroideoglomeraceae* avec une espèce et *Ambisporaceae* avec une espèce. De plus, 7 morphotypes n'ont pas pu être identifiés en raison de manque des critères de classification (Tableau 03).

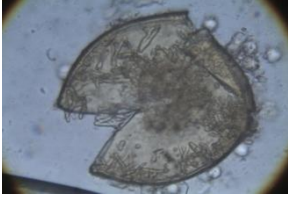
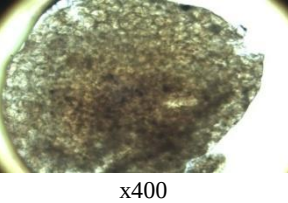
Tableau 02 : Espèces identifiées des champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA)

Photo	Nom de l'espèce	genre	La famille
 x1000	<i>Acaulospora delicata</i>	<i>Acaulospora</i>	<i>Acaulosporaceae</i>
 x400	<i>Acaulospora koskei</i>	<i>Acaulospora</i>	<i>Acaulosporaceae</i>
 x1000	<i>Acaulospora morrowiae</i>	<i>Acaulospora</i>	<i>Acaulosporaceae</i>
 x400	<i>Acaulospora laevis</i>	<i>Acaulospora</i>	<i>Acaulosporaceae</i>
 x1000	<i>Acaulospora foveata</i>	<i>Acaulospora</i>	<i>Acaulosporaceae</i>
 x 400	<i>Acaulospora reticulata</i>	<i>Acaulospora</i>	<i>Acaulosporaceae</i>

 (x400)	<i>Acaulospora colossica</i>	<i>Acaulospora</i>	<i>Acaulosporaceae</i>
 (x1000)	<i>Acaulospora excavata</i>	<i>Acaulospora</i>	<i>Acaulosporaceae</i>
 (x400)	<i>Acaulospora bireticulata</i>	<i>Acaulospora</i>	<i>Acaulosporaceae</i>
 (x1000)	<i>Acaulospora sp</i>	<i>Acaulospora</i>	<i>Acaulosporaceae</i>
 (x1000)	<i>Acaulospora gedanensis</i>	<i>Acaulospora</i>	<i>Acaulosporaceae</i>
 (x400)	<i>Entrophospora kentinensis</i>	<i>Acaulospora</i>	<i>Acaulosporaceae</i>
 (x1000)	<i>Acaulospora spinosissima</i>	<i>Acaulospora</i>	<i>Acaulosporaceae</i>
 x400	<i>Glomus viscosum</i>	<i>Septoglomus</i>	<i>Glomeraceae</i>

 (x400)	<i>Septoglomus constrictum</i>	<i>Septoglomus</i>	<i>Glomeraceae</i>
 x1000	<i>Glomus faciculatum</i>	<i>Rhizophagus</i>	<i>Glomeraceae</i>
 x400	<i>Glomus flavisporum</i>	<i>Glomus</i>	<i>Glomeraceae</i>
 (x1000)	<i>Glomus reticulatum</i>	<i>Glomus</i>	<i>Glomeraceae</i>
 (x1000)	<i>Glomus hoi</i>	<i>Glomus</i>	<i>Glomeraceae</i>
 (x1000)	<i>Glomus macrocarpum</i>	<i>Glomus</i>	<i>Glomeraceae</i>
 (x1000)	<i>Rhizoglomus intraradices</i> (<i>Rhizophagus intraradices</i>)	<i>Rhizophagus</i>	<i>Glomeraceae</i>
 x1000	<i>Rhizophagus sinuosum</i>	<i>Rhizophagus</i>	<i>Glomeraceae</i>

 (x400)			
 x400	<i>Rhizoglopus clarus</i>	<i>Rhizophagus</i>	<i>Glomeraceae</i>
 (x1000)	<i>Glomus aggregatum</i>	<i>Rhizophagus</i>	<i>Glomeraceae</i>
 (x1000)	<i>Rhizoglopus melanum</i>	<i>Rhizophagus</i>	<i>Glomeraceae</i>
 (x1000)	<i>Rhizophagus irregularis</i>	<i>Rhizophagus</i>	<i>Glomeraceae</i>
 (x 1000)	<i>Funneliformis mosseae</i>	<i>Funneliformis</i>	<i>Glomeraceae</i>
 (x1000)	<i>Glomus geosporum</i>	<i>Funneliformis</i>	<i>Glomeraceae</i>

 x400	<i>Glomus spinuliferum</i>	<i>Glomus</i>	<i>Glomeraceae</i>
 (x1000)	<i>Glomus etunicatum</i>	<i>Glomus</i>	<i>Glomeraceae</i>
 (x1000)	<i>Glomus occultum</i>	<i>Paraglomus</i>	<i>Paraglomeraceae</i>
 x1000	<i>Scutellospora projecturata</i>	<i>Scutellospora</i>	<i>Gigasporaceae</i>
 x400	<i>Scutellospora calospora</i>	<i>Scutellospora</i>	<i>Gigasporaceae</i>
 (x1000)	<i>Scutellospora sp.</i>	<i>Scutellospora</i>	<i>Gigasporaceae</i>
 (x1000)	<i>Gigaspora sp</i>		<i>Gigasporaceae</i>
 x400	<i>Diversispora spurca</i>	<i>Diversispora</i>	<i>Diversisporaceae</i>

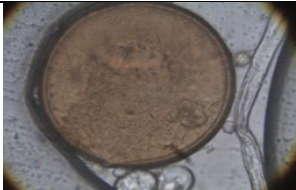
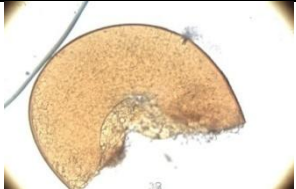
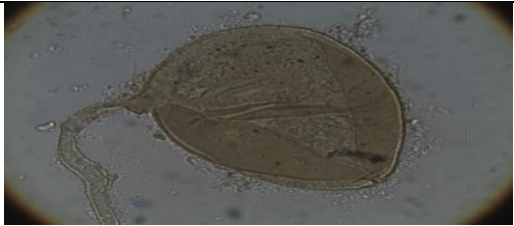
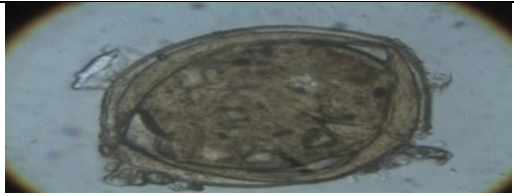
 (x1000)	<i>Diversispora pustulata</i>	<i>Diversispora</i>	<i>Diversisporaceae</i>
 (x400)	<i>Claroideoglossus etunicatus</i>	<i>Claroideoglossus</i>	<i>Claroideoglossaceae</i>
 (x1000)	<i>Ambispora</i> sp.	<i>Ambispora</i>	<i>Ambisporaceae</i>

Tableau 03 : Les morphotypes non identifiées

Code de morphotype	Photo
Morphotype 40	 x400
Morphotype 41	 x1000
Morphotype 42	 x 400
Morphotype 43	 x400
Morphotype 44	 x 400

Morphotype 45	
	x1000
Morphotype 46	
	x1000

III.3.2.1. Effet des techniques de travail du sol et des types de cultures sur l'abondance relative des espèces de champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA)

38 espèces de CMA ont été identifiées dans les parcelles en semis direct (SD), réparties en 6 familles. La famille des Glomeraceae avec 17 espèces, a présenté une abondance relative de 45,49 %. Les Acaulosporaceae (13 espèces) représentent une abondance relative de 32,7 % et la famille des Gigasporaceae, qui renferme 4 espèces, une abondance relative de 10,2 % (**Tableau 04**).

Dans les parcelles en travail conventionnel (TC), 35 espèces de CMA ont été identifiées, réparties en 7 familles. La famille des Glomeracées avec 17 espèces a enregistré une abondance relative élevée (40,58 %), suivie par les Acaulosporacées (10 espèces) avec 27,99 % et les Gigasporacées (3 espèces) avec 13,13 % (**Tableau 04**).

D'après le **tableau 04**, les familles Gigasporaceae, Diversisporaceae et Ambisporaceae ont une abondance relative plus élevée en TC (13,13 %, 5,17 % et 6,09 % respectivement) qu'en SD (10,2 %, 2,04 % et 4,8 %). Dans les deux techniques, la famille des Paraglomeracées n'est représentée que par une seule espèce *Glomus occultum*, avec une abondance relative de 0,99 % en SD et 0,55 % en TC (**Tableau 04**).

On peut conclure que l'abondance relative des genres glomus et septoglomus est plus élevé dans les parcelles en SD que dans les parcelles labourées (TC) (Tableau 04), ce qui concorde avec les résultats de Schalamuk et al. (2006) et Lu et al. (2018). L'abondance des Acaulosporaceae est également plus élevée en SD, ce qui en accord avec les résultats de Castelli et al. (2014), à cause que les espèces de la famille des Acaulosporacées produisent moins des hyphes extra-radicaux et intra-radicaux que les espèces de la famille des Glomeracées et de Gigasporacées, ce que les rends les Acaulosporacées tolérantes au stress hydrique, salinité, métaux lourds, et par conséquent ces espèces peuvent compléter leur cycle de vie en produisant une faible biomasse qui serait disparaître avec la perturbation du sol (Maherali & Klironomos, 2007 ; Chagnon et al., 2013)

D'après le **tableau 04**, l'espèce *Claroideoglomus etunicatum* est détectée uniquement dans les parcelles soumises en travail conventionnel avec une abondance relative égale à 4,59 %. Les résultats obtenus par Maurer et al. (2014) ont montré que l'espèce *Claroideoglomus*

claroideum est liée uniquement aux parcelles labourées. En coté opposé les espèces *Acaulospora colossica*, *Acaulospora reticulata*, *Entrophospora kentinensis* et *Scutellospora projecturata* sont détectés uniquement en technique de semis directe avec des abondances relatives respectives : 0,75 % ; 1,82 % ; 0,87 % et 0,99 %.

En blé, 22 espèces de CMA ont été identifiées conduite en SD, avec une forte abondance des Acaulosporaceae (06 espèces identifiées) (AR=39,16 %) et des Glomeraceae (11 espèces identifiées) (AR=29,88 %). Les familles de Ambispora, Diversisporaceae, Gigasporaceae et Paraglomeraceae ont l'abondance relative de 3,09 % ; 2,47% ; 13,69 % et 2,22 % par ordre. En TC, 27 espèces identifiées appartenant à 6 familles ont été détectées, avec une dominance des Glomeraceae avec 14 espèces identifiées (AR=46,72 %) et des Acaulosporaceae avec 07 espèces identifiées (AR=30,37 %). Les Ambispora, Claroideoglomeraceae, Diversisporaceae et les Gigasporacées ont enregistré les abondances relatives respectivement 1,99 % ; 5,25 % ; 6,29 % et 9,39 % (**Tableau 04**).

En triticales, 30 espèces ont été identifiées en SD, avec une prédominance des Glomeraceae avec 14 espèces identifiées avec une abondance relative égale à 59,31 % et des 10 espèces appartenant à la famille d'Acaulosporaceae avec une AR=23,26 %, contre 28 espèces identifiées dans la culture de triticales conduite en TC dont 16 espèces appartenant à la famille des Glomeracées qui présente une abondance relative égale à 49,51 % ; et 7 espèces appartenant aux Acaulosporacées avec une abondance relative égale à 23,57 % (**Tableau 04**).

Selon le **tableau 4**, 24 espèces réparties en 5 familles ont été identifiées dans la culture de lentille menée en semis direct (SD), dont 11 espèces appartiennent à la famille des Glomeraceae avec une abondance relative (AR) de 43,85 % et 7 espèces appartiennent à la famille des Acaulosporaceae avec une AR de 35,07 %. A l'inverse, 19 espèces appartenant à 6 familles ont été identifiées dans les parcelles de lentille conduites de manière conventionnelle, dont 8 espèces appartiennent à la famille des Glomeraceae avec une AR = 33,76 %, 4 espèces appartenant aux Acaulosporaceae avec une AR = 30,47 % et 3 espèces de Gigasporaceae avec une AR = 20,24 %.

Dans la culture de pois fourrager menée en semis direct, 29 espèces identifiées réparties en 5 familles, ont été recensées, dont la famille des Glomeraceae avec 13 espèces ayant une abondance relative de 50,52 %, la famille des Acaulosporaceae avec 9 espèces avec une AR de 31,5 %, et la famille des Gigasporaceae avec 3 espèces et une AR de 8,61 %. À l'inverse, 20 espèces réparties en 7 familles ont été identifiées dans les parcelles de pois fourrager conduite de manière conventionnelle (TC), dont 10 espèces appartenant à la famille des Glomeraceae avec une AR de 42,58 %, 3 espèces appartenant aux Acaulosporaceae avec une AR de 27,54 % et 3 espèces de Gigasporaceae avec une AR de 12,46 % (**Tableau 04**).

Un grand nombre d'espèces a été recensé dans les deux systèmes de travail du sol (SD et TC) pour la culture de triticales. La dominance des espèces appartenant à la famille des Glomeraceae a été observée, car ces espèces s'adaptent bien à la zone semi-aride et résistent donc au stress hydrique et salin (Boudarga et al., 2015).

Certaines espèces telles qu'*Ambispora sp*, *Diversispora pustulata*, *Scutellospora calospora*, *Funneliformis mosseae*, *Rhizoglosum irregularis*, *Rhizoglosum melanum*,

Rhizoglosum intraradices, *Rhizophagus sinuosum*, *Glomus aggregatum*, *Acaulospora bireticulata* et *Acaulospora foveata* ont été détectées dans les quatre cultures et dans les deux techniques de travail du sol (**Tableau 04**), suggérant que ces champignons sont plus tolérants aux effets de travail du sol.

Selon le **tableau 4**, l'espèce *Rhizoglosum melanum* est absente uniquement dans les parcelles de lentille, que ce soit en TC ou en SD. *Rhizoglosum clarus* n'a été détecté que dans les parcelles de triticales, en SD avec une AR de 2,19 % et en TC avec une AR de 2,56 %. *Acaulospora reticulata* a été détecté dans les cultures de lentille et pois fourrager menées en SD, avec des AR respectifs de 3,23 % et 2,22 %. Enfin, l'espèce *Acaulospora laevis* est plus répandue dans les parcelles en SD que dans celles labourées, car selon **Soka & Ritchie (2015)**, les hyphes d'*Acaulospora laevis* perdent leur infectiosité lorsque le sol est labouré.

Tableau 04: Abondance relative des espèces dans les cultures de blé, de triticales, de lentille et de pois fourrager dans les deux techniques de travail du sol (SD et TC) (en %).

L'espèce	SD				TC			
	blé	Tri	Len	PF	Blé	Tri	Len	PF
<i>Acaulospora delicata</i>		1,42	2,49	7,34		5,07		
<i>Acaulospora koskei</i>		1,77	3,23		0,98	1,08		
<i>Acaulospora morrowiae</i>	2,78	1,75		2,22		1,08		
<i>Acaulospora laevis</i>		0,71		1,11		0,72		
<i>Acaulospora foveata</i>	9,99	3,98	9,19	5,08	8,17	9,76	8,99	10,41
<i>Acaulospora reticulata</i>			3,23	2,22				
<i>Acaulospora colossica</i>		0,71		2,3				
<i>Acaulospora excavata</i>	2,78	2,03			2,35		6,71	13,62
<i>Acaulospora bireticulata</i>	1,85	9,3	11,26	5,92	5,72	4,29	13,05	3,51
<i>Acaulospora sp</i>	19,29		4,68	2,44	8,70		1,72	
<i>Acaulospora gedanensis</i>		0,88			2,49			
<i>Entrophospora kentinensis</i>	2,47		0,99					
<i>Acaulospora spinosissima</i>		0,71		2,87	1,96	1,57		
<i>Glomus viscosum</i>	4,52	6,59	6,64		1,41	0,72	2,63	5,25
<i>Septoglosum constrictum</i>		3,19	0,63	2,03	1,99	0,72		
<i>Glomus faciculatum</i>		7,66			3,86	2,56		
<i>Glomus flavisporum</i>		6,51	5,45	5,92	2,94	1,79	6,86	

<i>Glomus reticulatum</i>		2,48	4,04	7,85		1,73		2,53
<i>Glomus hoi</i>	1,7	4,94	1,61	3,18	3,3	1,08		6,32
<i>Glomus macrocarpum</i>	2,22		2,49	2,87		2,14		
<i>Rhizoglosum intraradices</i>	2,8	6,77	6,58	3,85	6,26	3,8	7,78	5,83
<i>Rhizophagus sinuosum</i>	6,53	3,35	5,83	4,16	9,75	5,31	10,21	2,72
<i>Rhizoglosum clarus</i>		2,19				2,56		
<i>Glomus aggregatum</i>	2,22	4,42	3,25	5,89	2,94	4,29	1,85	6,32
<i>Rhizoglosum melanum</i>	1,67	2,39		2,74	2,97	1,57		2,72
<i>Rhizophagus irregularis</i>	1,23	3,23	3,5	6,87	3,98	4,74	1,23	5,45
<i>Funneliformis mosseae</i>	3,09	2,52	3,83	0,57	1,41	4,82	1,75	3,4
<i>Glomus geosporum</i>	1,67				0,94	1,28		
<i>Glomus spinuliferum</i>	2,23	3,07			2,49		1,45	
<i>Glomus etunicatum</i>				2,87	2,45			2,04
<i>Glomus occultum</i>	2,22			1,72		0,85		1,36
<i>Scutellospora projecturata</i>		1,06		2,88				
<i>Scutellospora calospora</i>	12,58	3,88	8,82	1,67	7,92	10,40	12,7	7,78
<i>Scutellospora sp.</i>			1,89	2,03	1,47		3,61	2,34
<i>Gigaspora sp</i>	1,11	0,71	2,12	2,03			3,93	2,34
<i>Diversispora spurca</i>		0,35	0,63	2,44	2,45	3,58	1,45	
<i>Diversispora pustulata</i>	2,47	0,35	0,99	1,15	3,84	4,04	1,23	4,08
<i>Claroideoglosum etunicatum</i>					5,25	7,41	4,35	1,36
<i>Ambispora sp.</i>	3,09	6,30	4,04	5,77	1,99	7,19	6,61	8,56
<i>Morphotype 40</i>		1,32					1,85	
<i>Morphotype 41</i>	1,13							
<i>Morphotype 42</i>		1,75				0,72		
<i>Morphotype 43</i>	1,11		1,99			0,72		2,04
<i>Morphotype 44</i>		1,67	0,63			2		
<i>Morphotype 45</i>	7,41							
<i>Morphotype 46</i>						0,43		

Tri : triticales, Len : lentille, PF : pois fourrager, SD : semis direct, TC : travail conventionnel

III.3.2.2. Effet de la technique de travail du sol et des cultures sur l'indice de Shannon-Wiener (H')

Le système de travail du sol n'a pas eu d'effet significatif ($P > 0,05$) sur l'indice de Shannon et Wiener (**Tableau 05**), ce qui corrobore les résultats de **Jansa et al. (2002)**. L'indice de Shannon-Wiener a été varié de 2,48 pour les parcelles labourées à 2,53 pour les parcelles non labourées. En revanche, la diversité des champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) exprimée par l'indice de Shannon-Wiener était élevée dans les parcelles en semis direct (SD) que dans les parcelles en travail conventionnel (TC), ce qui corrobore les résultats de **Oehl & Koch (2018)** qui ont confirmé que l'indice H' était élevé dans les parcelles non labourées que dans les parcelles labourées.

Les cultures de la succession culturale n'ont pas eu d'effet significatif sur l'indice de Shannon -Wiener (H') (**tableau 05**). La comparaison des moyennes générales de l'indice de Shannon -Wiener entre les cultures a montré que cet indice est plus élevé dans les parcelles de triticales avec une valeur de 2,71 et plus faible dans les parcelles de blé avec une moyenne de 2,33. Les parcelles de lentille et de pois fourrager ont des valeurs de Shannon-Wiener respectives 2,50 et 2,48. Les parcelles des légumineuses (lentille et pois fourrager) ont présenté un niveau de diversité à peu près similaire et plus élevé que celui des parcelles de blé, ce qui est confirmé par **Bainard et al. (2014)**, car les légumineuses sont des espèces plus mycotrophes que les graminées et augmentent ainsi les populations des CMA (**Plenchette et al., 2005**).

L'interaction système de travail du sol x cultures n'a pas eu d'effet significatif sur l'indice de Shannon-Wiener (H') (**Tableau 05**). D'après **la figure 08**, les parcelles de triticales, de lentille et de pois fourrager ont enregistré des valeurs de l'indice de Shannon-Wiener plus élevées en technique de SD avec des valeurs respectives de 2,75 ; 2,62 et 2,54 que celles des cultures conduites conventionnellement. Alors que les parcelles de blé ont enregistré une valeur de Shannon-Wiener plus élevée en technique de labour (2,46) comparativement aux parcelles de blé cultivées en SD (2,19).

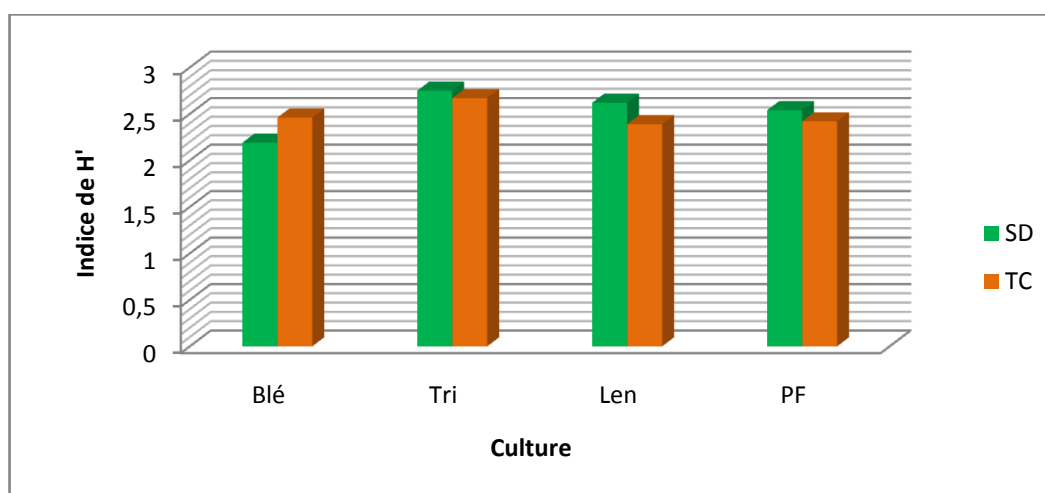


Figure 08 : Indice Shannon-Wiener (H') dans les quatre cultures soumises dans deux techniques de travail du sol. (Tri : triticales, Len : lentille, PF : pois fourrager, SD : semis direct, TC : travail conventionnel)

III.3.2.3. Effet de la technique de travail du sol et des cultures sur l'indice de Simpson (C)

Les analyses de variance ont montré que le système de travail du sol, les cultures et leur interaction n'ont pas d'effet significatif ($P > 0,05$) sur l'indice de Simpson (**Tableau 05**). **Jansa et al. (2002)** ont également trouvé que le système de travail du sol n'a pas d'effet significatif sur l'indice de Simpson.

La comparaison des moyennes de l'indice de Simpson entre les cultures a montré que les valeurs de C des parcelles de triticales, de lentille et de pois fourrager sont similaires (0,93) et un peu plus élevées que la valeur de l'indice de Simpson des parcelles de blé (0,90). De plus, la moyenne des valeurs de l'indice de Simpson des parcelles en semis direct (SD) est égale à celle des parcelles en travail conventionnel (TC), ce qui est en contradiction avec les résultats de **Hu et al. (2015)** qui ont trouvé que l'indice de Simpson est élevé en SD qu'en TC.

La **figure 09** montre que les cultures de triticales, de lentille et de pois fourrager ont enregistré des valeurs de l'indice de Simpson plus élevées en technique de semis direct, avec des valeurs respectives de 0,94 ; 0,94 et 0,93. Tandis que les parcelles cultivées blé ont une moyenne de l'indice de Simpson plus élevée en technique de labour, avec une valeur de 0,92.

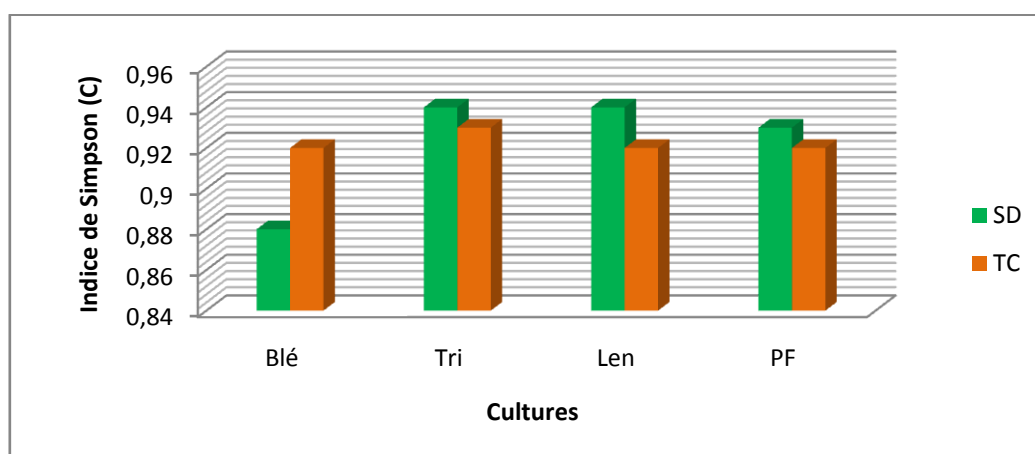


Figure 09: Indice de Simpson (C) dans les quatre cultures soumises dans deux techniques de travail du sol. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, Tri : triticales, Len : lentille, PF : pois fourrager)

III.3.2.4. Effet de la technique de travail du sol et des cultures sur l'indice de Margalef (Dmg)

Le système de travail du sol n'a pas d'effet significatif ($P > 0,05$) sur l'indice de Margalef (Dmg) (**tableau 05**). La valeur de l'indice de Margalef passe de 3,08 dans les parcelles de travail conventionnel à 3,24 dans les parcelles conduite en semis direct (SD).

Les cultures n'ont pas d'effet significatif ($P > 0,05$) sur l'indice de Margalef (**Tableau 05**). Le classement des moyennes de l'indice de Margalef a montré que les parcelles de triticales ont enregistré la valeur de Dmg la plus élevée (3,84), suivies par les parcelles de lentille et de pois fourrager avec des moyennes respectives de 3,19 et 2,95. Les parcelles de blé ont présenté un indice de Margalef plus faible comparativement aux autres cultures, avec une moyenne de 2,65.

Selon la **figure 10**, les parcelles de triticales, de lentille et de pois fourrager conduites en semis direct ont enregistré des valeurs de l'indice de Margalef plus élevées (3,97 ; 3,50 et 3,02 respectivement) que celles des parcelles conduites en travail conventionnel (3,71 ; 2,88 et 2,87 respectivement). Au contraire, les parcelles de blé sous la gestion conventionnelle ont une moyenne de l'indice de Margalef plus élevée (2,84) que celles des parcelles conduites en semis direct (2,46).

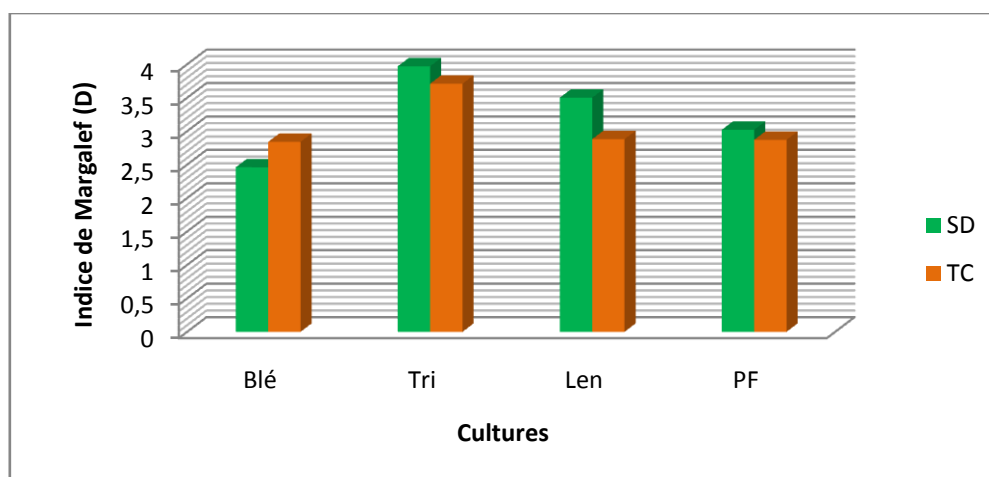


Figure 10 : Indice de Margalef (D) dans les quatre cultures soumises à deux techniques de travail du sol. (Tri : triticales, Len : lentille, PF : pois fourrager, SD : semis direct, TC : travail conventionnel)

Tableau 05 : Analyse de la variance des sources de variation sur les taux de colonisation par les champignons mycorhiziens à arbuscules et leurs indices de diversité.

Source de variation	DDI	TCA	TCV	TCT	DS	H'	C	D
STS	1	81,03 ns	237,32 **	1,85 ns	216,00 ns	0,01 ns	0,00003 ns	0,16 ns
Cultures	3	629,51 ns	216,81 ***	256,28 ns	899,00 ***	0,15 ns	0,0014 ns	1,55 ns
STS * Cultures	3	576,03 ns	2,48 ns	584,38 *	222,78 *	0,07 ns	0,001 ns	0,26 ns
CV (%)	//	0,66	0,60	0,38	0,22	0,11	0,03	0,26
Ecart-type	//	17,76	7,89	14,31	14,46	0,28	0,03	0,83

STS: système de travail du sol, TCA : taux de colonisation par les arbuscules, TCV : tau de colonisation par les vésicules, TCT : taux de colonisation total, DS : densité des spores, H' : indice de diversité de Shannon-Wiener, C : indice de Simpson, D : indice de Margalef. ns: effet non significatif, *: effet significatif, **: effet hautement significatif, ***: effet très hautement significatif.

III.4. Etude des corrélations

L'analyse des corrélations (**Tableau 06**) a révélé que le taux de colonisation total est significativement et positivement corrélé au taux de colonisation par les arbuscules ($r = 0,95$). L'analyse a également montré que les indices de Shannon-Wiener et de Margalef sont significativement et positivement corrélés à la densité des spores ($r = 0,74$), mais ils sont significativement et négativement corrélés au taux de colonisation par les arbuscules ($r = -0,72$ et $r = -0,77$ respectivement).

Tableau 06 : Coefficient de corrélation de Pearson entre le taux de colonisation par les champignons mycorhiziens arbusculaires et les indices de diversité

Variables	TCA (%)	TCV (%)	TCT (%)	DS (1 g de sol)	H'	C	D
TCA (%)	1						
TCV (%)	-0,50	1					
TCT (%)	0,95***	-0,24	1				
DS (1 g de sol)	-0,39	-0,02	-0,41	1			
H'	-0,72*	0,47	-0,63	0,74*	1		
C	-0,77*	0,51	-0,69	0,42	0,90***	1	
D	-0,60	0,53	-0,48	0,74*	0,96***	0,78*	1

TCA : taux de colonisation par les arbuscules, TCV : tau de colonisation par les vésicules, TCT : taux de colonisation total, DS : densité des spores, H' : indice de diversité de Shannon-Wiener, C : indice de Simpson, D : indice de Margalef.

III.5. Etude d'analyse en composantes principales (ACP)

Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée pour étudier la relation entre les techniques de travail du sol (semis direct (SD) et travail conventionnel (TC)) et les cultures précédentes (blé, triticale, lentille et pois fourrager) par rapport aux variables mesurées, comme le montre la **figure 11**. Les deux premiers axes de l'ACP expliquent 82,60 % de la variation totale.

L'axe 1 explique **66,82 %** de l'information de la variance totale. Il est principalement formé par les variables suivantes dans le sens positif ; **densité des spores (9,24 %)**, **taux de colonisation vésiculaire (TCV) (6,35 %)**, **indices de Margalef (Dmg) (17,29 %)**, **de Shannon-Wiener (H') (19,89 %)** et **de Simpson (C) (17,61)**. Cependant, on constate un positionnement sur le côté négatif pour le **taux de colonisation arbusculaire (TCA) (16,34 %)**, et le **taux de colonisation totale (TCT) (13,29 %)** (**Figure 11**). On peut conclure que lorsque le taux de colonisation vésiculaire augmente, le taux de colonisation par les arbuscules diminue.

L'axe 2, avec **15,78 %** de l'information de la variance totale, représente la variation de **la densité des spores (45,89 %)**, **du TCA (6,57 %)** et **du TCT (1,32 %)** dans la direction positive et dans la direction négative, on trouve la variation du **TCV (38,31 %)** et **de l'indice de Simpson (C) (1,73 %)** (**Figure 11**). L'opposition entre l'indice de Simpson et la densité des spores montre qu'il existe une corrélation négative entre ces deux paramètres.

La projection des systèmes de travail du sol et les cultures sur le plan (1-2) a montré une différence visible entre les deux modes de travail du sol pour les quatre cultures. Les parcelles en semis direct des cultures de triticale, lentille et pois fourrager sont caractérisées par des valeurs élevées de densité des spores, d'indice de Shannon-Wiener et d'indice de Margalef. Tandis que les parcelles en travail conventionnel des cultures de blé, lentille et pois fourrager sont caractérisées par des valeurs élevées de TCA et TCT (**Figures 11**). Les cultures en semis direct ont enregistré une diversité accrue des champignons mycorhiziens à arbuscule, suggérant que le semis direct a le potentiel d'améliorer un système de production agricole durable (**Brito et al., 2012b**).

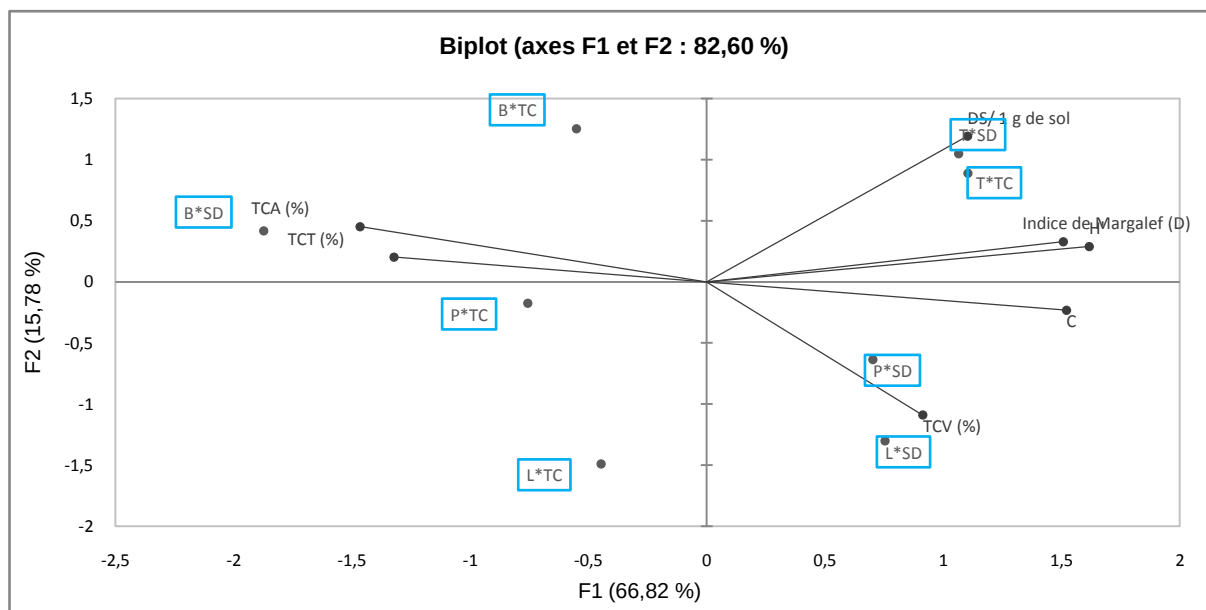


Figure 11 : Représentation évolutive dans le temps des variables mesurées, en fonction des traitements étudiés (système de travail du sol et cultures), dans le plan formé par les axes 1 et 2 de l'analyse en composantes principales. (B*TC : blé travail conventionnel, B*SD : blé semis direct, T*TC : triticales travail conventionnel, T*SD : triticales semis direct, L*TC : lentille travail conventionnel, L*SD : lentille semis direct, P*TC : pois fourrager travail conventionnel, P*SD : pois fourrager semis direct, TCA : taux de colonisation arbusculaire, TCT : taux de colonisation total, TCV : taux de colonisation vésiculaire, DS/ 1g sol : densité des spores/ g de terre, C : indice de Simpson, H' : indice de Shannon-Wiener)

Conclusion

Dans notre étude, nous avons remarqué l'absence totale de vers de terre pour les quatre cultures dans les deux modes de travail du sol (semis direct (SD) et travail conventionnel (TC)). Cela peut s'expliquer par l'enfouissement profond des lombrics, dû aux températures élevées du sol combinées à la sécheresse pendant la période d'échantillonnage.

Dans cette étude, les racines des parcelles en TC sont caractérisées par un taux de colonisation arbusculaire (TCA) élevé, tandis que le taux de colonisation vésiculaire (TCV) et le taux de colonisation total (TCT) sont élevés pour les racines des parcelles en SD. Concernant les cultures, l'étude a montré que les racines de blé sont caractérisées par un TCA et un TCT élevés (42,10 % et 46,67 % respectivement) par rapport aux autres cultures de la rotation. Tandis que les racines de la lentille sont marquées par un TCV élevé dans les parcelles en TC (20,60 %) par rapport aux autres cultures de la succession.

On a également constaté que les racines des céréales (blé et triticales) ont enregistré un TCA et un TCT élevés dans les parcelles en SD, tandis que les racines des légumineuses (lentille et pois fourrager) ont enregistré un TCV et un TCT élevés en technique de labour.

La densité des spores des champignons mycorhizes à arbuscules (CMA) est plus élevée dans les parcelles non labourées que dans les parcelles labourées. Les parcelles des céréales (triticales et blé) qui ont été précédées par des légumineuses (lentille et pois fourrager respectivement) ont une densité de spores de CMA par gramme de terre plus élevée que celle des parcelles des cultures de légumineuses (lentille et pois) qui ont été précédées par les céréales (triticales et blé respectivement).

Dans les deux systèmes de travail du sol, on a observé la prédominance des espèces de la famille des Glomeraceae, avec une abondance relative (AR) de 45,49 % en SD et de 40,58 % en TC. De plus, les parcelles de trois cultures (triticale, lentille et pois fourrager) soumises soit en SD, soit en TC, ont été caractérisées par la prédominance des Glomeraceae. Cependant, les parcelles de blé en SD ont été marquées par la prédominance des espèces des Acaulosporaceae.

Nos résultats indiquent que la combinaison de la rotation des cultures (avec des cultures variées de légumineuses et de céréales) et de la technique de semis direct, sous le cadre de l'agriculture de conservation a permis d'améliorer la diversité des CMA, qui jouent un rôle important dans le maintien de la durabilité des agro-écosystèmes dans la zone de faible pluviométrie.

Références bibliographiques

1. **Bainard L. D., Bainard J. D., Hamel C., Gan Y., 2014.** Spatial and temporal structuring of arbuscular mycorrhizal host crop in a semi-arid prairie agroecosystem. *FEMS Microbiol Ecol.*, 88 : 333-344.
2. **Benider C., Laour S., Madani T., Guendouz A., Kelaleche H., 2021.** The effect of cereal-legume intercropping systems on the cereal grain yield under semi-arid conditions. *Agricultural Science Digest*, 41 (4) : 610-614.
3. **Blanchart E. & Jouquet P., 2015.** Rôle des vers de terre et des termites pour la restauration de la productivité des sols en milieux tropicaux. *Restauration des sols tropicaux et méditerranéens : contribution à l'agroécologie*, Montpellier. IRD Edition, 10 : 249-258.
4. **Borie F., Rubio R., Rouanet J. L., Morales A., Borie G., Rojac C., 2006.** Effects of tillage systems on soil characteristics, glomalin and mycorrhizal propagules in chilean ultisol. *Soil & Tillage Research*, 88 (1-2) : 253- 261.
5. **Boudarga K., Daplé Y., Beryouni K., Saber N., Kandil M., 2015.** Impact of crop rotation on mycorrhizal fungi in irrigated soils of the Doukkala (Morocco). *International Journal of Environmental Agriculture Research*, 1 (7) : 48- 55.
6. **Bouthier A., Pelosi C., Villenave C., Peres G., Hedde M., Ranjard L., Vian J. F., Peigne J., Cortet J., Bispo A., Piron D., 2014.** Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique. In : **Labreuche J., Laurent F., Roger-Estrade J.** (Coord). *Faut-il travailler le sol ? Aquis et innovations pour une agriculture durable. Savoir faire* (Quae Ed.) : 85-108.
7. **Brito I., DeCarvalho M., Goss M. J., 2011.** Summer survival of arbuscular mycorrhiza extraradical mycelium and the potentiel fro its management through tillage options in mediterranean cropping systems. *Soil Use & Management*, 27 : 350-356.
8. **Brito I., Goss M. J., Carvalho M. D., Chatagnier O., Tuinen D. V., 2012 (b).** Impact of tillage system on arbuscular mycorrhiza fungal communities in the soil under mediterranean conditions. *Soil & Tillage Research*, 121 : 63-67.
9. **Brito I., Goss M. J., De Carvalho M., 2012 (a).** Effect of tillage and crop on arbuscular mycorrhiza colonization of winter wheat and triticale under Mediterranean conditions. *Soils Use and Management*, 28 : 202- 208.
10. **Castelli M., Urcoviche R. C., Gimenes R. M. T., Alberton O., 2014.** Arbuscular mycorrhizal fungi diversity in maize under different soil managements and seed treatment with fungicide. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 12 (2) : 486- 491.
11. **Castillo C. G., Rubio R., Rouanet J. L., Borie F., 2006.** Early effects of tillage and crop rotation on arbuscular mycorrhizal fungal propagules in an ultisol. *Biol. Fertil. Soils*, 43 : 83-92.

12. **Chagnon P. L., Bradley R. L., Maherali H., Klironomos J. N., 2013.** A trait-based framework to understand life history of mycorrhizal fungi. *Trends in Plant Science*, 18 : 484-491. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.05.001>
13. **Chahal K., Gupta V., Verma N. K., Chaurasia A., Rana B., 2021.** Arbuscular mycorrhizal (AM) fungi as a tool for sustainable agricultural system. *Mycorrhizal Fungi : Utilization in agriculture and forestry. Intech. Open.* : 1-12.
14. **Chaieb N., Labidi S., Chiab A. K., Idoudi Z. B. A., Ben Jeddi F., Ben-Hammouda M., 2021.** Natural mycorrhization, mineral uptake, total polyphenols and total flavonoids of Oat as affected by tillage practices under rainfed conditions. *A. P. R. J.*, 8 (4) : 105- 115.
15. **Clapperton M. J., Miller J. J., Larney F. J., Lindwall C. W., 1997.** Earthworm populations as affected by long-term tillage practices in southern Alberta, Canada. *Soil Biology and Biochemistry*, 29 (3-4) : 631-633.
16. **Curaqueo G., Barea J. M., Acevedo E., Rubio R., Cornejo P., Borie F., 2011.** Effects of different tillage system on arbuscular mycorrhizal fungal propagules and physical properties in a mediterranean agroecosystem in central Chile. *Soil & Tillage Research*, 113 : 11-18.
17. **Dree L. R., Karathanasis A. D., Wilding L. P., Blevins R. L, 1994.** Micromorphological characteristics of long-term no-till and conventionally tilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58 : 508- 517.
18. **Ernst G. & Emmerling C., 2009.** Impact of five different tillage systems on soil organic carbon content and the density, biomass and community composition of earthworms after ten year period. *European Journal of Soil Biology*, 45 (3) : 247- 251.
19. **Gosling P., Hodge A., Goodlass G., Bending G. D., 2006.** Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 113 : 17- 35.
20. **Gupta M. M., Chourasiya D., Sharma M. P., 2019.** Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in relation to sustainable plant production systems. *Microbial Diversity in Ecosystem Sustainability & Biotechnological Applications*, volumes 2. *Soil & Agroecosystems* : 167- 186.
21. **Hadj Youcef Taibi H., Smail-Saadoun N., Djemel A., 2021.** Dynamics of wheat root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi under contrasting soil tillage systems and its impact on grain yield. *J. Fundam. Appl. Sci.*, 13 (1) : 468- 483.
22. <https://invam.ku.edu/species-descriptions>
23. **Hu J. Yang A., Zhu A., Wang J., Dai J., Wong M. H., Lin X., 2015.** Arbuscular mycorrhizal fungal diversity, root colonization and soil alkaline phosphatase activity in response to maize-wheat rotation and no-tillage in North China. *Journal of Microbiology*, 53 (7) : 454- 461.
24. **Hu Y., Pandey A. K., Wu X., Fang P., Xu P., 2022.** The role of arbuscular mycorrhizal fungi in drought tolerance in legume crops : A review. *Legume Research*, 45 (1) : 1-9.
25. **Ianson D. C., Allen M. F., 1986.** The effects of soil texture on extraction of vesicular-arbuscular mycorrhizal spores from arid soils. *Mycologia*, 78: 164–168. http://ccb.ucr.acsitefactory.com/facilities/lab/lab_protocols
26. **Jansa J., Mozafar A., Anken T., Ruh R., Sander I. R., Frossard E., 2002.** Diversity and structure of AMF communities as effected by tillage in a temperate soil. *Mycorrhiza*, 12 : 225-234.
27. **Jansa J., Weimken A., Frossard E., 2006.** The effects of agricultural practices on arbuscular mycorrhizal fungi. *Geological Society, London, Spécial Publication*, 266 (1) : 89-115.
28. **Jebri M., Labidi S., Bahri B. A., Laruelle F., Tisserant B., Ben Jeddi F., Lounès-Hadj Sahraoui A., 2021.** Soil properties and climate affect arbuscular mycorrhizal fungi and soil microbial communities in mediterranean rainfed cereal cropping systems. *Pedobiologia-Journal of Soil Ecology*, 87-88 : 150748.
29. **Johnson N. C., Zak D. R., Tilman D., Pfleger F. L., 1991.** Dynamics of vesicular-arbuscular mycorrhizaeduring old field succession. *Oecologia*, 86 : 349-358. <https://doi.org/10.1007/BF00317600>

30. **Johnson-Maynard J. L., Umiker K. J., Guy S. O., 2007.** Earthworm dynamics and soil physical properties in the first three years of no-till management. *Soil & Tillage Research*, 94 : 338-345.
31. **Jossi W., Zihlmann U., Anken T., Dorn B., VanDer Heijden M., Tschachtli R., 2011.** Un travail du sol réduit protège les vers de terre. *Recherche Agronomique Suisse*, 2 (10) : 432-439.
32. **Kahiluoto H., Ketoja E., Vestberg M., 2009.** Contribution of arbuscular mycorrhiza to soil quality in contrasting cropping systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 134 : 36- 45.
33. **Kehri H. K., Akhtar O., Zoomi I., Pandey D., 2018.** Arbuscular mycorrhizal fungi: taxonomy and its systematics. *Int. J. Life Sci. Res.*, 6 (4) : 58-71.
34. **Lu X., Lu X., Liao Y., 2018.** Effect of tillage treatment on the diversity of soil arbuscular mycorrhizal fungal and soil aggregate-associated carbon content. *Front. Microbiol.*, 9 : 2986.
35. **Maherali H. & Klironomos J. N., 2007.** Influence of Phylogeny on Fungal Community Assembly and Ecosystem Functioning. *Science*, 316 : 1746-1748.
<http://doi.org/10.1126/science.1143082>
36. **Maurer C., Oehl F., Zihlmann U., Chervet A., Sturny W. G., 2018.** Les systèmes culturaux influencent la diversité des espèces de champignons mycorrhiziens. *Recherche Agronomique Suisse*, 9 (11-12) : 384- 391.
37. **Maurer C., Rüdy M., Chervet A., Sturny W. G., Flish R., Oehl F., 2014.** Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in field crops using no-till and conventional tillage practices. *Agrarforschung Schweiz*, 5 (10) : 398- 405.
38. **McGonigle TP, Miller MH, Evans DG, Fairchild GL and Swan JA, 1990.** A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular- arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 115 (3): 495–501.
39. **Metzke M., Potthoff M., Quintern M., Heb J., Joergensen R. G., 2007.** Effect of reduced tillage systems on earthworm communities in a 6-year organic rotation. *European Journal of Soil Biologie*, 43 : 209- 215.
40. **Miller R. M., Jastrow J. D., 1992.** The role of mycorrhizal fungi in soil conservation. *Mycorrhizae in sustainable agriculture*, 54 : 29-44.
41. **Molla M. N. & Solaiman A. R. M., 2009.** Association of arbuscular mycorrhizal fungi with leguminous crops grown in different agro-ecological zones of Bangladesh. *Archives of Agronomy & Soil Science*, 55 (3) : 233- 245.
42. **Mouelhi B., Slim S., Arfaoui S., Boussalmi A., Jarrahi T., Ben Jeddi F., 2016.** Impact de la rotation culturale et du mode de semis sur les composantes physico-chimiques du sol et analyse de l'évolution des mycorhizes. *I. M. J. S. T.*, 1 (2) : 71- 81.
43. **Oehl F. & Koch B., 2018.** Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in no-till and conventionally tilled vineyards. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 91 : 56- 60.
44. **Parihar M., Chitara M., Khatri P., Kumari A., Mishra P. K., Rakshit A., Rana K., Meena V. S., Singh A. K., Choudhary M., Bisht J. K., Ram H., Pattanayak A., Tiwari G., Jatav S. S., 2020.** Arbuscular mycorrhizal fungi : Abundance, Interaction with plants and potential biological applications. *Advances in plant microbiome and sustainable agriculture : Diversity and biotechnological applications* : 105- 143.
45. **Plenchette C., Clermont-Dauphin C., Meynard J. M., Fortin J. A., 2005.** Managing arbuscular mycorrhizal fungi in cropping systems. *Can. J. Plant Sci.*, 85 : 31- 40.
46. **Pouge J. F., 2016.** Le ver de terre : ami ou ennemi ? *La forêt Privée*, 347 : 58-63.
47. **Prasanna S. V. L., Gousia S. K., Latha J. N. L., 2016.** Beneficial aspects of arbuscular mycorrhizal fungi. *European Journal of Pharmaceutical and Medical Research*, 3 (12) : 198– 204.
48. **Rodriguez M. P., Dominguez A., Moreira Ferroni M., Wall L. G., Bedauo J. C., 2020.** The diversification and intensification of crop rotations under no-till promote earthworm abundance and biomass. *Agronomy*, 10 (7) : 919.

49. Schaefer D. A., Gui H., Mortimer P. E., Xu J., 2021. Arbuscular mycorrhiza and sustainable agriculture. *Circular Agricultural Systems*, 1 (1) : 1-7.
50. Schalamuk S., Velazquez S., Chidichimo H., Cabello M., 2006. Fungal spore diversity of arbuscular mycorrhizal fungi associated with spring wheat: Effects of tillage. *Mycologia*, 98 (1): 16-22.
51. Sebbane M., Labidi S., Hafsi M., 2023. Arbuscular mycorrhizal fungi symbiosis in durum wheat (*Triticum durum* desf.) under no-tillage and tillage practices in a semi-arid region. *Agricultural Science Digest*, 43 (1) : 81- 86.
52. Soka G., Ritchie M., 2015. Arbuscular mycorrhizal symbiosis, ecosystem processes and Environmental changes in tropical soils. *Applied Ecology and Environmental Research*, 13(1) : 229-245. http://doi.org/10.15666/aeer/1301_229245
53. Souza G. I. A., Caproni A. L., Granha O. J. R. D., Souchie E. L., Berbara R. L. L., 2010. Arbuscular mycorrhizal fungi in agricultural and forest systems. *Global Sci. Technol.*, 3: 1-9.
54. Souza T., 2015. *Handbook of arbuscular mycorrhizal fungi*. Cham: Springer, 153 p. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-319-24850-9.pdf>
55. Verbruggen E. & Toby Kiers E., 2010. Evolutionary ecology of mycorrhizal functional diversity in agricultural systems. *Evolutionary Applications*, 3 (5-6) : 547- 560.
56. Vestberg M., Kahiluoti H., Wallius E., 2011. Arbuscular mycorrhizal fungal diversity and species dominance in a temperate soil with long-term conventional and low-input cropping systems. *Mycorrhiza*, 21 : 351-361.
57. Vierheilig H, Coughlan AP, Wyss U. R. S., Piché Y., 1998. Ink and vinegar, a simple staining technique for arbuscular-mycorrhizal fungi. *Applied and environmental microbiology*, 64(12): 5004-5007.
58. Vigot M. & Cluzeau D., 2014. Les vers de terre. Chambre d'Agriculture de la Vienne. 20 p.
59. Vitro I., Imaz M. J., Enrique A., Hoognmoed W., Bescansa P., 2007. Burning crop residues under no-till in semi-arid land, Northern Spain : effects on soil organic matter, aggregation, and earthworm populations. *Australian Journal of Soil Research*, 45 : 414- 421.

Chapitre III : Impact du précédent cultural et les techniques de travail du sol sur les caractéristiques physico-chimiques du sol de la région semi-aride de l'Est d'Algérie, cas de la région de Sétif

Résumé

L'étude a permis de déterminer les effets des quatre rotations culturales conduites, combinées en deux modes de gestion du sol, à savoir le travail conventionnel et le semis direct, sur certaines propriétés physico-chimiques et l'humidité du sol de la région d'étude (zone semi-aride de l'est de l'Algérie). L'essai a été réalisé à l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Sétif durant trois campagnes agricoles consécutives (2016/17, 2017/18 et 2018/19). Les résultats montrent que, durant les stades critiques des cultures, le semis direct se distingue par une humidité élevée comparée à celle du travail conventionnel (TC). La technique de non labour (ou SD) améliore le taux de la matière organique, qui est relativement élevée comparé au TC (1,84% contre 1,58 respectivement). De plus, l'inclusion des légumineuses dans la rotation culturale améliore la fertilité et l'humidité du sol en faveur du SD. Le pH du sol est influencé par l'effet des légumineuses (pois fourrager et lentille), quel que soit le mode de travail du sol, et tend vers l'acidité par rapport aux cultures céréalières (blé et triticale). Les résultats montrent également que le TC présente une densité apparente et une résistance à la pénétration (Rp) plus faible comparées à celle du SD ; par conséquent, la porosité du sol est plus élevée en TC qu'en SD. Enfin, la teneur en matière organique est significativement et négativement corrélée au pH (-0,55) et positivement corrélée à la conductivité électrique (CE) (0,50).

Mots clés: semis direct, labour, matière organique, humidité, porosité, fertilité, légumineuses.

Introduction

La région semi-aride en Algérie est une zone assez grande, elle se caractérise par une faible et irrégulière précipitation avec une sécheresse fréquente (**Mekhlouf et al., 2013 ; Rouabhi et al., 2019**), des sols de faible fertilité chimique et pauvre en matière organique. Dans cette zone, on assiste à une dégradation continue des ressources naturelles due à l'utilisation abusive et inadéquate des techniques agricoles (**Saber et Mrabet, 2002**).

Les systèmes de culture blé- jachère pâturée et/ou blé monoculture cultivé en travail conventionnel sont depuis long temps des pratiques agricoles traditionnelles adoptées dans la région semi-aride. le travail conventionnel du sol écrase la structure du sol (**Kaushal et al., 2022**), épuise le carbone organique du sol et altère les activités microbiennes (**Naorem et al., 2023**). Aussi, la combinaison de la faible précipitation et le travail répétitif du sol augmente l'érosion éolienne et la dégradation du sol (**Huang et al., 2012**). Selon **Blanco-Canqui et al. (2013)**, les systèmes culture-jachère sont très vulnérables à l'érosion en raison d'une couverture de résidus limitée ou nulle pendant la jachère ainsi, le labour à l'état nu et en conditions de sécheresse accentué la perte d'eau par évaporation (**Mielke & Wilhelm, 1998**). Quant à la monoculture, elle cause une diminution des éléments nutritifs du sol, augmente avec le temps, l'infestation des ravageurs et des maladies (**Parida et al., 2023**). De fait, pour atténuer ces effets négatifs des pratiques conventionnelles, il faut rechercher des pratiques de gestion du sol et des cultures qui s'adaptent aux conditions environnementales difficiles de la zone semi-aride afin d'accroître la matière organique du sol, réduire l'érosion et assurer la durabilité du système agricole.

Ces dernières années, les pratiques de l'agriculture de conservation telle que le semis direct et la rotation culturale appropriée ont été reconnues comme un ensemble des systèmes culturaux adaptatifs en régions aux conditions climatiques contraignantes à la croissance et au développement des cultures (**Devkota et al., 2022**). L'adoption des méthodes de travail de conservation du sol est plus bénéfique en terme de la conservation de l'humidité du sol (**Elabbadi et al., 2022 ; Kovács et al., 2023**), réduit la perte de la matière organique (**Benniou, 2012 ; Havlin et al., 1990**) et améliore la fertilité chimique et physique du sol (**Papini et al., 2007**). L'inclusion des légumineuses au sein d'un système de culture a permis d'améliorer l'état nutritif du sol, car elles fixent l'azote atmosphérique, aident à la séquestration de carbone dans le sol et enrichissent le sol indirectement par les micro et macro nutriments (**Jena et al., 2022**).

L'objectif de la présente étude est d'évaluer les effets des précédents culturaux en combinaison avec le semis direct et le travail conventionnel sur quelques paramètres physico-chimiques et sur le profil hydrique du sol en région semi-aride.

2. Matériel et Méthodes

2.1. Site expérimental

La parcelle d'étude se situe au lieu dit R'Mada dans la commune de Mezloug, daïra de Ain Arnat, appartenant à l'étage semi-aride central de wilaya de Sétif. Le site se trouve à une altitude de 962 m, à la latitude 36° 08' N et à la longitude 5° 20' E. Le site appartenant à la ferme expérimentale de l'IGC, station de Sétif qui est soumis au régime climatique des zones semi-arides se caractérise par des hivers froids, une pluviométrie irrégulière, des températures basses en printemps, avec des gelées très fréquentes, des vents secs et chauds (sirocco) et manque d'eau en fin de cycle de la culture (**Benniou et al., 2018**). Selon **Labad (2018)**, le sol appartient à la classe des sols alluviaux, est légèrement profond (40-70 cm) en présence d'une dalle calcaire très proche de la surface et présente des cailloux en surface, ainsi que le sol est caractérisé par une légère pente (3%).

Durant les trois campagnes d'étude, un cumul moyen de 323,57 mm de précipitation et une température moyenne qui atteint 12,90°C ont été enregistrés. Les températures moyennes enregistrées durant les trois saisons ont été relativement élevées comparativement à celles des 10 années précédentes. Les précipitations de la décade de référence sont supérieures à la moyenne des précipitations des trois campagnes d'expérimentation (**Figure 02 chapitre 01**).

2.2. Installation et conduite de l'essai

Trois essais ont été conduits durant trois campagnes agricoles : 2016/17, 2017/18 et 2018/19. L'ensemble des essais ont été conduites en régime pluviale.

2.2.1. Le travail du sol étudié englobe deux techniques:

- ❖ **Le semis direct** (zéro travail du sol): aucun travail du sol n'a été effectué avant et après le semis.
- ❖ **Le travail conventionnel**: un travail profond du sol a été effectué à l'aide d'une charrue à soc de 30 cm de profondeur, suivi d'un passage de cover-crop et un hersage.

2.2.2. Les successions culturales:

Au cours des trois campagnes agricoles, plusieurs cultures se sont succédées au sein des deux modes de travail du sol:

- **Campagne 2016/17 (S1):** blé/ blé, blé/triticales, blé/ lentille et blé/ pois fourrager ;
- **Campagne 2017/18 (S2):** blé/ blé/ lentille, blé/ triticales/ pois fourrager, blé/ lentille/ blé et blé/ pois fourrager/ triticales ;
- **Campagne 2018/19 (S3):** blé/ blé/ lentille/ triticales, blé/ triticales/ pois fourrager/ blé, blé/ lentille/ blé/ pois fourrager et blé/ pois fourrager/ triticales/ lentille.

2.3. Mesure effectuées

2.3.1. Mesures de l'humidité pondérale (H)

Plusieurs prélèvements et sur deux profondeurs (0-20 cm, 20-40 cm), des mesures d'humidité ont été réalisés pour chaque stade de développement par traitement et par année expérimentale (**Tableau 01**). Se fait, le profil hydrique du sol a été fait sur plusieurs stades végétatifs (11 stades) par traitement et par année.

La prise des échantillons est réalisée à l'aide d'une tarière (**Figure 01**). Les échantillons sont placés dans des boîtes métalliques et mis à l'étuve après avoir été pesés. Après 24 heures, à une température de 105°C, ces échantillons sont à nouveau pesés. Le pourcentage d'humidité relative au poids sec du sol est donné par la formule décrite par **Baize (2000)** :

$$H (\%) = (PH - PS) / PS * 100$$

Avec: **H**: humidité pondérale ; **PH**: poids humide (poids frais) et **PS**: poids sec



Figure 01: Photo représentative de la mesure de l'humidité pondérale (photo originale).

Tableau 01: Stades végétatifs correspondent aux prélèvements et mesures d'humidité du sol.

Stade	Correspondance
Stade 1	Avant semis (<i>mesuré un jour avant semis</i>)
Stade 2	Semis
Stade 3	Levée
Stade 4	3 feuilles
Stade 5	Début tallage
Stade 6	Plein tallage
Stade 7	Montaison
Stade 8	Epiaison-floraison
Stade 9	Formation des graines
Stade 10	Maturation
Stade 11	Après la récolte (<i>mesuré un jour après la récolte</i>)

2.3.2. Paramètres physiques

2.3.2.1. Mesures de la densité apparente du sol (ou masse volumique) (Da): la mesure de la masse volumique du sol, est un indicateur du tassement du sol et de la porosité totale du sol. Elle a été mesurée par la méthode du cylindre calibré (le cylindre avait un volume de 251.51 cm³). Les mesures sont réalisées sur trois profondeurs P1= 0-5 cm, P2= 5-10 cm et P3= 10-15 cm. Nous avons déterminé le poids du sol contenu dans chaque cylindre, après avoir séché les échantillons à l'étuve (105°C pendant 24 heures) (**Figure 02**), la masse volumique du sol (g.cm⁻³) est calculée selon l'équation décrite par **Baize (2000) (annexe 03)**.

$$Da\left(\frac{g}{cm^3}\right) = \text{masse totale du sol sec/volume du cylindre}$$

Da: la masse volumique du sol.



Figure 02: Photo représentative de la mesure de la densité apparente (photo originale)

2.3.2.2. Détermination de la porosité (P)

La porosité du sol a été déduit en utilisant l'équation suivante:

$$\text{Porosité} = [(\text{densité réelle} - \text{densité apparente}) / \text{densité réelle}] * 100$$

La densité réelle d'un sol agricole a été estimé avec 2,654 g/ cm³.

2.3.2.3. Résistance à la pénétration du sol (Compaction du sol) (Rp)

La mesure de la résistance pénétrométrique (Rp) a été réalisée à l'aide d'un pénétromètre dont le mode opératoire consiste à faire enfoncer le cône du pénétromètre dans le sol et à mesurer l'effort à appliquer. Cet effort, affiché à la surface de la base du cône définit l'indice de cône (25N). Les mesures sont réalisées sur trois profondeurs (0-5cm, 5-10 cm et 10-15 cm) avec trois répétitions pour chaque traitement (**Figure 03**).

$$Rp \text{ (N/ cm}^2\text{)} = \text{la lecture sur l'écran / la surface du cône}$$

Ensuite les résultats ont été convertis en Mégapascal (MPa) (1 MPa = 100 N/cm²).



Figure 03: Photo illustrative de la mesure de la résistance à la pénétration par pénétromètre (photo originale).

2.3.3. Prélèvement pour les analyses du sol

Des prélèvements composites du sol ont été réalisés à l'aide d'une tarière à deux profondeurs de 0-20 cm et de 20-40 cm, pour chaque parcelle élémentaire. Les échantillons sont, après avoir séchés à l'air libre, conservés dans des sachets en plastiques et étiquetés.

- ✓ **Les méthodes d'analyse du sol:** les différentes méthodes utilisées pour l'analyse du sol sont représentées dans le tableau 02 cité ci-dessous. (**annexe 03**)

Tableau 02: Méthodes d'analyse du sol utilisées.

Les éléments physico-chimiques analysés	Méthode d'analyse correspondante
Granulométrie	Pipette de ROBINSON
Conductivité (CE)	Conductimètre
pH eau	pH-mètre
Carbonate (CaCO_3)	Calcimètre de BERNARD
Matière organique (MO)	Méthde d'ANNE
C/N	/
Azote totale (N)	Keldjal
Phosphore total (P)	Olsen
Potassium échangeable (K)	Extraction par l'acétate d'ammonium
Magnésium échangeable (Mg)	
Calcium échangeable (Ca)	
Sodium échangeable (Na)	

2.4. Analyses statistiques

Les résultats obtenus ont été traités à l'aide du logiciel XLSTAT 2019, selon une analyse de variance basée sur la comparaison des moyennes de Newmann et Keuls (5 %). La relation entre les différentes paires de variables est étudiée par le calcul des coefficients de corrélation. Une autre analyse descriptive multidimensionnelle a été effectuée; il s'agit de l'analyse des composantes principales (ACP).

3. Résultats et Discussion

Les propriétés physico-chimiques du sol avant le semis à différentes profondeurs de sol sont présentées dans le **tableau 03**.

Tableau 03: Moyennes des valeurs des caractères physico-chimiques par profondeur avant l'installation des essais.

Propriété du sol	Profondeur de sol (cm)	
	0-20 cm	20-40 cm
Argile (< 0,002 mm) (%)	26 %	
Limon (0,002-0,05 mm) (%)	32 %	
Sable (> 0,05 mm) (%)	42 %	
Matière organique (MO)	0,42	1,17
Azote (N) (%)	0,22	0,12
Phosphore (P) (ppm)	42,00	13,80
Potassium (K) (meq/ 100 g)	0,55	0,50
C/ N ratio	12,21	5,67
pH	7,80	7,84
Conductivité électrique (CE) (ms/ cm)	0,21	0,19
CaCO ₃ (%)	5,64	6,69
Magnésium (Mg) (meq/ 100 g)	2,9	2,9
Calcium (Ca) (meq/ 100 g)	43,8	43,6
Sodium (Na) (meq/ 100 g)	0,3	0,15

3.1. Humidité pondérale du sol

L'ensemble des facteurs étudiés: le travail du sol, l'année agricole, l'espèce cultivée et ainsi le stade de mesure et la profondeur du sol ont tous un effet très hautement significatif ($P < 0.001$) sur l'humidité du sol (H) avec un cv de 0,34 %. Les effets de l'interaction entre la plupart de ces facteurs sont très hautement significatifs (**Tableau 04**).

La comparaison des moyennes de l'humidité entre les années agricoles a montré que la campagne C2 (2017/18) a enregistré une valeur élevée avec 17,30 % comparé respectivement à la campagne C3 (2018/19: 15,01 %) et C1 (2016/17: 13,42 %). Ces écarts indiquent des variations de la relation précipitations-humidité du sol. Le taux d'humidité par stade végétatif a atteint une valeur maximale au stade 2 (semis) et stade 3 (levée) ; donc durant la période végétative qui coïncide avec la période hivernale. Juste après la récolte, nous n'avons pas constaté la même tendance et l'humidité varie de 11,96 % ; 9,38 % et 7,39 % respectivement en C1, C2 et C3 comme le montre la **figure 04** ; ceci est dû essentiellement aux pluies du mois de mai et juin en C1 (2017), comme s'est montré dans la **figure 02 en chapitre 01**. Les niveaux d'humidité mesurée dans les trois campagnes sont plus élevés à la deuxième profondeur (20-40 cm) comparativement à la première profondeur (0-20 cm). L'humidité mesurée en deux profondeurs 0-20 cm et 20-40 cm a été en maximum en deuxième campagne (2017/18) (**Figure 05**).

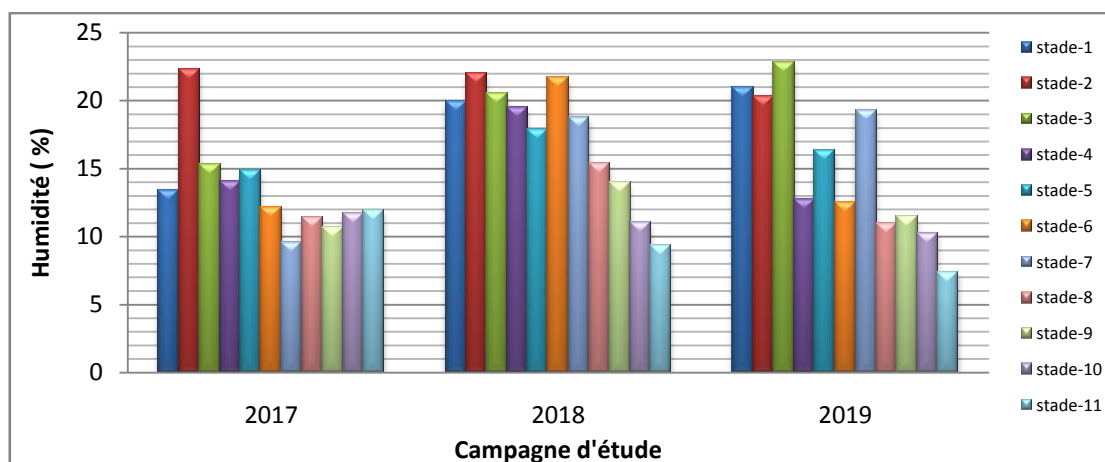


Figure 04: Humidité du sol par stades de culture et par campagne agricole.

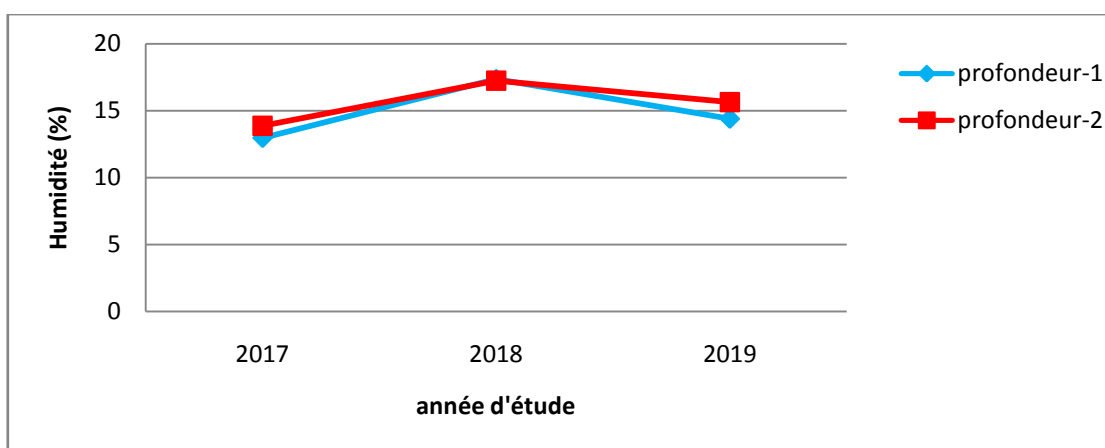


Figure 05: Humidité du sol par profondeurs et par année agricole.

Par technique culturale, le SD présente des valeurs élevées en humidité du sol (14,31 % en C1 ; 18,14 % en C2 et 15,43 % en C3), comparé au TC (12,53 %, 16,45 % et 14,60 % en C1, C2 et C3 respectivement) (**figure 06**). De fait, le SD a une tendance d'avoir plus d'humidité du sol que le TC (**Boudiar et al., 2022**). Selon **Jabro et al. (2008)**, les parcelles emblavées sous SD ont enregistré des taux en humidité élevés par rapport au TC et TCS ; cela est probablement dû à la présence des résidus de culture qui forment un mulch en empêchant l'évaporation de l'humidité du sol (**Fan et al., 2020 ; Semenikhina et al., 2021**). Aussi la présence d'un grand volume de micropores sous le SD peut s'approprier plus d'humidité (**Archad et al., 1999**). La faible quantité d'eau stockée dans les parcelles gérées en TC est due à une forte évaporation d'eau en raison de l'absence des résidus de cultures à la surface du sol (**Papini et al., 2007**). Egalement, le TC tasse le sol et le rend plus érodé et sa capacité de rétention d'eau devient plus faible (**Kaushal et al., 2022**). Alors les histogrammes de la **figure 07**, montre que l'humidité du sol dans les deux profondeurs (0-20 et 20-40 cm) est élevée en SD qu'en TC. Dans les deux systèmes de travail du sol (SD et TC), l'humidité mesuré est différente entre la première et la deuxième profondeur, en ajoutant que la 2^{ème} profondeur a enregistré la teneur en humidité la plus élevée que la première profondeur. la teneur en humidité à n'importe quelle profondeur était élevée en SD que dans le travail conventionnel (**Huang et al., 2012**), ce qui induit une infiltration d'eau dans le système SD

(Jemai et al., 2013). D'après Alhameid et al. (2019), la teneur en eau du sol en semis direct élevée dans les deux profondeurs par rapport travail conventionnel, ce qui suggère une continuité des macro-pores et micropores dans le sol et qu'il y a un mouvement efficace de l'humidité du sol profondément dans le profil du sol.

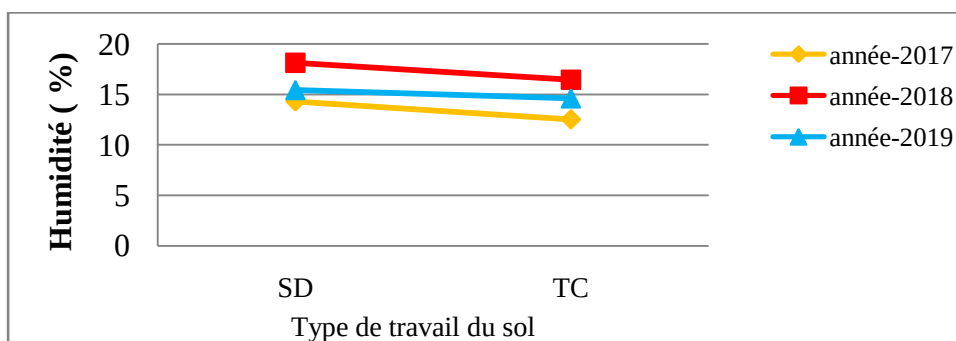


Figure 06: Humidité du sol par technique culturale et par année agricole. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel)

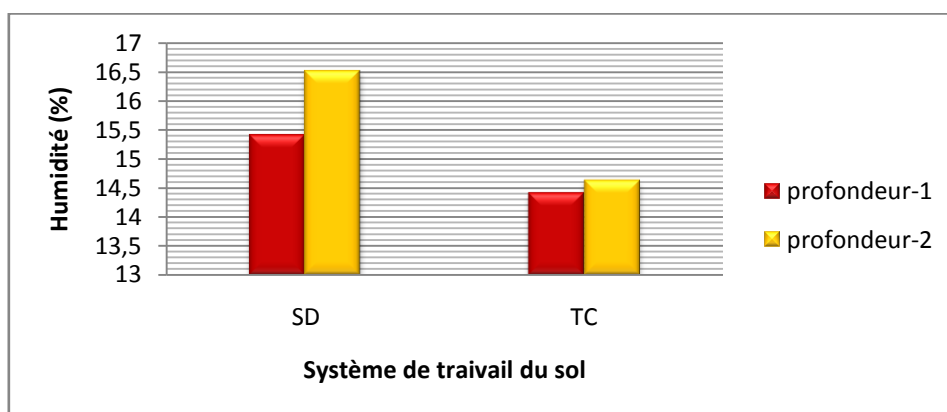


Figure 07: Humidité du sol par profondeur et par mode de travail du sol. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel)

L'évolution du profil hydrique par stade de croissance et de développement est illustrée par les courbes de la **Figure 08**. Nous constatons que l'humidité pondérale du sol diminue au fur et à mesure de l'avancement des stades de culture de quelque nature que ce soit le travail du sol (SD ou TC).

Quelque soit le travail du sol, la moyenne d'humidité pondérale du sol constatée est à son maximum au stade de semis ; elle atteignait 21,17 % en TC et 21,89 % en SD, donc, modérément élevée en SD par rapport au TC. Aux stades du fin cycle, cette différence est plus tangible ce qui corrobore les résultats de **Elaabadi et al. (2022)** ; **Mekhlouf et al. (2019)** et **Benniou (2012)**. Dans les périodes critiques du cycle physiologique des cultures et essentiellement les stades: épiaison-floraison (stade 8) et formation des graines (stade 9), le semis direct a conservé plus d'humidité du sol comparé à celle du TC, ce qui corrobore les résultats de **Alvarez & Steinbach (2009)** et ceux de **Du et al. (2023)**. Nous avons également constaté que l'humidité du après la récolte demeure supérieure en SD qu'en TC. **Pala et al. (2000)**, ont trouvé que le semis direct a laissé un peu plus d'eau dans le sol au moment et après la récolte que le travail conventionnel. D'après nos résultats, l'humidité du sol est plus faible en fin de cycle végétatif et ce dans les deux modes de travail du sol (SD et TC), mais relativement élevée en SD. La faible humidité du sol en fin du cycle peut être expliquer par

les précipitations limitées à la fin de saison de croissance (**Jabro et al., 2011**) comme c'est le cas en Algérie. Ce gain d'humidité en fin de cycle en faveur du SD est sûrement bénéfique à la croissance des cultures à partir de la période fécondation et formation du grain jusqu'à sa maturation complète.

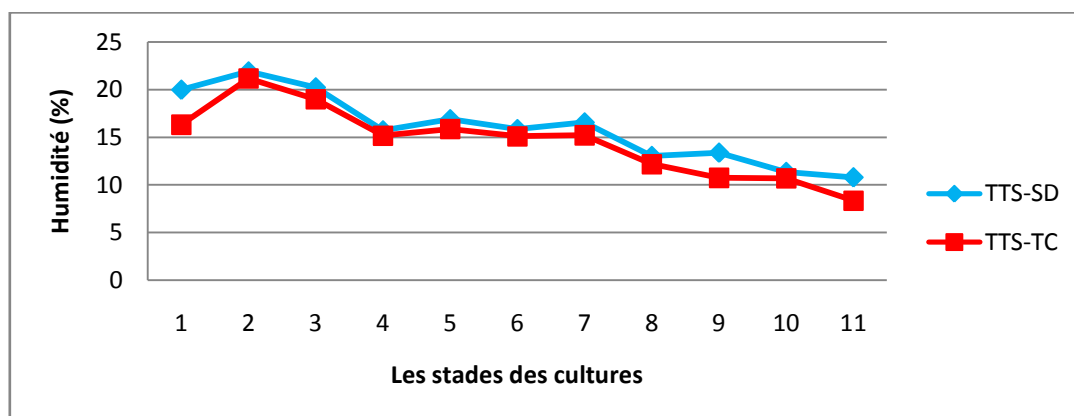


Figure 08: Humidité du sol par stade de culture en fonction de la technique de travail du sol.
(SD : semis direct, TC : travail conventionnel)

Par culture, la comparaison des moyennes de l'humidité du sol entre les cultures introduite dans les rotations culturales montre que la culture du pois fourrager a conservé légèrement plus d'eau, avec une valeur de 15,47 %, suivi par la culture de blé avec une moyenne de 15,34 %, puis la culture de lentille avec 15,25 % et enfin la culture de triticales avec une valeur égale à 14,91 %. Le pois fourrager est une légumineuse, qui a un enracinement peu profond, donc elle peut conserver plus d'eau dans le sol pour la culture suivante (**Nleya & Rickertsen, 2011 ; French, 2016**). Aussi, selon **McVay et al. (2006)**, la culture de blé possédant un système racinaire fibreux permet au sol de stocker plus d'humidité.

En première année, la culture du blé a enregistré une moyenne d'humidité légèrement élevée (13,94 %) comparée à la culture du pois fourrager (13,57 %), et la culture de lentille (13,21 %) et enfin la culture de triticales (12,96 %). Par contre, en deuxième année agricole (plus pluvieuse), les légumineuses (pois fourrager et lentille) ont enregistré des moyennes de l'humidité élevées (18,09 % et 17,26 %). Alors, en troisième année agricole (2018/19), la culture de lentille a conservé plus d'humidité (15,29 %), suivi par la culture de céréales: triticales et blé avec 15,07 % et 14,95 % et enfin la culture de pois fourrager avec une valeur de 14,76 % (**Figure 09**). Donc, le stockage d'humidité dans le sol était élevée chez la culture de lentille à précédent triticales. Selon **Pala et al., (2000)**, l'eau conservé dans le sol varie selon la quantité et la répartition des précipitations durant la saison de croissance de la culture de lentille. Tandis que, le stockage d'humidité du sol était faibles chez la culture de pois fourrager à précédent blé, par ce que la culture de blé exige beaucoup d'eau pour sa croissance et donc laisse le sol un peu humide pour la culture suivante.

D'après les histogrammes de la **figure 10**, l'ensemble des cultures conduites en SD a conservé plus d'humidité qu'en TC. Ceci a été confirmé par les résultats obtenus par **Mtyobile et al. (2020)**. En SD, chacune des cultures de pois fourrager, le blé et la lentille a conservé plus d'eau (16,83 %, 16,24 % et 15,95 % respectivement) contre celle du triticales

(14.90 %). En technique de labourage du sol (TC), dans la même tendance, l'humidité du sol était bien inférieure (avec une moyenne de 14,55 % pour le blé et la lentille et 14,56 % pour le pois fourrager). Dans les deux techniques de travail du sol, la culture de triticales a enregistré des niveaux faibles, avec une moyenne de 15,38 % en SD et 14,44 en TC.

Chez l'ensemble des cultures on constate que des niveaux d'humidité étaient élevés durant la période végétative puis ils diminuaient en période de reproduction et de maturation du grain. Selon **Wiese et al. (2016)**, la teneur en eau du sol a tendance à diminuer du semis à la récolte. Après la récolte, les légumineuses ont enregistré des niveaux élevés d'humidité du sol comparativement à la culture de triticales (**Figure 11**). D'après les histogrammes de la **figure 12**, le classement des cultures sur la base de la profondeur du sol montre que chez l'ensembles des cultures introduite dans les rotations le niveau élevé d'humidité a été faveur de la partie sous jacente (20-40 cm), dont la culture du pois fourrager a conservé plus d'eau sur cette partie (16,08 %), suivi par la culture de lentille et blé avec une moyenne de 15,55 %. Tandis que sur la partie superficielle (profondeur 0-20 cm), la culture de blé avec une moyenne de 15,13 % a conservé plus d'humidité, suivie par la culture de lentille et pois fourrager (14,96 % et 14,86 % respectivement). Par contre, la culture de triticales a conservé des niveaux faibles d'humidité du sol dans les deux profondeurs (0-20 cm et 20-40 cm), (**Figure 12**).

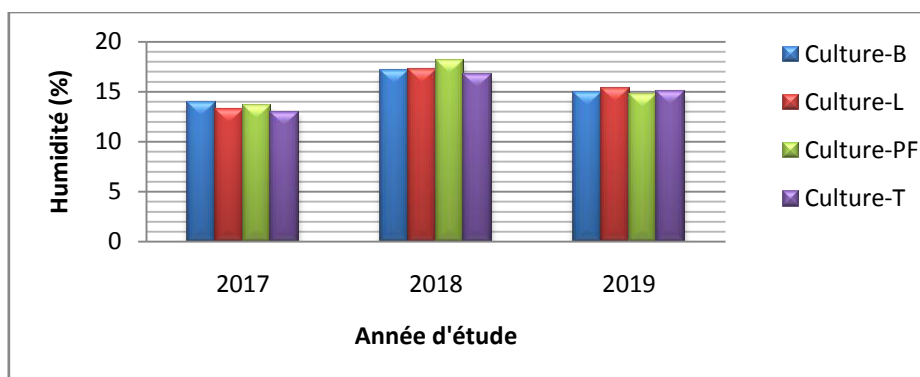


Figure 09: Humidité par culture et par année agricole. (B: blé, L: lentille, PF: pois fourrager, T: triticales.)

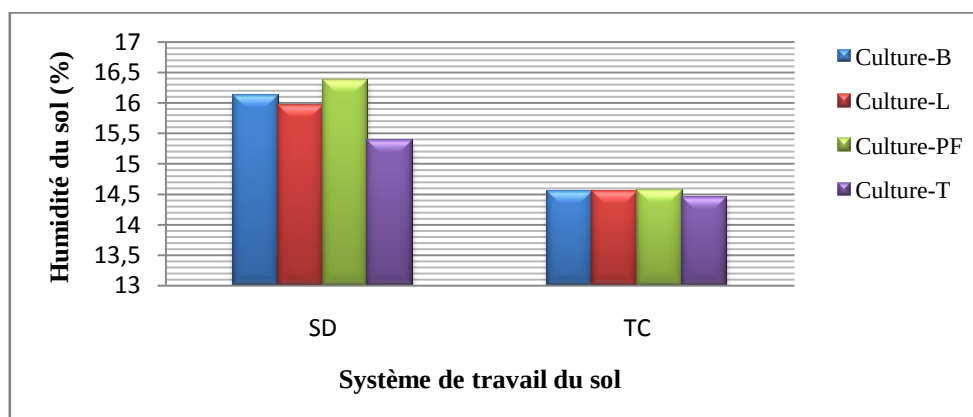


Figure 10: Humidité du sol par culture et par type de travail du sol. (SD: semis direct, TC: travail conventionnel, B: blé, L: lentille, PF: pois fourrager, T: triticales.)

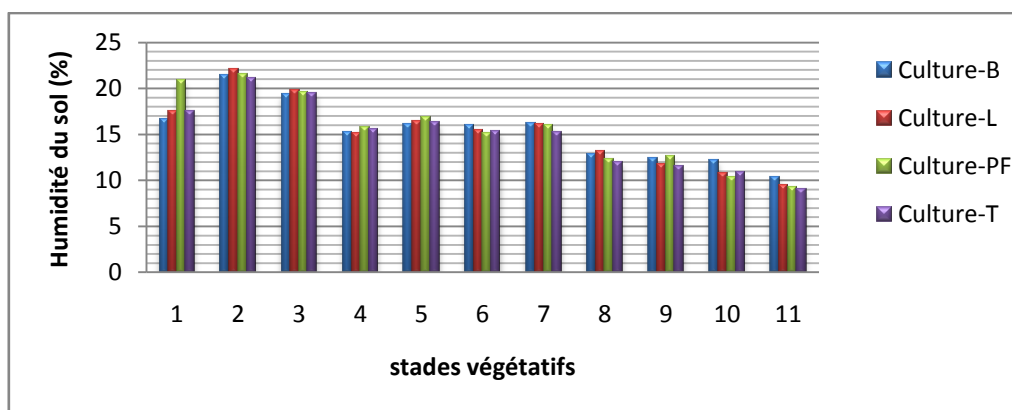


Figure 11: Humidité du sol par stade végétatif et par espèce. (B: blé, L: lentille, PF: pois fourrager, T: triticales)

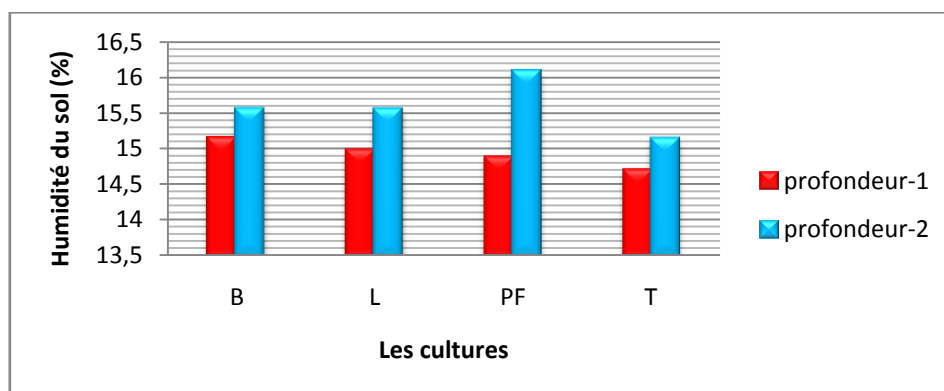


Figure 12: Humidité du sol par profondeur et par culture. (B: blé, L: lentille, PF: pois fourrager, T: triticales).

Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) ont révélé un effet hautement significatif ($p < 0,001$) sur l'humidité du sol pour les sources de variation, qui sont les stades de cycle de croissance végétatifs x profondeur d'échantillonnage (**Tableau 04**).

D'après la **figure 13**, l'humidité du sol est élevée à travers l'ensemble des stades de croissance végétatifs. Alors, l'humidité du sol a enregistré des valeurs élevées en partie sous jacente (profondeur 2 « 20-40 ») et ce dans presque tous les stades de croissance à l'exception du stade montaison (stade 7) où l'humidité de la partie supérieure du sol était élevée comparée à la partie inférieure. Cependant, les écarts dans les valeurs entre les deux profondeurs sont plus visibles en fin du cycle (stades 9, 10 et 11). **Benniou et al. (2020)** ont remarqué que l'horizon 20-40 cm a cumulé plus d'eau que l'horizon 0-20 cm. D'après **Mondal et al. (2023)**, la teneur en eau du sol est élevée pendant la majeure partie de la période de croissance végétative, en particulier dans la couche 15-30 cm, qui est une couche compacte.

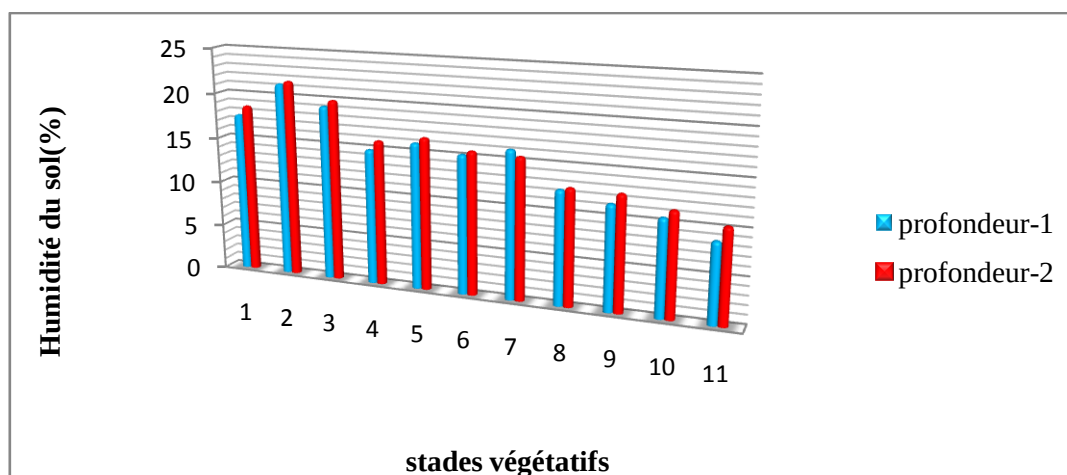


Figure 13: Humidité du sol par profondeur et par stade végétatif.

Tableau 04: Analyse de la variance d'humidité du sol en fonction de sources de variation

Source	DDL	H (%)	Signification
STS	1	810,94	***
année	2	2003,83	***
Culture	3	22,71	***
stades	10	1957,40	***
profondeur	1	178,62	***
STS*année	2	36,73	***
STS*Culture	3	13,48	*
STS*stades	10	36,82	***
STS*profondeur	1	77,27	***
année*Culture	6	25,94	***
année*stade	20	385,92	***
année*profondeur	2	64,88	***
Culture*stade	30	18,59	***
Culture*profondeur	3	14,01	*
stade*profondeur	10	12,86	***
CV (%)	//	0,344	//
Ecart-type	//	5,24	

Légende : STS : système de travail du sol, * : effet significatif, ** : effet hautement significatif, *** : effet très hautement significatif.

3.2. Paramètres physiques

3.2.1. Densité apparente (Da)

L'analyse de la variance a montré que les sources de variation ; campagne agricole, le type de culture introduite en rotation et la profondeur du sol ont tous un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) sur la densité apparente du sol. Par contre, l'effet de l'interaction technique de travail du sol combiné à la campagne agricole est significatif ($P < 0,05$). Alors, que la technique de travail du sol n'a aucun effet significatif ($P > 0,05$) sur la densité apparente du sol, avec un CV = 0,123 % (**Tableau 05**).

L'analyse des moyennes montrent que la moyenne générale des essais s'élève à $1,04 \text{ g/cm}^3$ avec un écart type de 0,13. Durant les trois campagnes agricoles, la densité apparente est élevée en SD, avec une moyenne $1,05 \text{ g/cm}^3$ comparé à celle issu de TC, avec une moyenne $1,03 \text{ g/cm}^3$. Selon **Lipeic et al. (2006)**, les sols soumis sous travail conventionnel ont généralement une densité apparente plus faible comparé à ceux soumis au semis direct.

Par année agricole, la densité apparente est plus élevée en campagne 2 (2017/18: $Da_{SD} = 1,12 \text{ g/cm}^3$ et $Da_{TC} = 1,08 \text{ g/cm}^3$), **figure 14**. Cependant, en campagne 3 (2018/ 2019), la Da été faible ($1,01 \text{ g/cm}^3$) comparé à celle de la campagne 1 (2016/ 2017: $1,02 \text{ g/cm}^3$). Tandis qu'en TC, la densité apparente en campagne 3 été élevée ($1,03 \text{ g/cm}^3$) que celle de la campagne 1 ($0,90 \text{ g/cm}^3$) (**figure 14**).

D'après nos résultats, la densité de la troisième campagne est faible par rapport à la densité de la première campagne en semis direct, le cas contraire est constaté en travail conventionnel, cela suggère que la technique de semis direct à long terme améliore les propriétés physiques du sol.

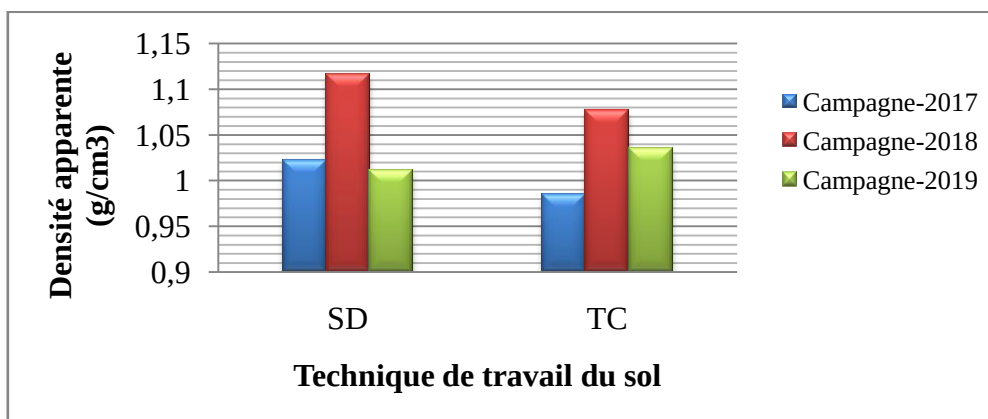


Figure 14: Densité apparente par technique de travail du sol et par campagne agricole. (SD: semis direct, TC : travail conventionnel, Da : densité apparente)

Par profondeur, dans les deux techniques de travail du sol la densité apparente du sol augmente proportionnellement l'accroissement de la profondeur du sol (**Figure 15**); cela corrobore les résultats de **Bhattacharyya et al., (2006)** et ceux de **Jabro et al. (2011)**. La valeur moyenne de la densité apparente du sol des trois profondeurs est faible en TC comparée en SD. Elle est élevée en profondeur 3 (10-15 cm) ($1,15 \text{ g/cm}^3$ en SD et $1,14 \text{ g/cm}^3$ en TC) comparée aux deux profondeurs de surface. **Dam et al. (2005)** ont constaté que les valeurs de la Da du sol sont élevées dans les couches profondes du sol. En profondeur 2 (5-10 cm), la Da du sol enregistre une valeur inférieure à celle de la couche profonde ($1,06 \text{ g/cm}^3$ en SD et $1,04 \text{ g/cm}^3$ en TC). Alors en couche superficielle du sol (0-5 cm), la valeur de la Da du sol est faible ($0,94 \text{ g/cm}^3$ en SD et $0,92 \text{ g/cm}^3$ en TC). Ce résultat corrobore ceux de **Jabro et al. (2011)**, qui ont montré que la densité apparente était élevée en profondeur (5-10 cm et 10-15 cm) comparé à celle de la surface (0-5 cm). La faible densité apparente en TC, dans les trois couches, est due principalement à l'incorporation des résidus des cultures par l'effet de l'action de labour en couches profondes du sol.

La différence entre les deux techniques de travail du sol est visible dans les couches superficielles (0-5 cm et 5-10 cm) par rapport à la couche profonde (10-15 cm). D'après **Salem et al. (2021)**, elle demeure élevée en semis direct à celle du travail conventionnel et que la différence entre les deux systèmes est plus visible dans deux premiers couches du sol (0-5 cm et 5-10 cm) que dans la couche la plus profonde.

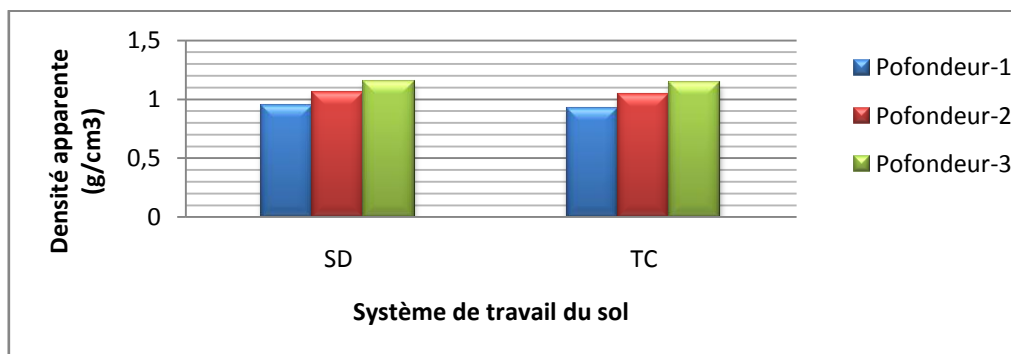


Figure 15: Densité apparente du sol par profondeur en fonction des techniques de travail du sol (*SD* : semis direct, *TC* : travail conventionnel, *Da* : densité apparente).

Par culture, l'analyse des moyennes de la *Da* du sol a montré qu'en campagne 1 (2016/17), la *Da* du sol était faible en partie de la parcelle cultivée en blé ($0,97 \text{ g/cm}^3$), suivi par la partie cultivée en pois fourrager ($0,98 \text{ g/cm}^3$), puis par la partie de la parcelle cultivée en triticales ($1,00 \text{ g/cm}^3$) et enfin la partie cultivée en lentille ($1,05 \text{ g/cm}^3$) (**Figure 16**). En campagne 2, la *Da* du sol était élevée en parcelles cultivée en blé et en lentille ($1,14 \text{ g/cm}^3$ et $1,12 \text{ g/cm}^3$), suivi par la partie cultivée en triticales ($1,07 \text{ g/cm}^3$) et enfin la partie de la parcelle cultivée en pois fourrager ($1,06 \text{ g/cm}^3$). En campagne 3, les parcelles cultivées en céréales (blé et triticales) avaient une *Da* élevée comparée à celles cultivées en légumineuses (pois fourrager et lentille) (**Figure 16**).

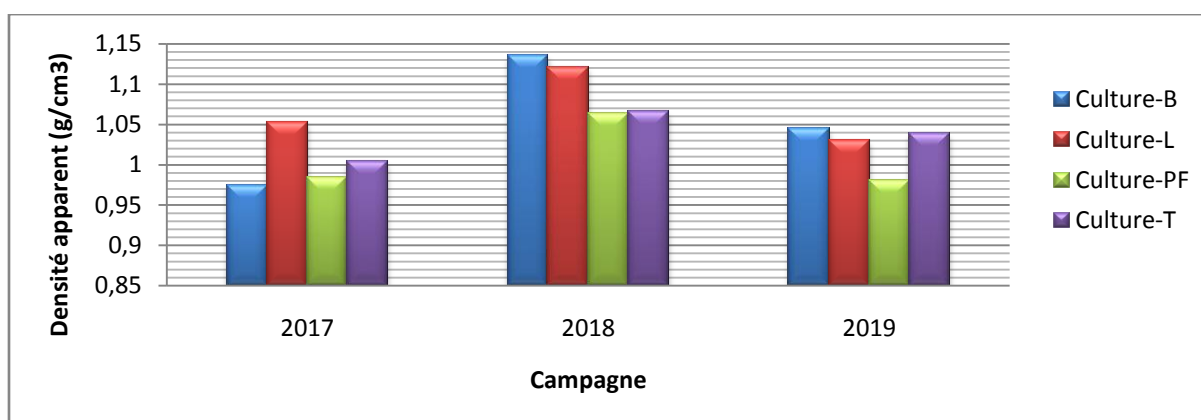


Figure 16: Densité apparente du sol par cultures en fonction de l'année agricole. (*B*: blé, *L*: lentille, *PF*: pois fourrager, *T*: triticales).

Les valeurs moyennes de la *Da* du sol cultivé en blé, lentille et pois fourrager était faibles en TC comparé à ce cultivé en triticales. Les parcelles cultivées triticales enregistraient une faible *Da* en SD. Aussi, la culture du pois fourrager a enregistré une *Da* du sol faible dans les deux technique du travail du sol ($1,02 \text{ g/cm}^3$ en SD et $1,00 \text{ g/cm}^3$ en TC) et ce comparé

aux autres cultures (**Figure 17**) et cela peut être due à l'effet des précédents culturaux qui sont des céréales.

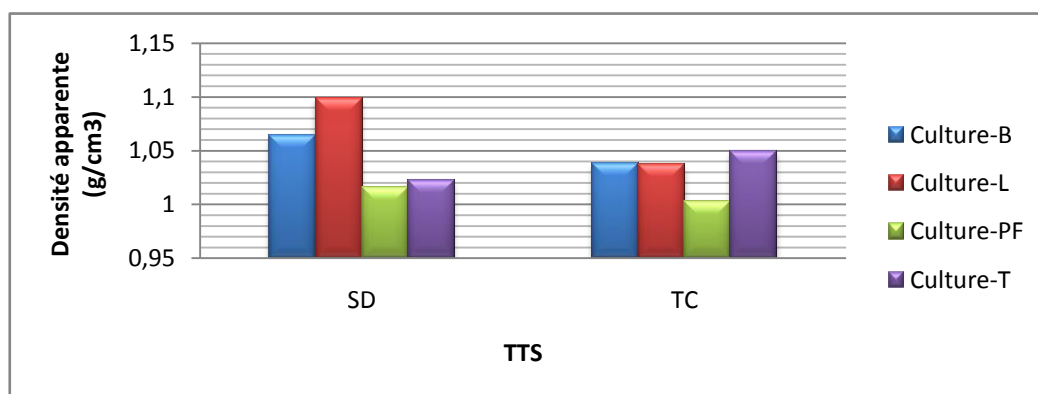


Figure 17: Densité apparente par culture en fonction de modes de travail du sol. (*SD: semis direct, TC: travail conventionnel, B: blé, L: lentille, PF: pois fourrager, T: triticales*)

D'après la **figure 18**, la densité apparente du sol de l'ensemble des cultures augmente en fonction de la profondeur du sol ; ceci est en accord avec les résultats de **Wright & Hons (2005)**. Nous avons signalé que la densité apparente du sol cultivé du pois fourrager est faible dans les trois couches, celles de la culture de lentille ont une densité apparente du sol élevée par rapport à celles des céréales (blé et triticales). Selon **Fu et al., (2017)**, la densité apparente varie en fonction des cultures inclus dans les rotations en raison de type de leur système racinaire.

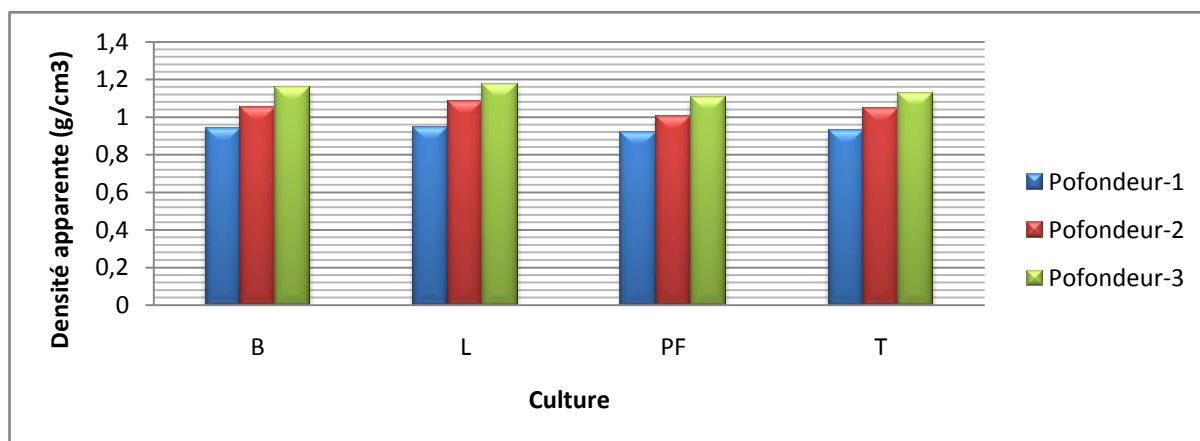


Figure 18 : Densité apparente du sol par profondeur en fonction des cultures et rotation. (*B: blé, L: lentille, PF: pois fourrager, T: triticales*).

3.2.2. Résistance pénétrométrique (Rp)

ANOVA a révélé un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) de la majorité des sources de variation : l'année agricole, la technique du travail du sol, la profondeur du sol et leurs interactions sur Rp. Tandis que, l'effet de la culture inclus dans la rotation été significatif ($P < 0,05$). Alors, que l'interaction culture avec année agricole et avec technique de travail du sol ont respectivement un effet hautement significatif ($P < 0,01$) et très hautement significatif ($P < 0,001$) sur Rp, avec un CV de 0,53 % comme le montre le **Tableau 05**.

La comparaison des moyennes de l'essai des valeurs de la résistance au pénétromètre entre les campagnes agricoles a montré qu'en deuxième année, le sol a enregistré une valeur légèrement élevée comparé à celle de la première campagne (5,32 Mpa contre 5,12 Mpa respectivement). En troisième année, la valeur de la Rp du sol a enregistré une diminution (3,40 Mpa). Cette diminution de la valeur de Rp est probablement attribuée à la densité de racines des cultures, elle peut également être attribuée à d'autres facteurs tels que la teneur en matière organique du sol, l'aération du sol, la présence de résidus de cultures antérieures. Il est donc important de prendre en compte tous ces facteurs lors de l'évaluation de la résistance au pénétromètre du sol.

La **figure 19** a montré qu'en SD la valeur de Rp été élevée comparée à celle du TC, avec un taux de 85,76 %, ceci est en accord avec les résultats de **Jabro et al. (2008)** et de **Barut & Celik (2017)**. Selon **Alvarez & Steinbach (2009)**, la Rp était 50 % plus élevée en SD qu'en TC. Cette résistance à la pénétration est avérée élevée en SD qu'en TC en raison de l'absence de la perturbation du sol en technique de semis direct (**Ferreras et al., 2000**).

La résistance au pénétromètre diminue de la première campagne à la troisième campagne en technique de SD (7,14 Mpa, 5,69 Mpa et 5,16 Mpa respectivement) ; tandis qu'en TC, la valeur de la résistance pénétrométrique varie d'une année à l'autre : élevée en première et deuxième campagne (3,10 Mpa et 4,94 Mpa) et faible en troisième campagne (1,65 Mpa).

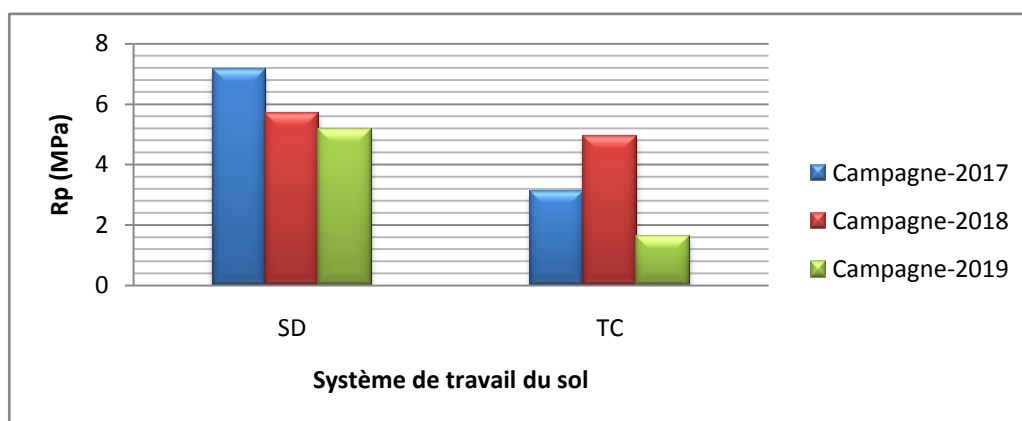


Figure 19: Résistance pénétrométrique par système de travail du sol et par campagne agricole. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel).

Les résultats montrent également que les espèces étudiées, à savoir le blé, le triticale, la lentille et le pois fourrager, ont enregistré des valeurs de Rp faibles lors de la troisième campagne. Lors de la deuxième campagne, les cultures de blé, de lentille et de pois fourrager ont présenté des valeurs Rp élevées par rapport aux autres campagnes, tandis que la culture de triticale a montré une valeur élevée lors de la première campagne. En revanche, lors de la première et de la troisième campagne, les valeurs Rp ont été élevées pour la culture de lentille, tandis que la culture de blé a présenté une valeur élevée lors de la deuxième campagne. Ceci est illustré dans la **Figure 20, partie "b"**.

D'après la **figure 20 "a"**, les quatre cultures incluses dans la rotation (blé, triticale, lentille et pois fourrager) ont montré une résistance au pénétromètre plus élevée en semis

direct qu'en technique conventionnelle. En semis direct, la culture de lentille présente une résistance pénétrométrique la plus élevée avec une valeur moyenne de 6,55 Mpa, suivie par la culture de blé avec une valeur de 6,27 Mpa, la culture de pois fourrager avec une valeur de 5,81 Mpa et enfin la culture de triticale avec une moyenne de 5,35 Mpa. En revanche, en technique conventionnelle, c'est la culture de triticale qui présente la résistance pénétrométrique la plus élevée avec une valeur de 3,36 Mpa, suivie par la culture de pois fourrager (3,25 Mpa), le blé (3,17 Mpa) et enfin la lentille (3,13 Mpa).

En conclusion, il est possible de constater que la rotation des cultures en utilisant la technique de semis direct a entraîné une diminution des valeurs de résistance pénétrométrique par rapport à la technique de labourage conventionnelle. Cette observation rejoint les résultats d'une étude menée par Alhameid et al. (2019), qui ont constaté qu'une rotation de 4 ans en semis direct réduit la résistance pénétrométrique du sol de 20 % par rapport au labourage conventionnel. Cela suggère que l'utilisation du semis direct associée à la rotation des cultures dans le cadre d'une agriculture de conservation peut contribuer à améliorer la structure du sol et à réduire la compaction, ce qui est bénéfique pour la croissance des cultures et les rendements agricoles.

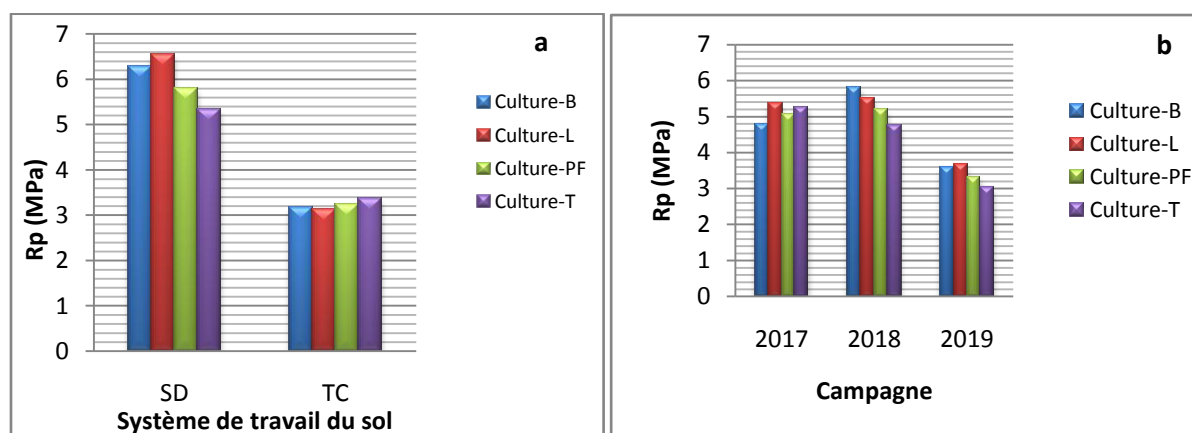


Figure 20: Résistance pénétrométrique par type de culture, mode de travail du sol (a) et par campagne agricole (b). (B : blé, L : lentille, PF : pois fourrager, T : triticale, SD : semis direct, TC : travail conventionnel).

La résistance du sol augmente à mesure que l'on pénètre plus profondément dans le sol. Les deux premières profondeurs (0-5 cm et 5-10 cm) présentent des valeurs de résistance relativement faibles (3,09 Mpa et 4,65 Mpa respectivement), tandis que la profondeur de 10-15 cm présente une résistance plus élevée (6,10 Mpa). Ces résultats indiquent que la résistance pénétrométrique à la profondeur de 0-5 cm diminue au fil des années, passant de 3,95 Mpa en 2016/17 à 2,08 Mpa en 2018/19. Cependant, les valeurs de Rp aux profondeurs 2 et 3 augmentent considérablement lors de la deuxième campagne (5,57 Mpa et 7,14 Mpa respectivement) par rapport à la première et troisième campagne (**Figure 21 "b"**).

Selon les histogrammes de la **figure 21 "a"**, les valeurs de résistance pénétrométrique sont plus élevées en SD (semis direct) par rapport au TC (travail du sol conventionnel) pour les trois profondeurs. Ce résultat est en accord avec les études de **Pereira et al. (2002)** et **Bueno et al. (2006)** qui ont montré que la résistance à la pénétration augmente avec

l'augmentation de la profondeur. De plus, **Munkholm et al. (2013)** ont démontré que les valeurs de R_p étaient plus faibles en TC dans la couche de 0-20 cm par rapport au SD. Selon **Jabro et al. (2009)**, la R_p augmente avec l'augmentation de la profondeur en raison de l'augmentation du frottement des couches de sol, indépendamment du type de travail du sol. L'augmentation des valeurs de R_p est proportionnelle à l'accroissement de la profondeur du sol. Le TC indique la formation de la semelle de labour causée par le labour (**Costa et al., 2006**). La culture de lentille a enregistré des valeurs de R_p élevées dans les deux premières profondeurs (0-5 cm et 5-10 cm) avec des moyennes de 3,49 Mpa et 4,90 Mpa, tandis que la culture de blé a enregistré une valeur élevée de 6,22 Mpa dans la troisième profondeur (10-15 cm), (**Figure 21 "c"**).

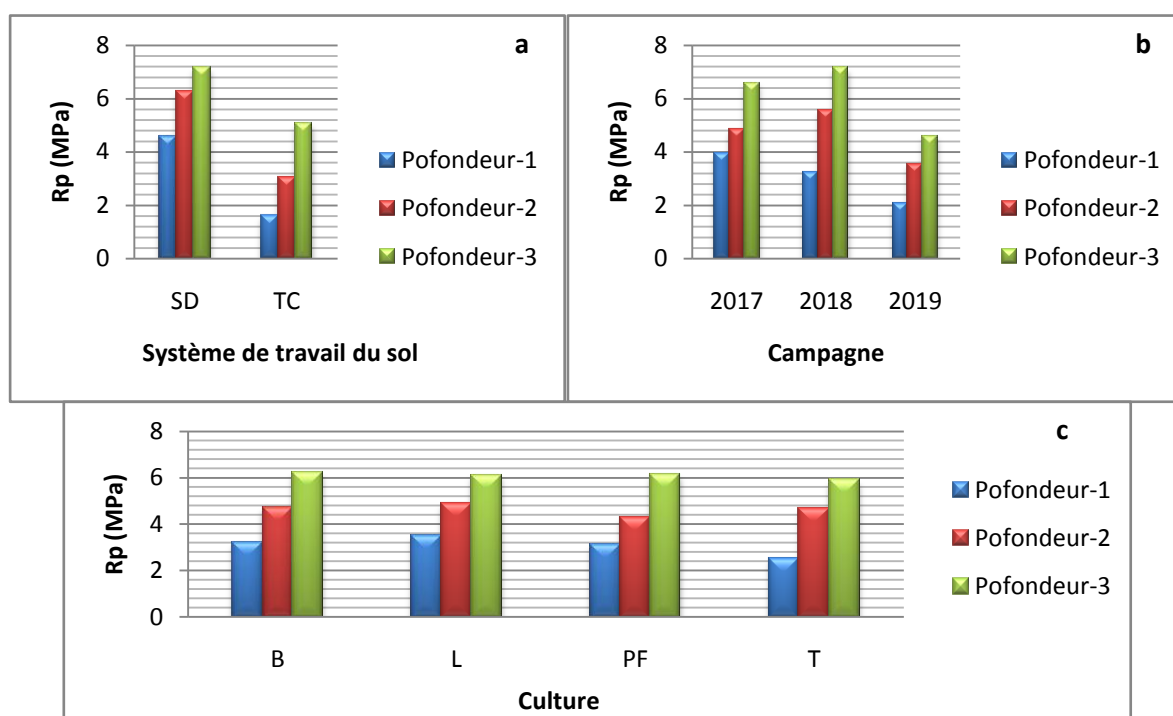


Figure 21: Valeurs de la résistance pénétrométrique par profondeur en fonction du travail du sol (a), des campagnes d'étude (b) et des cultures (c). (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, B : blé, L : lentille, Pf : pois fourrager, T : triticales).

3.2.3. Porosité

Selon les résultats du **tableau 05**, il est démontré que les campagnes d'étude, le type de culture en rotation et la profondeur ont un effet très hautement significatif sur la porosité ($P < 0,001$). Cela signifie que ces facteurs ont une influence importante sur la porosité du sol. Toutefois, il est important de noter que l'interaction entre le travail du sol et les campagnes d'étude a un effet significatif ($P < 0,05$) (**Tableau 05**). Cela implique que l'effet du système de travail du sol sur la porosité peut varier selon les campagnes d'étude. Il pourrait y avoir des interactions complexes entre ces deux facteurs qui influencent la porosité du sol.

La comparaison des moyennes générales de la porosité du sol entre les différentes campagnes d'étude a montré que la porosité était plus faible pendant la deuxième campagne 2017/18 (58,69 %) par rapport à la première (62,18 %) et à la troisième campagne (61,14 %).

Cette différence peut être attribuée à plusieurs facteurs tels que les conditions météorologiques, les pratiques agricoles, et les caractéristiques du sol lui-même. Les sols soumis au travail conventionnel (TC) ont une porosité supérieure à celle des sols du semis direct (SD), avec des moyennes de 61,11% et 60,43% respectivement. Cette observation est cohérente avec des études antérieures, comme celle de **Lipiec et al. (2006)**, qui ont également constaté que les sols soumis au travail conventionnel ont une porosité plus élevée par rapport aux sols du semis direct. Les opérations du travail conventionnel du sol, telles que le labour, ont pour effet d'ameublir le sol et de maintenir une structure assez lâche. Cela permet de minimiser la densité apparente du sol (la masse volumique du sol) ainsi que sa résistance à la pénétration, tout en augmentant sa porosité (**Dam et al., 2005 ; Jabro et al., 2009**). Le sol travaillé de manière conventionnelle présente donc plus de macropores et de fissures, ce qui favorise la circulation de l'air, de l'eau et des racines des plantes.

Selon **Bhattacharyya et al. (2006)**, La porosité faible aux parcelles de SD est probablement due au non distribution du sol comparativement au TC. D'après la **figure 22 « a »**, les parcelles conduites en TC ont une porosité supérieure à celle du SD dans les deux campagnes agricoles (2016/17 et 2017/18) (62,89 % et 59,44 % en TC contre 61,47 % et 57,95 % en SD). En troisième campagne (2018/19), les parcelles soumises en SD ont une porosité légèrement supérieure à celles du TC (61,87 % contre 61,01 %). Dans la plupart des cas, la porosité du sol dans les parcelles de SD reste proche de celle des parcelles de TC. Il est également intéressant de mentionner que les effets de la technique de non labour sur la porosité du sol peuvent prendre du temps à se manifester. Selon **Jemai et al. (2013) et Glab & Kulig, (2008)**, il faut environ 3 ans d'adaptation pour observer une augmentation significative de la porosité du sol dans les parcelles de SD.

Par type de culture, les parcelles de pois fourrager ont enregistré une porosité légèrement supérieure (61,97 %) (**Figure 22**) par rapport aux autres cultures (triticale, blé et lentille) qui présentent les valeurs respectives suivantes : 60,96 %, 60,40 % et 59,76 %, ***ce qui montre les avantages de l'introduction du pois fourrager dans la rotation des cultures sur le plan agronomique et environnemental. La culture de pois fourrager va créer des macropores et des macro-agrégats en raison de la décomposition de litière foliaire et de la biomasse racinaire (Mtyobile et al., 2020 ; Nath et al., 2023).***

La combinaison campagne agricole et cultures montrent que la porosité du sol peut varier d'une campagne à l'autre et d'une culture à l'autre. Dans la première campagne (2016/17), le blé présente une porosité plus élevée (63,28 %), tandis que le pois fourrager, le triticale et la lentille ont des valeurs légèrement inférieures (62,93 % ; 62,17 % et 60,33 % respectivement). Dans la deuxième campagne, le triticale et le pois fourrager présentent une porosité supérieure (59,85 %), tandis que la lentille et le blé ont des valeurs plus basses (57,76 % et 57,23 %). Enfin, dans la troisième campagne, le pois fourrager et la lentille ont une porosité plus élevée (63,05 % et 61,19 % respectivement), tandis que le triticale et le blé ont des valeurs légèrement inférieures (60,86 % et 60,67 %) (**Figure 22 partie "b"**). Ces variations de la porosité peuvent être dues à plusieurs facteurs, tels que les pratiques de gestion du sol, les conditions météorologiques, le système racinaire des cultures, etc. Par exemple, la culture de la lentille favorise une distribution plus équilibrée entre les macro et les

micropores, ce qui réduit le compactage du sol améliore la rétention d'eau du sol et sa disponibilité pour la culture suivante (Tigka et al., 2023).

Il est important de noter que ces résultats ne sont qu'un aperçu basé sur les données de trois campagnes et peuvent varier en fonction de nombreux facteurs. Cependant, ils soulignent l'importance de la rotation des cultures et de l'introduction de légumineuses, comme le pois fourrager et la lentille, dans les systèmes de culture pour améliorer la porosité du sol, favoriser la santé du sol et optimiser la disponibilité des nutriments pour les cultures suivantes.

D'après la figure 22 "c", on constate que les parcelles de pois fourrager présentent une porosité élevée dans les deux systèmes de travail du sol, que ce soit en semis direct ou en technique de labour conventionnel (61,72 % et 62,22 %). Cela suggère que le pois fourrager contribue à améliorer la porosité du sol, quelle que soit la méthode de travail du sol utilisée. De plus, les parcelles de blé, de lentille et de pois fourrager ont une porosité élevée en technique de labour conventionnel, tandis que les parcelles de triticales ont une porosité élevée en semis direct. Ces résultats peuvent être liés à la combinaison entre la diversification des cultures et la pratique du semis direct. Selon Iheshiulo et al. (2023), la diversification des cultures, c'est-à-dire le fait de cultiver différentes espèces dans la rotation, combinée à la pratique de semis direct, a un impact positif sur la porosité du sol. Le semis direct permet de réduire la perturbation du sol, ce qui favorise la conservation de la structure du sol et la préservation des agrégats. La diversification des cultures contribue à l'apport de matière organique et à une meilleure répartition des racines dans le sol, ce qui favorise la formation de macro-pores et l'amélioration de la porosité.

Ces résultats suggèrent que la combinaison d'une diversification des cultures dans la rotation et de la pratique du semis direct peut être une approche prometteuse pour améliorer la porosité du sol. Cela permet non seulement de favoriser la santé du sol, mais aussi d'améliorer la rétention d'eau, la disponibilité en nutriments et les performances des cultures suivantes. Il est important de noter que ces résultats sont spécifiques à cette étude et peuvent varier en fonction des conditions locales, des pratiques de gestion du sol et des cultures choisies. Cependant, ils soulignent l'importance de considérer la diversification des cultures et les pratiques de travail du sol dans la promotion de la santé des sols et d'une agriculture durable.

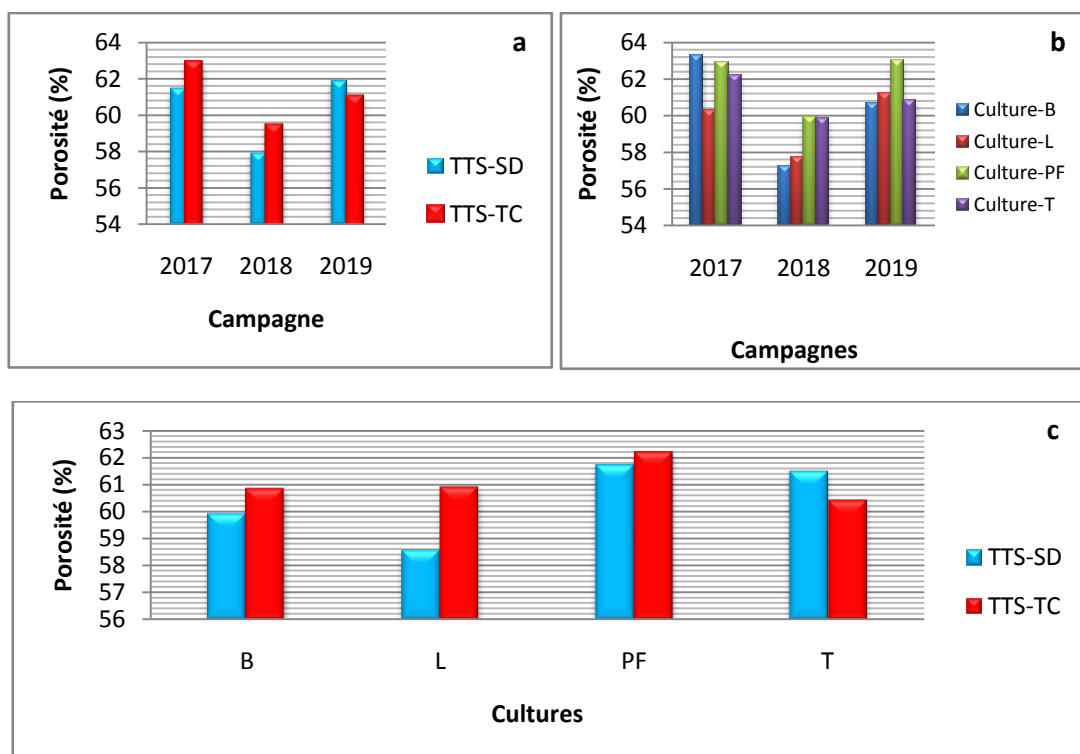


Figure 22: Porosité du sol en fonction du travail du sol et des cultures. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, B : blé, T : triticale, L : lentille, PF : pois fourrager).

Par profondeur, on constate que la porosité du sol diverge avec l'augmentation de la profondeur du sol ; elle est élevée en surface (0-5 cm) : 64,85 %, suivie par la deuxième profondeur (5-10 cm) : 60,54 % et faible dans la troisième profondeur (10-15 cm) : 56,93 %. Le TC a une porosité élevée sur les trois profondeurs comparée au SD (**Figure 23 "b"**). **Lipiec et al. (2006)** ont aboutis au même résultat. *Cela suggère que le travail du sol conventionnel favorise la création de pores plus grands et plus nombreux, ce qui augmente la porosité globale du sol. En revanche, le semis direct a tendance à maintenir une porosité plus faible, probablement en raison de la conservation de la structure du sol et de la présence de résidus de culture en surface. Cependant, il convient de noter que l'effet du système de travail du sol sur la porosité du sol peut varier en fonction des conditions spécifiques du site, telles que le type de sol, les pratiques de gestion et les cultures cultivées. Par conséquent, il est important de prendre en compte ces facteurs lors de la sélection du système de travail du sol le plus approprié.*

Cependant, lorsque nous avons comparé la porosité du sol entre les différentes profondeurs pour chaque culture, nous avons constaté que la culture du pois fourrager a enregistré la valeur la plus élevée sur toute la profondeur suivie par la culture de triticale, la culture de blé et enfin la culture de lentille qui a enregistré une porosité du sol faible sur les trois profondeurs (**Figure 23 partie "a"**). *Cette tendance peut être due à plusieurs facteurs. Tout d'abord, la couche supérieure du sol est généralement plus compacte en raison de l'accumulation de matière organique, de racines et de l'activité microbienne. Cela entraîne une diminution de la porosité du sol dans cette couche. De plus, les cultures ont différentes racines et systèmes racinaires. Certaines cultures ont des systèmes racinaires plus profonds,*

ce qui peut entraîner une meilleure aération et une plus grande porosité du sol dans les couches plus profondes du sol.

En conclusion, la porosité du sol varie en fonction de la culture et de la profondeur. La culture du pois fourrager présente généralement une porosité plus élevée, tandis que la lentille présente une porosité plus faible. De plus, la profondeur de 10-15 cm a tendance à avoir la plus faible porosité du sol dans toutes les cultures. Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte la porosité du sol dans la gestion agricole pour garantir des conditions de croissance optimales pour les cultures.

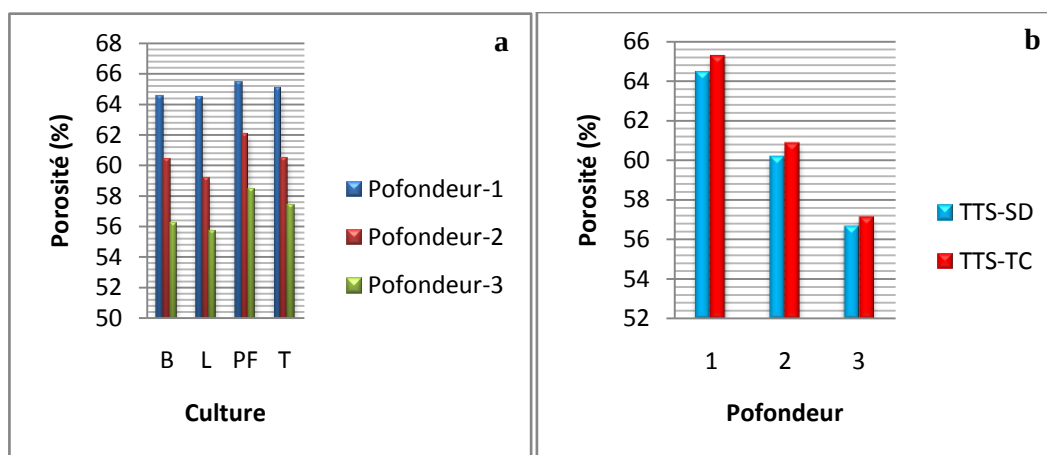


Figure 23: Porosité du sol en fonction de la profondeur et du travail du sol.

Tableau 05: Les carrés moyens de l'analyse de la variance des analyses physiques du sol étudié.

Source de variation	DDL	Da	Porosité	Rp
Années	2	0,17***	242,88***	80,05***
STS	1	0,02 ns	25,25 ns	413,56***
Clts	3	0,03***	47,55***	2,46*
Pro	2	0,8***	1134,45***	163,24***
STS*années	2	0,02*	32,13*	56,54***
STS*Clts	3	0,02*	26,14*	5,33***
STS*Pro	2	0,0004 ns	0,61 ns	6,42***
Années*Clts	6	0,01 ns	20,27 ns	1,94**
Campagne*Pro	4	0,01 ns	18,78	5,08***
Clts*Pro	6	0,003 ns	4,25 ns	1,05 ns
CV %	//	0,123	0,080	0,525
Ecart-type	//	0.13	4,84	2,42

Légende : STS : système de travail du sol, Clts : Cultures, Pro : profondeur, ns : effet non significatif, * : effet significatif, ** : effet hautement significatif, *** : effet très hautement significatif.

3.3. Paramètres chimiques

3.3.1. Le pH du sol

Les résultats statistiques suggèrent que la façon dont le sol est travaillé, la campagne agricole, le type de culture utilisé en rotation et leurs interactions ont des effets très hautement

significatif ($P < 0.001$) et significatif sur le pH du sol comme le montre le **tableau 6**. Cependant, la profondeur du sol n'a pas donné un d'effet significatif ($P > 0,05$) sur le pH.

Ces effets peuvent avoir un impact sur l'acidité ou l'alcalinité du sol, ce qui peut à son tour influencer la croissance des plantes. De plus, les différentes campagnes d'étude et les cultures utilisées peuvent également jouer un rôle dans la variation du pH du sol. Il est important de prendre en compte ces facteurs lors de la gestion agricole afin de maintenir un pH optimal pour une croissance optimale des cultures. Le pH du sol est un indicateur clé de la santé du sol et peut avoir un impact sur la disponibilité des nutriments pour les plantes.

Les résultats indiquent que la première campagne a enregistré une valeur de pH plus élevée (8,06) que les deux autres campagnes (7,74 et 7,68 respectivement). De plus, le travail conventionnel (TC) a enregistré une valeur de pH élevée que le semis direct (SD). Ce résultat corrobore le résultat de **Mina et al. (2008)** ; **Du et al. (2023)**. Ces variations de pH entre les campagnes et les systèmes de travail du sol peuvent être dues à plusieurs facteurs. Par exemple, les pratiques culturales, telles que l'utilisation d'amendements du sol ou de fertilisants, peuvent influencer le pH du sol. De plus, les résidus de cultures antérieures et leur décomposition peuvent également avoir un impact sur le pH du sol.

Les résultats illustrés par les histogrammes de la **figure 24 "c"**, montre qu'en technique de semis direct, les valeurs des pH diminuent progressivement d'année en année à partir de la première année jusqu'à la troisième année ; ces valeurs passent de 8,04 en 2016/17, à 7,62 en 2017/18, à 7,46 en 2018/19, cette baisse indique qu'en SD la décomposition du carbone organique est accumulée en surface du sol (**Obour et al., 2023**). Par ailleurs en labour conventionnel, la valeur de pH passe de 8,07 (en 2016/17), à 7,74 (en 2017/18) et à 8,01 en 2018/19.

Cela indique que la technique de semis direct favorise la conservation et séquestration du carbone du sol, ce qui est bénéfique pour sa fertilité et sa qualité. Cependant, il est important de noter que ces résultats sont spécifiques à l'étude mentionnée et peuvent varier en fonction des conditions du sol et des pratiques agricoles spécifiques à chaque région. Il est donc important de réaliser des études supplémentaires pour confirmer ces résultats et les appliquer à d'autres régions.

Par culture ou rotation culturale, les parcelles cultivées en pois fourrager et la lentille ont des valeurs faibles de pH (7,67 et 7,71) comparées à celles cultivées en triticales et en blé (7,92 et 8,00). Alors, le pH du sol des parcelles cultivées en blé et en triticales régresse au cours des trois années. Cette régression est expliquée par l'effet du précédent cultural, à savoir la culture de lentille et de pois fourrager (**Figure 24 "b"**). D'après **Page et al. (2020)**, dans les systèmes de culture à base de légumineuses, les baisses de pH sont avérées plus importantes dans le temps. Pour les cultures de lentille et pois fourrager, le pH du sol est faible essentiellement en deuxième campagne. Toutes les parcelles des cultures entrées en rotation ont enregistré des valeurs de pH du sol élevées en première campagne. Les pH du sol cultivées en blé, en pois fourrager et en triticales étaient plus élevées sous le travail conventionnel (**Figure 24 "c"**) par contre, les pH des parcelles de la culture de lentille étaient plus élevées en SD (7,71).

Cela suggère que le travail du sol conventionnel peut contribuer à augmenter le pH du sol, tandis que le semis direct peut maintenir des valeurs de pH du sol plus basses. Ces résultats sont cohérents avec d'autres études qui ont montré que les cultures de légumineuses peuvent diminuer le pH du sol en libérant des acides organiques lors de la fixation de l'azote atmosphérique. Ces acides organiques peuvent réduire le pH du sol et rendre les nutriments plus accessibles aux plantes.

En conclusion, les cultures de pois fourrager et de lentille ont des valeurs de pH du sol plus basses que les cultures de triticale et de blé. Le travail du sol conventionnel peut augmenter le pH du sol, tandis que le semis direct peut maintenir des valeurs de pH plus basses. Il est important de prendre en compte ces différences de pH du sol lors de la planification des rotations culturales et des méthodes de travail du sol, afin d'optimiser la santé des plantes et la disponibilité des nutriments.

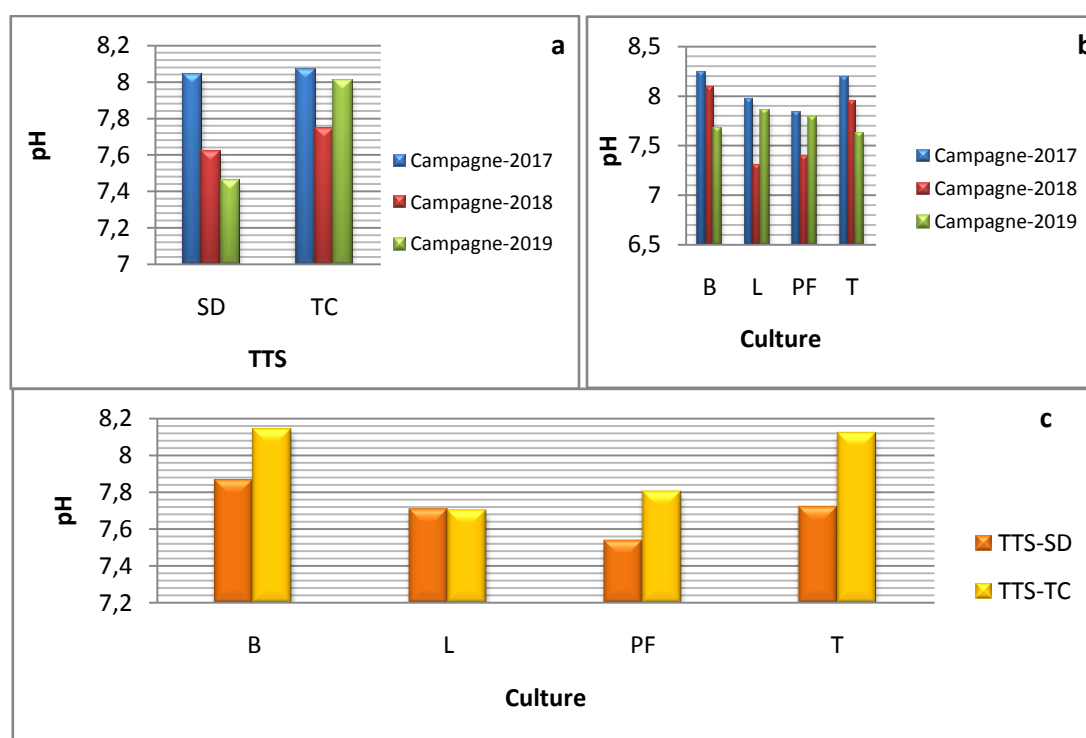


Figure 24 : pH du sol par travail du sol et par culture incluant en rotation. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, B : blé, L : lentille, PF : pois fourrager, T : triticale).

Par profondeur, le pH du sol été élevé en profondeur 2 (20-40 cm) par rapport à la profondeur 1 (0-20 cm) (**Figure 25 « a »**). D'autres études ont trouvé le même résultat (**Naorem et al., 2023**). Les combinaisons l'effet année et profondeur du sol ont montré des résultats variés ; le même pH en première campagne (2016/17), en faveur de la profondeur 1 en deuxième année et en faveur de profondeur 2 en troisième année. (**Figure 25 « b »**).

Les cultures de blé et de triticale ont des pH sol élevées en deuxième profondeur par contre, les cultures de lentille et de pois fourrager (légumineuses) ont des pH sol élevées en surface (**Figure 25 « c »**). Les parcelles conduites en TC ont des pH du sol élevées en surface tandis que, celles conduites en SD ont des pH du sol élevées en profondeur (**Figure 25 « d »**). **Saber & Mrabet (2002)** ont noté une baisse de pH de 0,2 unité entre le TC et SD dans la

couche supérieure du sol. Selon **Mrabet et al. (2012)**, la légère acidification du pH du sol à la surface sous SD peut augmenter la disponibilité des nutriments pour les cultures.

Ces résultats suggèrent que le pH du sol peut varier en fonction de la profondeur et du type de culture. En général, le sol sous jacent ont des valeurs de pH élevées qu'en surface. De plus, les cultures de blé et de triticale ont tendance à avoir des valeurs de pH élevées en profondeur, tandis que les cultures de lentille et de pois fourrager ont des valeurs de pH élevées en surface. Cela peut être dû à la libération d'acides organiques par les légumineuses, ce qui peut abaisser le pH du sol dans les couches supérieures.

En ce qui concerne les méthodes de travail du sol, les parcelles travaillées de manière conventionnelle ont tendance à avoir des valeurs de pH plus élevées en surface, tandis que les parcelles en semis direct ont des valeurs de pH plus élevées en profondeur. Cela pourrait être dû à la manière dont le travail du sol affecte la redistribution des nutriments et des substances

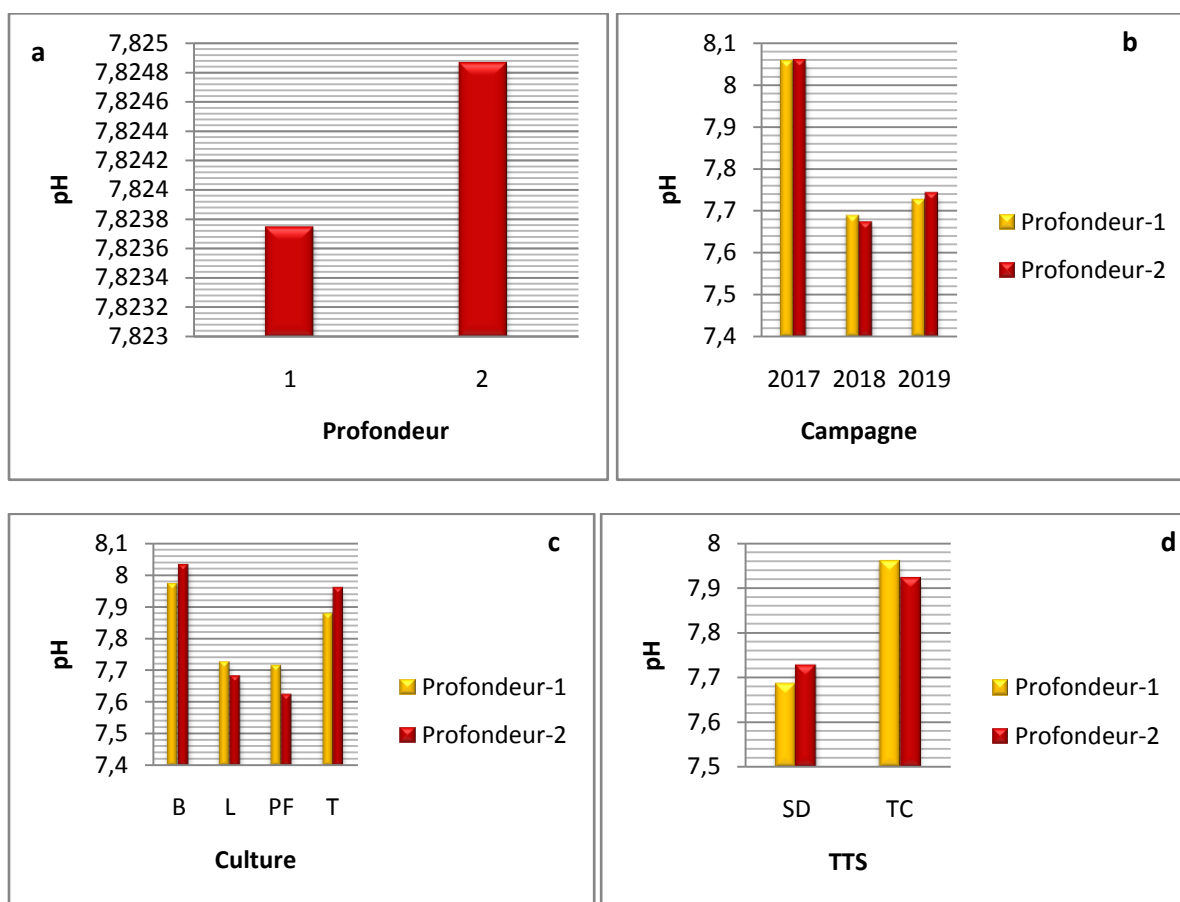


Figure 25 : pH du sol par profondeur (a), par campagne agricole (b), par culture (c) et par travail du sol (d). (B : blé, L : lentille, T : triticale, PF : pois fourrager, SD : semis direct, TC : travail conventionnel).

3.3.2. Conductivité électrique (CE)

Aucune différence significative n'est remarquée entre les deux modes de travail du sol et entre les deux profondeurs de prélèvement ($P > 0,05$) concernant la CE. Cependant une différence très hautement significative ($P < 0,001$) est observée pour l'effet campagne et le type de culture entrée en rotation. En ce qui concerne les effets de l'interaction des campagnes

d'étude avec le type de culture et avec les profondeurs de prélèvement est très hautement significative ($P < 0,001$). L'interaction des modes de travail du sol x campagne a un effet significatif ($P < 0,05$) sur la CE (**Tableau 06**). Cela peut indiquer que l'effet de travail du sol sur la CE du sol peut varier en fonction de la campagne d'étude.

La CE augmente de la première année (0,17 ms/ cm) à la troisième année (0,22 ms/ cm) (**Figure 26 « a »**). En parallèle, le semis direct a permis une augmentation de CE de la première campagne (0,17 ms/ cm) à la deuxième campagne (0,23 ms/ cm), puis cette valeur de CE diminue en troisième campagne (0,21 ms/ cm). Dans un premier temps, il est remarqué que la première campagne présente une faible CE par rapport aux deux campagnes suivantes. Cela peut être dû à différents facteurs tels que les conditions climatiques, les pratiques culturales ou encore les caractéristiques initiales du sol. Il serait intéressant d'analyser ces facteurs pour comprendre cette variation de la CE entre les campagnes.

En ce qui concerne l'effet de la technique de travail du sol, il est constaté que la CE est similaire entre le TC et SD. Cela suggère que les techniques de travail du sol n'ont pas eu d'effet significatif sur la CE du sol. Cependant, il est important de noter que d'autres études ont pu trouver des différences entre la CE dans le SD et TC (Naorem et al. 2023). *La variation de la CE entre ces deux systèmes peut dépendre de nombreux facteurs tels que les pratiques de gestion du sol, le type de culture ou encore les caractéristiques initiales du sol.*

En ce qui concerne l'évolution de la CE au fil des campagnes, il est intéressant de noter que dans le TC, la CE augmente de la première à la troisième campagne. Cela peut s'expliquer par une accumulation progressive de sels dans le sol au fur et à mesure des cycles de culture. D'autre part, dans le SD, la CE augmente de la première à la deuxième campagne, puis diminue légèrement en troisième campagne. *Cette variation peut être due à des facteurs tels que les pratiques de fertilisation du sol* (Figure 26 « a »).

Il est important de prendre en compte la conductivité électrique du sol car elle peut avoir un impact sur la disponibilité des nutriments et la santé des plantes. Une CE élevée peut indiquer une salinité du sol, ce qui peut entraîner des problèmes de croissance des plantes. Par conséquent, il est essentiel de surveiller et de gérer la CE du sol pour optimiser la fertilité du sol et la santé des cultures.

L'analyse des moyennes montrent que les cultures de pois fourrager et de lentille ont une conductivité électrique (CE) élevée (0,21 ms/ cm) que celles de triticale et de blé (0,20 ms/ cm et 0,19 ms/ cm respectivement). La CE est plus élevée dans les parcelles de légumineuses en deuxième campagne, tandis que dans les parcelles de céréales, la CE augmente progressivement de la première à la troisième campagne (**Figure 26 « b »**).

En première campagne, les parcelles de pois fourrager ont une CE plus élevée (0,18 ms/ cm) par rapport aux cultures de blé, de lentille et de triticale (0,16 ms/ cm). En deuxième campagne, les parcelles de pois fourrager et de lentille présentent une CE plus élevée (0,25 ms/ cm) que les parcelles de triticale et de blé (0,21 ms/ cm et 0,18 ms/ cm respectivement). En troisième campagne, les parcelles de blé et de lentille ont une CE plus élevée (0,23 ms/ cm et 0,22 ms/ cm par ordre), suivies des parcelles de pois fourrager et de triticale (0,21 ms/ cm).

Les résultats montrent que les cultures de blé et de lentille en TC ont une CE plus élevée par rapport à celles cultivées en SD. En revanche, pour le triticale et le pois fourrager, les parcelles en SD ont une CE plus élevée que celles en TC (**Figure 26 « c »**).

Ces variations de la CE en fonction des cultures et des méthodes de travail du sol peuvent être dues à différents facteurs tels que la composition chimique du sol, et les interactions entre les cultures et le sol. Il est important de prendre en compte ces variations pour optimiser la gestion de la salinité du sol et assurer une croissance optimale des cultures.

En conclusion, les cultures de pois fourrager et de lentille ont généralement une CE plus élevée que les cultures de triticale et de blé. La CE peut varier en fonction des campagnes d'étude, des types de culture et des méthodes de travail du sol. La prise en compte de ces variations est essentielle pour optimiser la fertilité et la santé du sol dans les systèmes de rotation des cultures.

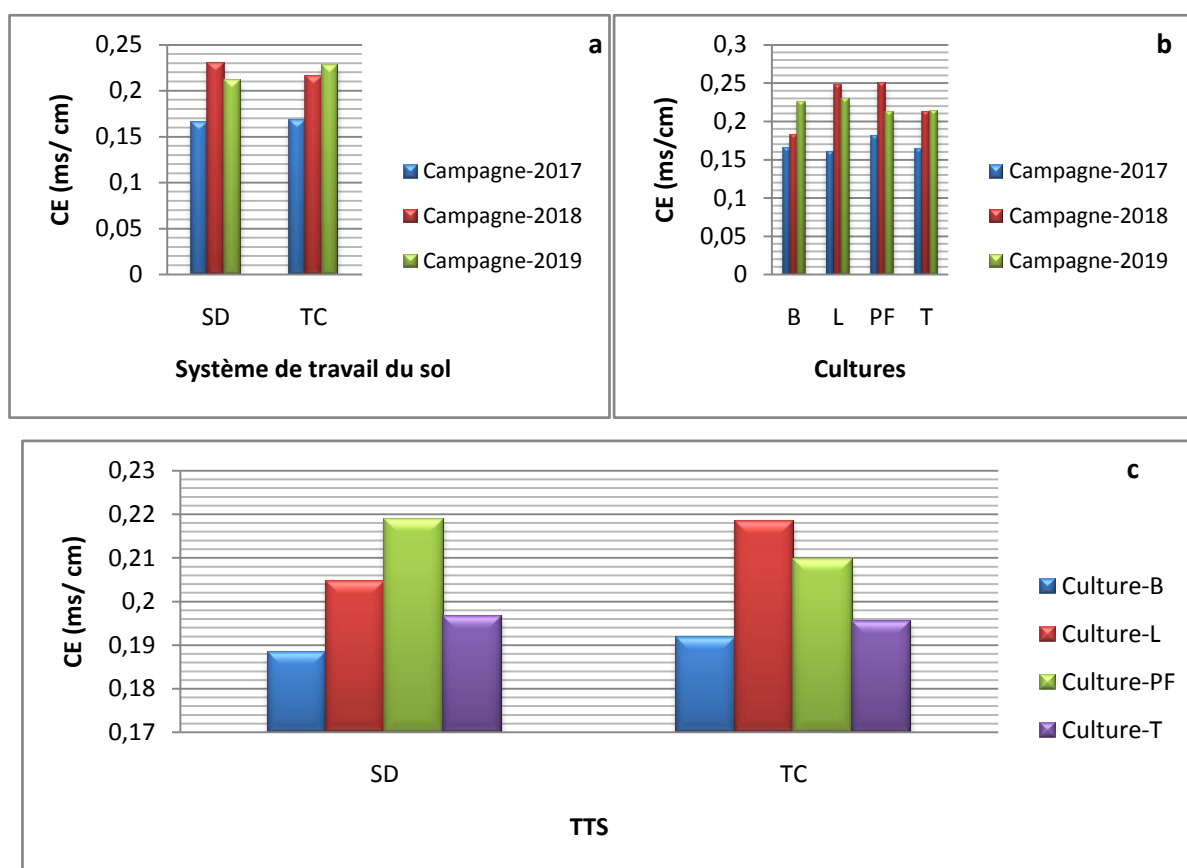


Figure 26 : Valeurs de la CE par dans les deux systèmes de travail du sol (a) et dans les quatre cultures (b) durant les trois campagnes. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, B : blé, T : triticale, L : lentille, PF : pois fourrager).

Dans la **figure 27 "a"**, on peut observer que la moyenne de la CE est légèrement plus élevée en profondeur 2 (0,203 ms/ cm) par rapport à la profondeur 1 (0,202 ms/ cm). En surface (profondeur 1), la CE continue d'augmenter dès la première année. En revanche, en profondeur 2, la CE est plus élevée en deuxième année, comme le montre la **figure 27 "b"**.

La **figure 27 "c"** révèle que le SD a une valeur élevée de CE sur la profondeur 1 (0,2036 ms/ cm). Par contre, en TC la CE est élevée en profondeur 2 (0,2061 ms/ cm).

Egalement, la CE en culture de blé sur les deux profondeurs est la même. Pour la culture de lentille la CE est élevée en surface tandis que la culture de triticale et pois fourrager ont une valeur élevée en CE en profondeur 2 (20-40 cm) (**Figure 27 "d"**).

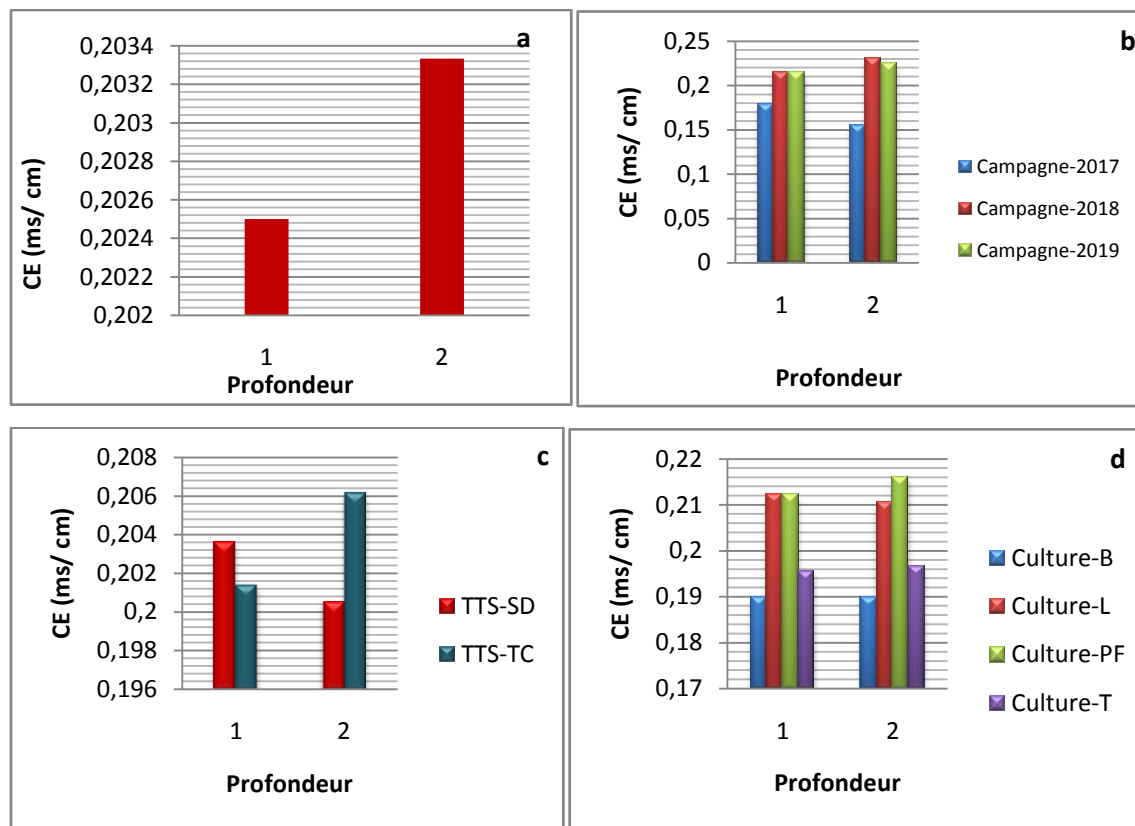


Figure 27 : CE par profondeur "a", en fonction de la campagne agricole "b", en fonction du travail du sol "c" et de la culture "d". (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, B : blé, T : triticale, L : lentille, PF : pois fourrager).

3.3.3. Teneur en CaCO_3 total

Selon ANOVA, le travail du sol, la campagne et le type de culture ainsi que l'interaction entre les campagnes et les cultures ont un effet très hautement significatif sur le taux de calcaire total ($P < 0,001$). De plus, l'analyse de la variance montre un effet significatif de la profondeur, de l'interaction entre le système de travail du sol et la campagne agricole ainsi que de l'interaction entre le système de travail du sol et les cultures, avec une valeur de ($P < 0,05$) (**Tableau 06**).

Les moyennes des taux de calcaire total montrent que la deuxième campagne a enregistré le taux le plus élevé avec 16,93 %, suivi de la troisième campagne (15,68 %) et de la première campagne (15,03 %). En ce qui concerne les systèmes de travail du sol, le travail conventionnel présente un taux de calcaire total plus élevé que le semis direct (**Figure 28 "a"**). Selon **Toth et al. (2024)**, le mélange de couche calcaire plus profonde et l'érosion extrêmement élevé sous le système conventionnel ont pu provoquer des concentrations élevées de carbonate. Les deux systèmes de travail du sol ont enregistré des taux élevés de calcaire en deuxième année d'étude (2017/18), avec des valeurs de 17,68 % pour le TC et de 16,17 % pour le SD. En revanche, un taux plus faible a été enregistré en première campagne

pour les deux systèmes de travail du sol, avec 15,11 % pour le TC et 14,94 % pour le SD (Figure 28 "a"). En ce qui concerne les différentes cultures, les parcelles de pois fourrager présentent un taux de calcaire total plus élevé (16,58 %) par rapport aux cultures de blé (16,18 %), de lentille (15,86 %) et de triticale (14,89 %). Les parcelles de blé, de triticale et de lentille ont enregistré des taux de calcaire élevés en deuxième campagne (16,96 %, 16,9 % et 17,46 % respectivement), tandis que les parcelles de pois fourrager ont enregistré un taux plus élevé en troisième campagne (16,79 %), (Figure 28 "b"). De plus, les parcelles conduites en travail conventionnel de blé, triticale et lentille présentent un taux de calcaire plus élevé par rapport aux parcelles conduites en semis direct. Cependant, les parcelles de pois fourrager conduites en semis direct ont un taux légèrement plus élevé que celles conduites en travail conventionnel comme le montre la figure 28 "c".

En ce qui concerne la profondeur, la profondeur 20-40 cm présente un taux de calcaire total plus élevé avec une moyenne de 16,09 % par rapport à la profondeur 0-20 cm qui présente un taux de 15,66 % (Figure 29 "a"). De plus, les deux profondeurs ont enregistré des taux élevés de calcaire pendant la deuxième campagne, tandis que le taux le plus faible a été enregistré pendant la première campagne (Figure 29 « b »). Les deux techniques (TC et SD) présentent un taux de calcaire total plus élevé dans la profondeur 20-40 cm (Figure 29 « c »). Le travail conventionnel a présenté un taux de calcaire total plus élevé que le semis direct, ce qui est en accord avec les résultats de Toth et al. (2024). Les parcelles des quatre cultures ont un taux de calcaire total élevé en deuxième profondeur. Sur les deux profondeurs, les parcelles de triticale ont un taux faible de calcaire total contre les parcelles de pois fourrager qui ont un taux élevé de calcaire total (Figure 29 « d »).

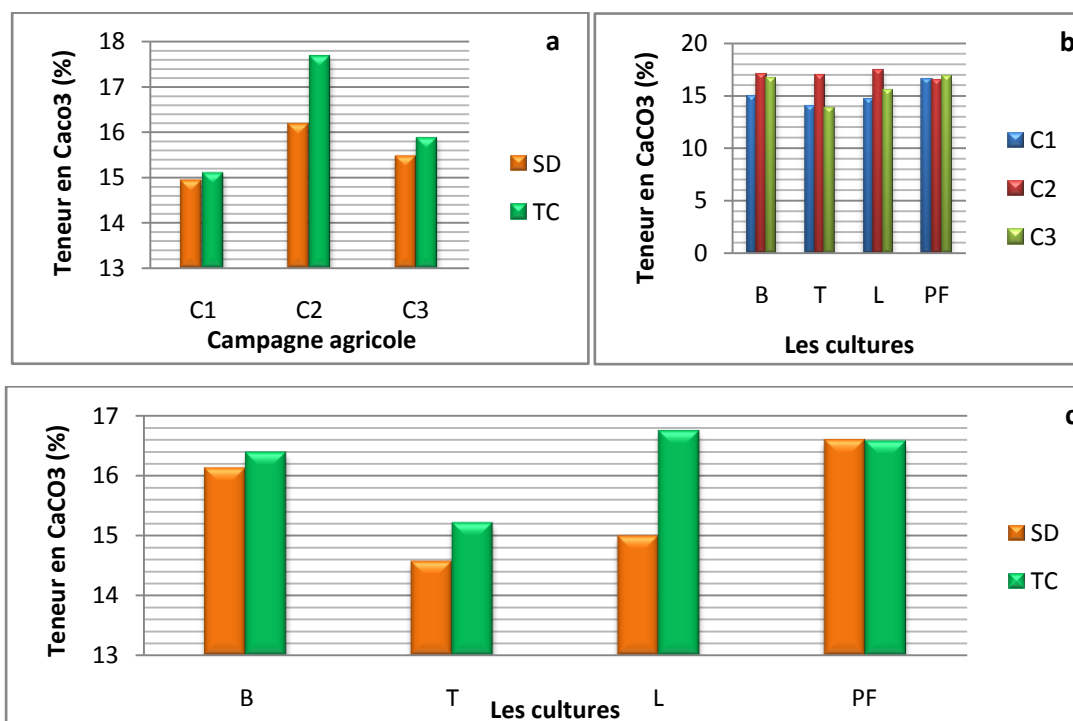


Figure 28: Taux de calcaire total par campagne agricole "a", en fonction des techniques de travail du sol, par culture en fonction de la campagne agricole "b", et en fonction des techniques de travail du sol "c". (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, B : blé, T : triticale, L : lentille, PF : pois fourrager, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19).

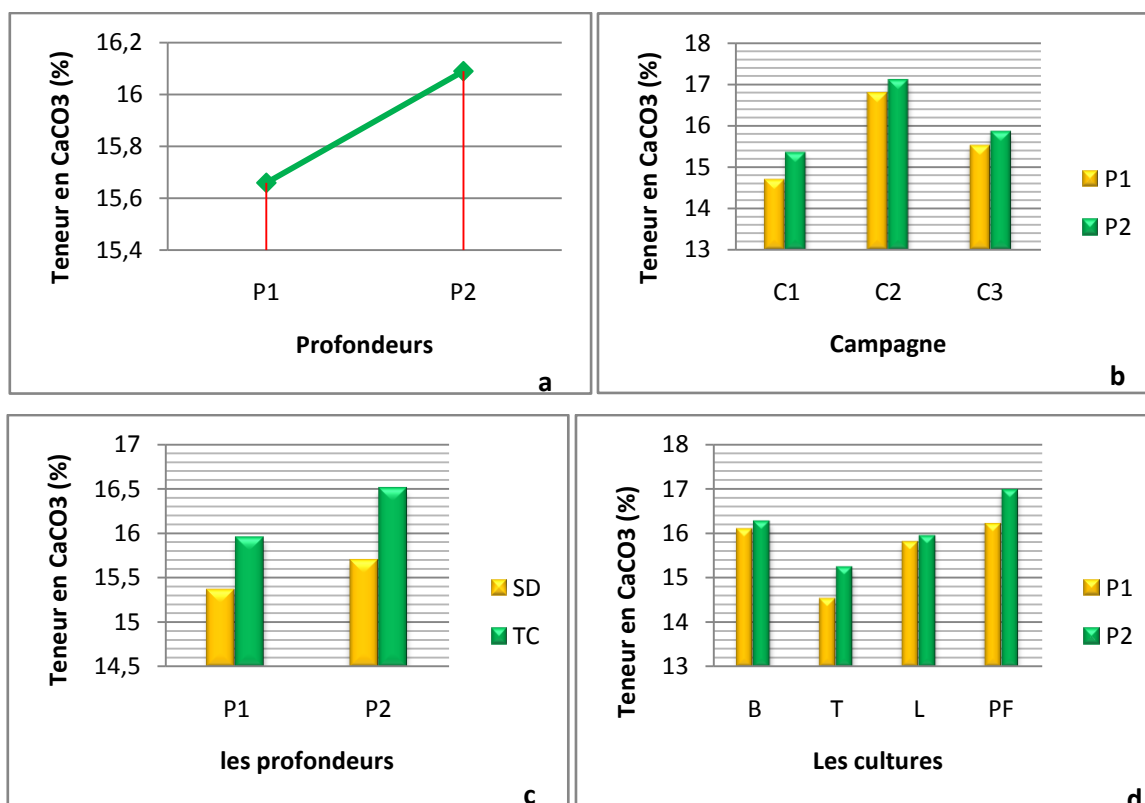


Figure 29 : Taux de calcaire total par profondeur "a", par campagnes agricole "b", par technique de travail du sol "c" et par culture "d". (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, B : blé, T : triticales, L : lentille, PF : pois fourrager, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, P1 : profondeur 0-20 cm, P2 : profondeur 20-40 cm).

3.3.4. Evolution de la matière organique (MO)

Les analyses de la variance ont révélé un effet très significatif de l'année sur le taux de matière organique ($P < 0,001$) (**Tableau 06**). La comparaison des moyennes montre que le taux de MO a augmenté au fil du temps. En effet, le taux de MO était supérieur de 30,65 % en deuxième année agricole par rapport à la première année, et il était supérieur de 40,74 % en troisième campagne par rapport à la deuxième campagne. De plus, le taux de matière organique était supérieur de 83,87 % en troisième campagne par rapport à la première campagne (**Figure 30 « a »**).

Le type de culture en rotation ainsi que leur interaction avec la campagne ont un effet très hautement significatif sur le taux de la MO ($P < 0,001$) (**Tableau 06**). La comparaison des moyennes entre les cultures montre que les parcelles de lentille ont enregistré le taux le plus élevé de MO (1,91 %), suivies par les parcelles de triticales (1,89 %), suivies par les parcelles de pois fourrager (1,68 %) et enfin les parcelles de blé (1,36 %).

De plus, les parcelles des quatre cultures ont présenté une régression du taux de MO de la première à la troisième campagne agricole (**Figure 30 « c »**). En première campagne, les parcelles de lentille ont enregistré un taux de MO élevé (1,7 %) par rapport aux autres cultures. En deuxième et troisième campagne agricole, les parcelles de triticales ont affiché une moyenne élevée (1,91 % et 2,4 % respectivement) (**Figure 30 « c »**). Cependant, Il est important de noter que l'augmentation du taux de MO au fil du temps peut être attribuée à la

rotation des cultures. Selon **Maiga et al. (2019)**, la rotation des cultures sur quatre ans peut améliorer le stockage du carbone organique dans le sol. De plus, la présence de culture produisant moins de résidus comme le pois, contribuer à une réduction du carbone organique dans le sol (**Fu et al., 2017**). *Ces résultats soulignent l'importance de la gestion des rotations des cultures pour maintenir et augmenter la teneur en MO dans les sols agricoles.*

Ces résultats suggèrent que l'année a un effet très significatif sur le taux de matière organique, avec une augmentation observée au fil du temps. De plus, le type de culture en rotation a également un effet très significatif, avec des taux de matière organique variant selon les cultures. Les parcelles de lentille ont enregistré les taux les plus élevés de matière organique, suivies des parcelles de triticales, de pois fourrager et enfin de blé. Ces résultats soulignent l'importance de la rotation des cultures et de la sélection des cultures pour maintenir un niveau élevé de matière organique dans les sols agricoles.

Le taux de la MO a été varié de manière très hautement significative ($P < 0,001$) sous l'effet de la technique de travail du sol (**Tableau 06**). Les parcelles conduites en SD présentent un taux de MO plus élevé (1,84 %) que celles conduites en TC (1,58 %). Cette observation est en accord avec les résultats précédents obtenus par **Mekhlouf et al. (2013)**, qui ont également constaté que le SD a un taux de MO plus élevé que le TC du sol. Du coup, la conservation des résidus sur la surface dans la technique de semis direct favorise l'accumulation de la MO au fil du temps. Cela suggère que la conservation des résidus sur la surface favorise l'accumulation de matière organique dans le sol au fil du temps. Ce résultat est en accord avec plusieurs études antérieures qui ont montré que la présence de résidus de culture sur la surface du sol favorise une accumulation progressive de la MO (**Hao et al., 2001**). La **figure 30 "b"** montre que le taux de la MO augmente de la première campagne à la troisième campagne pour les deux techniques de travail du sol. Entre la première et la deuxième campagne, le taux d'augmentation de la MO en SD est de 24,44 %, tandis qu'en TC il est de 38,94 %. Entre la deuxième et la troisième campagne, le taux d'augmentation en SD est de 48,81 %, tandis qu'en TC il est de 30,57 %. Cela signifie que la MO augmente plus rapidement avec la technique de SD. En outre, les chiffres indiquent que la technique de SD entraîne un taux de MO supérieur à celui de TC. En première campagne, le taux de MO en SD est de 19,47 % supérieur à celui de TC. En deuxième campagne, il est de 7,01 % supérieur, et en troisième campagne, il est de 21,95 % supérieur. Effectivement, la perturbation du sol par le labour provoque une diminution de la matière organique du sol (**Saber & Mrabet, 2002**). Cela est dû au fait que le labour expose la matière organique au contact avec l'air, favorisant son oxydation et sa minéralisation rapide par les microorganismes du sol (**Juhos et al., 2023**). Le carbone organique du sol augmente de façon plus élevée en SD qu'en TC, et la différence était plu nette après la troisième année de gestion du sol (**Sombrero & Benito, 2010**).

Ces résultats suggèrent que la technique de SD est plus efficace que celle de TC pour augmenter la matière organique du sol. Cela peut être dû au fait que la SD permet de conserver les résidus de culture à la surface du sol, ce qui favorise la décomposition et la formation de matière organique.

En comparaison, la technique de Semis Direct (SD) permet de conserver les résidus de culture à la surface du sol, créant un couvert végétal qui protège la matière organique

de l'oxydation et favorise sa décomposition plus lente. Par conséquent, le carbone organique du sol augmente de manière plus élevée en SD par rapport à la technique de Travail du Sol Conventionnel (TC), où le labour expose davantage la matière organique à l'oxydation. De plus, il a été observé que la différence entre l'augmentation de carbone organique en SD et en TC était plus nette après la troisième année de gestion du sol. Cela suggère que ce sont les effets cumulatifs de la conservation des résidus de culture et de la diminution de la perturbation du sol à long terme qui conduisent à une augmentation plus importante de la matière organique en SD.

En conclusion, les travaux de recherche ont montré que la perturbation du sol par le labour conduit à une diminution de la matière organique en raison de l'oxydation et de la minéralisation accélérée. En revanche, la technique de Semis Direct permet de conserver les résidus de culture à la surface du sol, protégeant ainsi la matière organique de l'oxydation et favorisant une augmentation plus importante du carbone organique du sol.

Les parcelles de l'ensemble de cultures ont un taux élevé de MO en technique de semis directe (**Figure 30 "d"**), cette technologie de travail du sol a tendance à conserver les résidus de culture à la surface du sol, où leur interaction avec les microorganismes du sol réduite permettant donc une décomposition moins progressive de la MO du sol (**Papini et al., 2007**). Les parcelles de triticales ont un taux de MO élevé en SD (2,08 %) suivies par les parcelles de lentille, pois fourrager et blé avec des moyennes de 2,04 %, 1,72 % et 1,53 % respectivement. Par contre, en technique conventionnelle, les parcelles de lentille ont un taux de MO élevé (1,79 %) par rapport aux parcelles de triticales (1,71 %), de pois fourrager (1,63 %) et enfin de blé (1,2 %) (**Figure 30 "d"**). La différence de la teneur en MO entre les cultures est due aux effets différentiels de la rotation des cultures sur le carbone organique qui reflètent l'importance des caractères morphologiques et du type de résidus sur l'accumulation de la MO (**Mrabet et al., 2001**). Selon **Blanco-Canqui et al. (2013)**, la culture de triticales et de lentille ont augmenté le réservoir du carbone organique en moyenne de 1,2 fois plus par rapport à la jachère.

La profondeur de prélèvement a un effet significatif sur la MO ($P < 0,05$). L'interaction de la profondeur du sol et le travail du sol a un effet hautement significatif ($P < 0,01$) sur le taux de la MO (**Tableau 06**). En général, on observe une diminution du taux de MO avec la profondeur, car elle est généralement concentrée dans les couches supérieures du sol (1,76 %) qu'en deuxième profondeur 1,66 % (**Figure 31 « a »**). Le taux de matière organique a augmenté au fil des campagnes d'études dans les deux profondeurs du sol. De plus, la première profondeur du sol présente un taux de matière organique plus élevé par rapport à la deuxième profondeur lors des trois campagnes d'études (**Figure 31 « b »**). Cette variation dans la répartition de la matière organique peut avoir un impact sur les processus biologiques et physiques du sol, ainsi que sur les propriétés du sol, telles que la capacité de rétention d'eau et d'éléments nutritifs.

En SD, la MO est élevée en surface du sol (2,07 %) par rapport à la deuxième profondeur (1,62 %). Elle diminue en fonction de la profondeur en SD (**Barut & Clik, 2017**). A l'inverse en TC, le taux de la MO est élevé en profondeur 2 (1,70 %) comparée à ce de la profondeur 1 (0-20 cm), 1,46 %, (**Figure 31 « c »**). A la profondeur de 20-40 cm, le TC avait

une teneur de MO élevée que le SD (Jemai et al., 2013). Benniou et al. (2014) ont constaté que la teneur en MO dans les sols labourés est élevée en profondeur 20-40 cm avec un pourcentage de 2,77 % comparativement à celui de la première profondeur 0-20 cm avec un pourcentage de 2,36 %, par ce que le travail conventionnel du sol favorise l'enfouissement de la MO en profondeur et accélère la minéralisation de la MO en surface. Comparer au TC, le maintien des résidus de culture à la surface du sol en SD a entraîné une augmentation de la MO à la surface, et pas aux profondeurs inférieures (Havlin et al., 1990; Benniou, 2012), ainsi on peut dire qu'il y a une stratification du carbone organique dans les horizons de surface sans aucun épuisement à l'horizon plus profond par rapport au TC (Mrabet et al., 2001). La figure 30 « d » a montré que les parcelles des cultures de blé, triticale et pois fourrager ont un taux de MO élevé en premiers centimètres par contre, les parcelles de lentille ont un taux de MO élevé en deuxième profondeur. La comparaison des moyennes du taux de MO des deux profondeurs entre les cultures a montré que les parcelles de triticale ont enregistré un taux de MO élevé sur les premiers centimètres (0-20 cm), tandis que les parcelles de lentille ont enregistré un taux de MO élevé sur la deuxième profondeur (20-40 cm).

En conclusion, les résultats de cette étude montrent une augmentation du taux de matière organique du sol au cours des campagnes d'études, ce qui est positif pour la fertilité du sol. Cependant, il convient de continuer à mener des recherches pour comprendre les facteurs qui influencent ces variations de la matière organique du sol et comment les optimiser pour améliorer la productivité agricole et la durabilité des systèmes de culture.

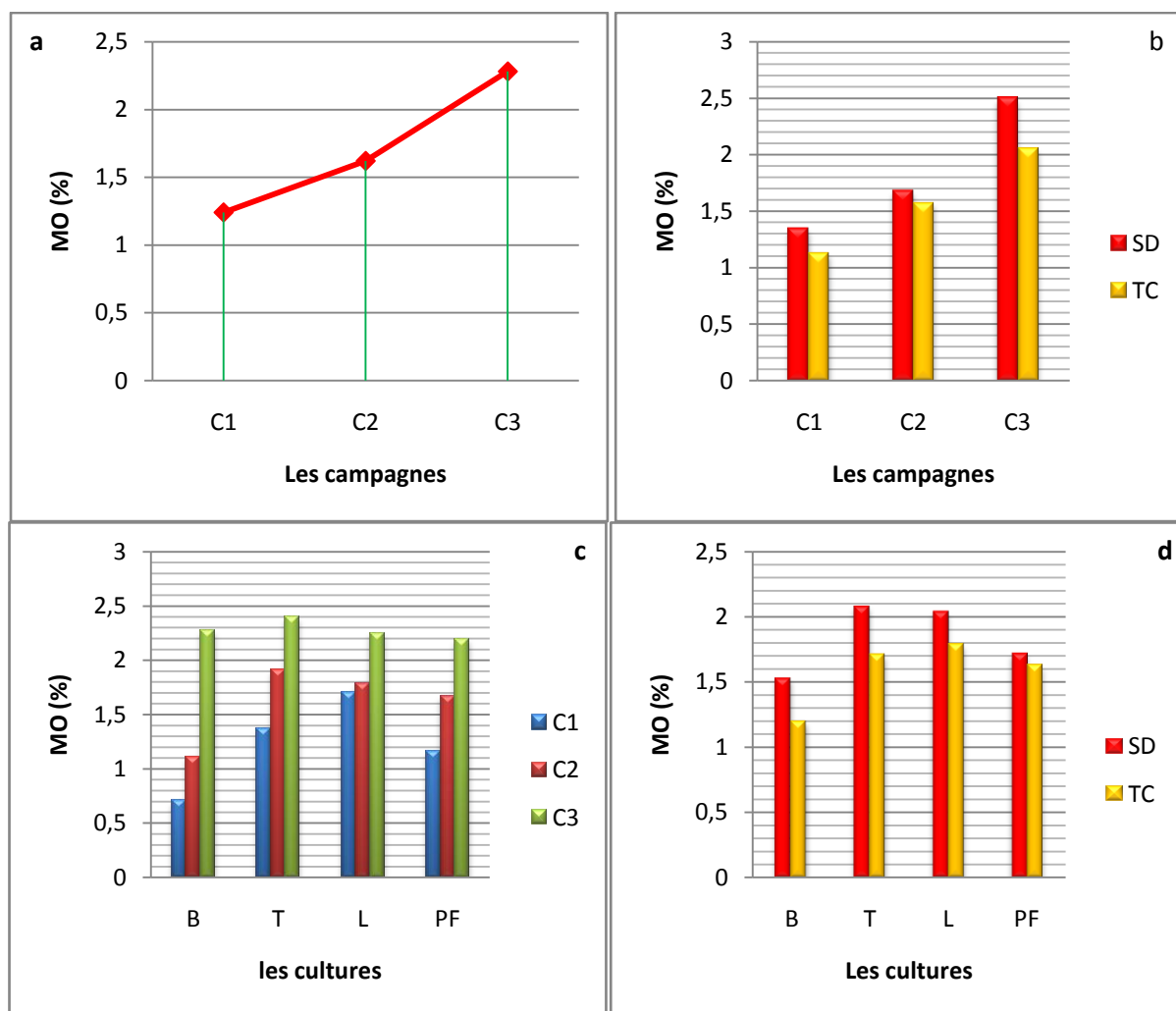


Figure 30 : Matière organique par campagne agricole « a », type de travail du sol « b », et par culture « c et d ». (MO : matière organique, C1 : campagne 2016/17, C2 : 2017/18, C3 : 2017/18, SD : semis direct, TC : travail conventionnel, B : blé, T : triticales, L : lentille, PF : pois fourrager).

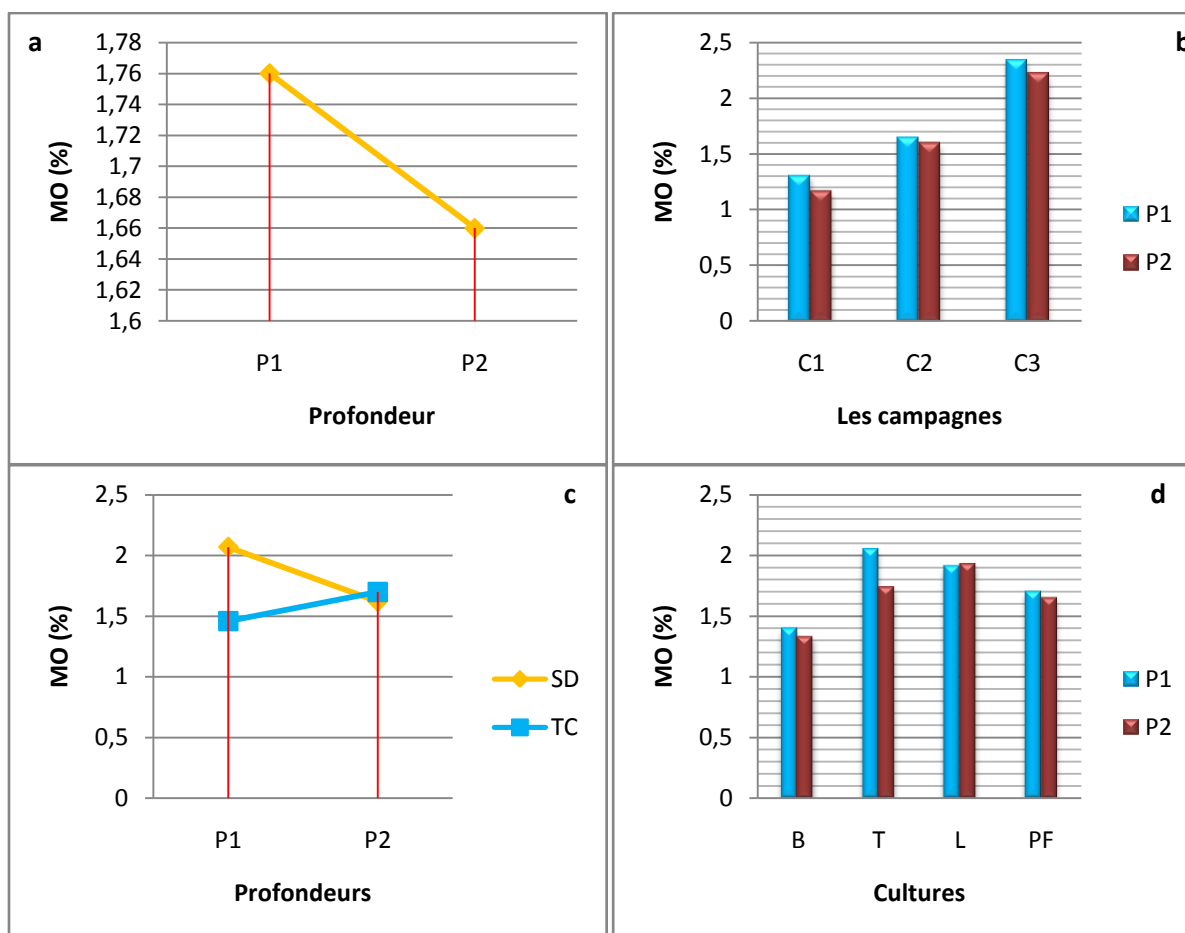


Figure 31: Teneur en matière organique du sol par profondeur « a », par campagne « b », par technologie de travail du sol « c » et par culture « d ». (MO : matière organique, P1 : profondeur 0-20 cm, P2 : profondeur 20-40 cm, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, SD : semis direct, TC : travail conventionnel, B : blé, T : triticales, L : lentille, PF : pois fourrager).

3.3.5. Azote total (N)

Les résultats de l'analyse de la variance suggèrent que la teneur en azote total a été très hautement influencée (THS) ($P < 0,001$) par les facteurs étudiés, à savoir l'année agricole, la technique de travail du sol et le type de culture en rotation. De plus, il existe une interaction complexe entre ces facteurs, indiquant que l'effet d'une campagne agricole (année) donnée sur la teneur en azote total peut varier en fonction du type de culture en rotation ($P < 0,001$) (Tableau 06).

Les résultats présentés dans la **figure 32 "a"** indiquent une augmentation significative de la teneur en azote total du sol au fil des années. En première année (2016/17), la teneur en azote total était de 0,15%, puis elle est passée à 0,17% en deuxième année, montrant une augmentation de 13,33%. Cette tendance à la hausse s'est poursuivie en troisième campagne (2018/19), où la teneur en azote total a atteint 0,19%, soit une augmentation de 11,77% par rapport à la campagne précédente (2017/18). Cette augmentation de la concentration en azote du sol peut être attribuée à la succession des cultures. En effet, la rotation des cultures entraîne une augmentation de l'apport de différents systèmes racinaires dans le sol, ce qui peut contribuer à une augmentation de la teneur en azote total. Ces résultats sont cohérents avec les

travaux réalisés par **Maiga et al. (2019)**, qui ont également observé une augmentation de la teneur en azote total du sol avec la succession des cultures.

Par technique culturale, le travail du sol sans labour (SD) favorise l'accumulation d'azote dans le sol par rapport au travail conventionnel (TC). En première année de culture, la teneur en azote est supérieure de 14,29% en SD par rapport au TC. En deuxième année, cette différence est de 6,25% et en troisième année, elle est de 11,11% (**figure 32 « b »**). Cette augmentation progressive de la teneur en azote dans les sols sous SD peut être attribuée à une meilleure conservation des résidus de culture et à une meilleure activité des microorganismes dans le sol. Ces résultats soutiennent donc l'idée que le travail du sol sans labour peut contribuer à améliorer la fertilité des sols en favorisant l'accumulation d'azote (**Smettem et al., 1992**). En outre, les niveaux élevés de l'azote total en SD sont attribués au compactage du sol, ce qui limitait le mouvement d'eau et entraîne une diminution des pertes de N par lessivage (**Yuan et al., 2023**). Dans le cas du labour conventionnel, le faible niveau d'azote est due à la perte d'azote qui est causé par lixiviation des nitrates (**Mina et al., 2008**). Durant les trois campagnes agricoles, les parcelles des légumineuses (lentille et pois fourrager) ont une teneur en azote total élevée comparé aux parcelles des graminées (blé et triticale), en raison de l'activité de fixation biologique de l'azote atmosphérique chez légumineuses. En moyenne générale, les parcelles de lentille ont une teneur en N supérieur (0,22 %) aux parcelles du pois fourrager (0,19 %), de blé (0,14 %) et de triticale (0,13 %) (**Figure 32 "c"**). Les parcelles des quatre cultures ont une teneur en N_t un peu élevée en SD par rapport au TC dont les parcelles des légumineuses (lentille et pois fourrager) ont une teneur en N_t dans les deux systèmes de travail du sol (SD et TC) comparativement aux parcelles du blé et triticale (**Figure 32 "d"**). Les légumineuses produisent des résidus de culture à forte teneur en N ce qui contribuait à l'augmentation de l'azote du sol (**Hao et al., 2001**) ainsi, les résidus des légumineuses fournissent plus d'azote sous SD que sous TC (**Karbin et al., 2018**).

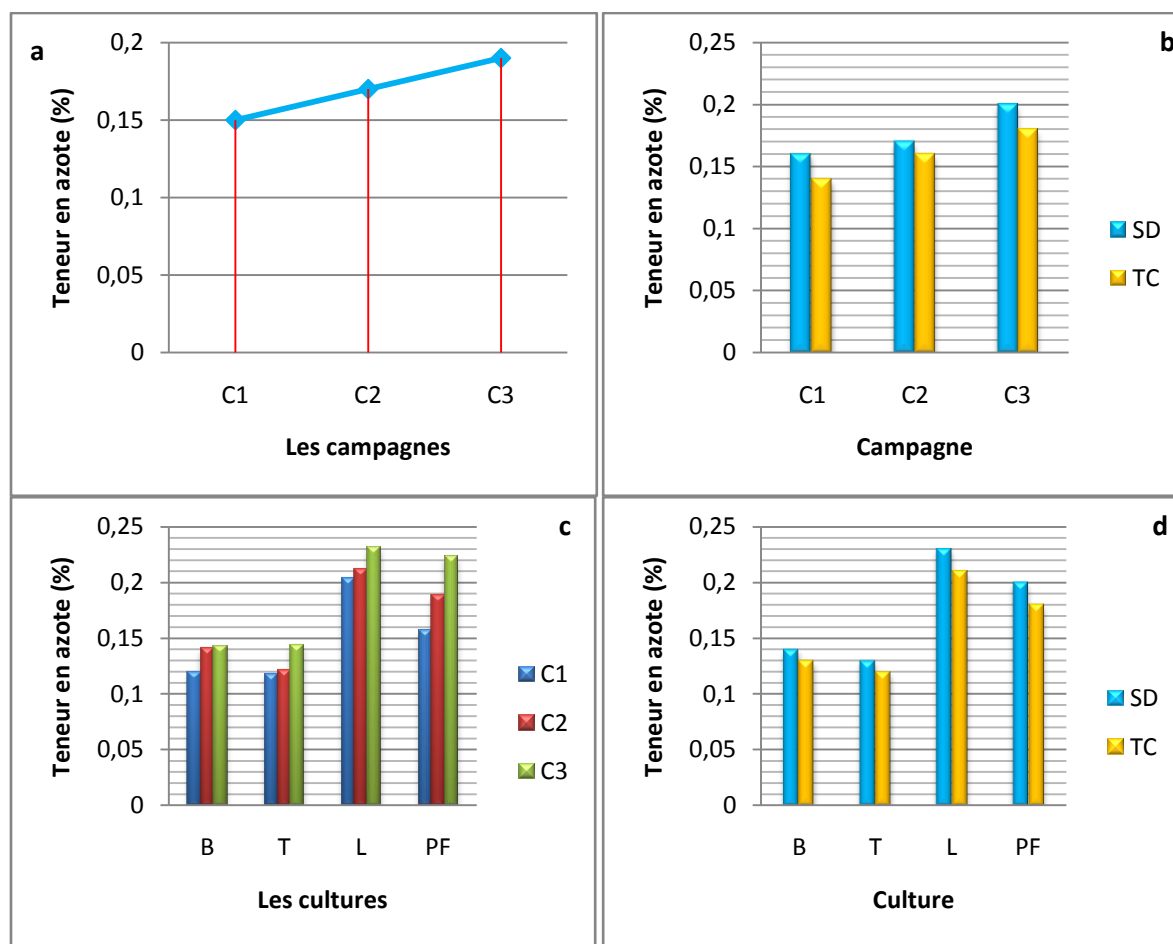


Figure 32 : Teneur en azote total par campagne agricole "a", par techniques de travail du sol "b" et par culture "c et d". (C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, SD : semis direct, TC : travail conventionnel, B : blé, T : triticales, L : lentille, PF : pois fourrager).

Cependant, la profondeur du sol n'a aucun effet significatif sur l'azote ($P > 0,05$). Par contre, l'effet de l'interaction travail du sol et profondeur sur la teneur en azote est très hautement significatif ($P < 0,001$) (**Tableau 06**). La profondeur 0-20 cm a une teneur un peu plus élevée (0,168 %) par rapport à la deuxième profondeur (20-40 cm) avec une moyenne de 0,165 % (**Figure 33 « a »**).

Durant les deux premières campagnes (2016/17 et 2017/18), la teneur en azote est élevée en surface (profondeur 0-20 cm) : 0,15 % et 0,168 % respectivement. Cependant, la troisième campagne (2018/19), a une teneur en azote semblable entre les deux profondeurs (0,185 %) (**Figure 33 "c"**). Alors, les histogrammes de la figure 33 "b" montrent que le SD a une teneur en azote supérieure que celle du TC sur les deux profondeurs ; où le SD a enregistré une teneur élevée en surface (0-20 cm) : 0,179 %, tandis que le TC a enregistré une teneur en azote élevée mais en deuxième profondeur (20-40 cm) : 0,163 %. Dans le système de travail réduit, l'azote total dans le sol diminue au fur et à mesure de sa profondeur (**Chen et al., 2009**). D'après **Saber & Mrabet (2002)** ; **Tedonc et al. (2023)**, le semis direct a conservé plus d'azote en couche de surface que le travail conventionnel ; ces valeurs élevées d'azote dans la partie supérieure du sol en SD impliquent qu'il a été incorporé dans la biomasse microbienne près de surface du sol et moins est disponible pour la minéralisation ou

la lixiviation (Mrabet et al., 2001). La figure 33 « d » montre que la teneur en azoté des deux profondeurs est élevée dans les parcelles de lentille et pois fourrager comparativement aux parcelles de blé et triticale.

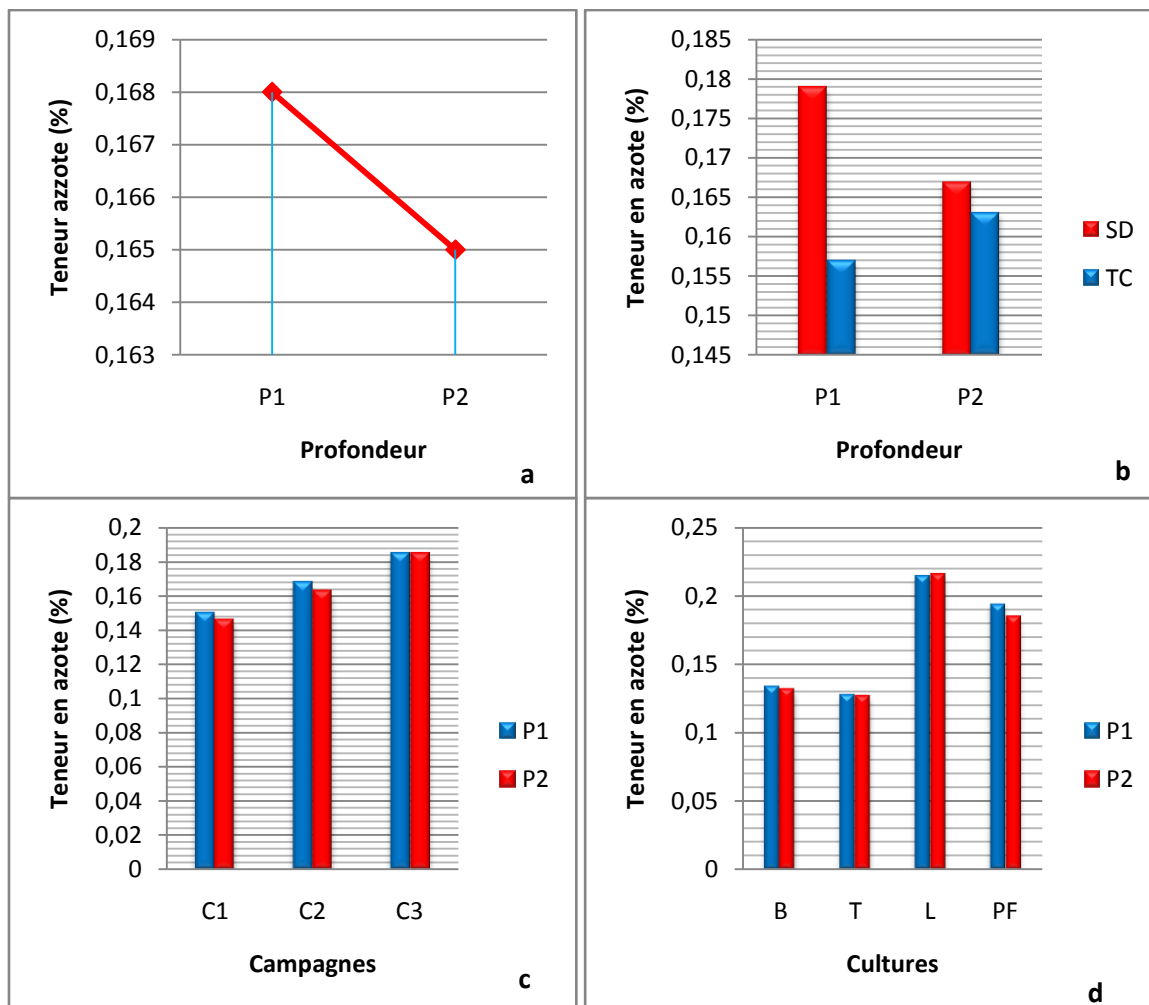


Figure 33 : Teneur en azote dans le sol par profondeur "a", par campagne agricole "c", par système de travail du sol "b" et par culture "d". (P1 : profondeur 0-20 cm, P2 : profondeur 20-40 cm, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19 ; SD : semis direct, TC : travail conventionnel, B : blé, T : triticale, L : lentille, PF : pois fourrager).

3.3.6. Phosphore total (P)

Les analyses de la variance révèlent que les sources de variation à savoir le travail du sol, type de culture en rotation et la profondeur du sol n'ont pas d'effet significatif sur le phosphore ($P > 0,05$), tandis que l'année a un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) sur la teneur en phosphore.

La figure 34 "a" montre que la teneur en phosphore est plus faible lors de la deuxième campagne, avec une moyenne de 29,94 ppm, tandis qu'elle est plus élevée lors de la première campagne, avec une valeur de 32,8 ppm. En revanche, lors de la première et de la troisième campagne, la teneur en phosphore est semblable entre les deux modes de travail du sol, en faveur du travail du sol conventionnel (TC), avec des valeurs de 32,81 ppm en 2016/17 et 32,59 ppm en 2018/19. La différence entre les deux techniques est très visible lors de la

deuxième campagne, avec des moyennes de 31,08 ppm en TC et de 28,79 ppm en semis direct (SD), **figure 34 b"**. Ces résultats sont en contradiction avec ceux de **Mouelhi et al. (2016)**, qui ont trouvé que la concentration en phosphore est élevée en semis direct (SD) par rapport au travail conventionnel (TC), cependant, ils sont conformes aux résultats de **Papini et al. (2007)**, qui ont conclu que la concentration de Phosphore n'est pas affectée par le système de travail du sol.

Il est important de noter que les résultats peuvent varier en fonction des conditions spécifiques de l'étude, telles que les types de sol, les pratiques culturales et les campagnes agricoles. Plus de recherche serait nécessaire pour comprendre pleinement ces différences et leurs implications pour la gestion de la teneur en phosphore dans les sols.

La comparaison des moyennes montrent que les parcelles de lentille ont enregistré la teneur en phosphore la plus élevée avec une moyenne de 32,47 ppm, suivies des parcelles de triticale (31,82 ppm), des parcelles de pois fourrager (31,58 ppm) et enfin des parcelles de blé (31,14 ppm) (**Figure 34 "c"**). Ces suggèrent que l'inclusion des légumineuses dans un système de culture peut aider à libérer le phosphore fixe dans le sol en stimulant l'activité enzymatique de la phosphatase et en libérant des acides via les exsudats racinaires, (**Jena et al., 2022**). De plus, l'interaction entre le système de travail du sol et les cultures a un effet hautement significatif ($P < 0,01$) sur la teneur en phosphore (**Tableau 06**). La **figure 34 "d"**, montre que les parcelles de triticale et de lentille ont enregistré des valeurs de phosphore plus élevées en travail conventionnel avec des moyennes respectives de 33,94 ppm et 33,1 ppm. En revanche, les parcelles de blé et pois fourrager ont enregistré des moyennes de phosphore plus élevées en semis direct, avec des valeurs de 31,84 ppm et 32,02 ppm par respectivement.

Ces résultats confirment que le choix du système de travail du sol et des cultures peut avoir un impact sur la teneur en phosphore dans le sol. Dans ce cas, le travail du sol conventionnel semble favoriser une meilleure disponibilité du phosphore pour les cultures de triticale et de lentilles, tandis que le semis direct semble bénéficier aux cultures de blé et de pois fourrager en termes de teneur en phosphore. Cependant, il est important de noter que ces résultats sont spécifiques à l'étude en question et peuvent varier en fonction des conditions spécifiques du sol et des cultures. Une analyse plus approfondie et plus de recherche sont nécessaires pour comprendre pleinement les interactions entre le système de travail du sol et les cultures sur la teneur en phosphore et pour adapter les pratiques de gestion en conséquence.

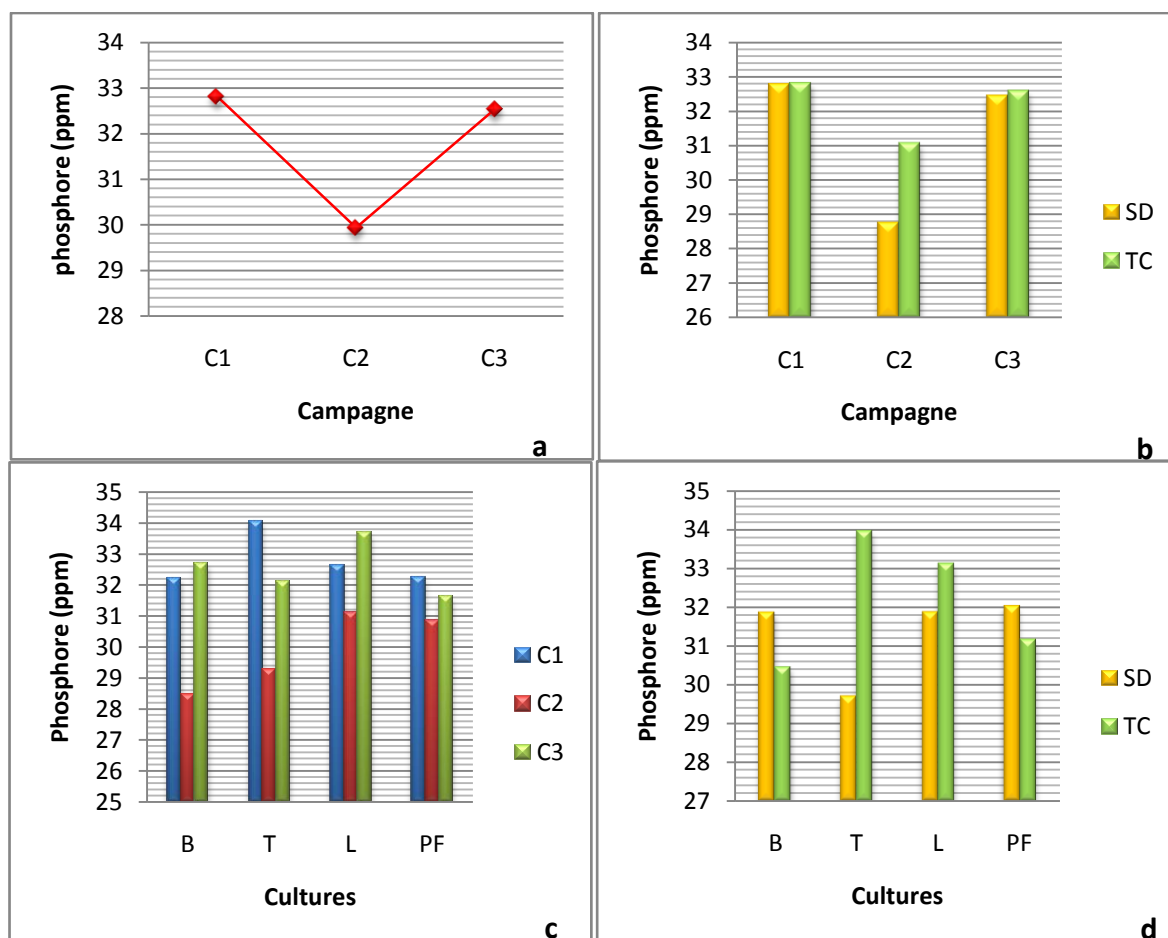


Figure 34 : Phosphore par année d'étude "a", par système de travail du sol "b" et par culture "c et d". (C1 : Campagne 2016/17, C2 : Campagne 2017/18, C3 : Campagne 2018/19, SD : semis direct, TC : travail conventionnel, B : blé, T : triticales, L : lentille, PF : pois fourrager).

Selon la figure 35 "a", la teneur en phosphore est effectivement plus élevée couche superficielle du sol (0-20 cm : 32,07 ppm) par rapport à la couche 20-40 cm (31,43 ppm), ces résultats sont en accord avec ceux de **Papini et al. (2007)**, qui ont également observé une diminution de la concentration de phosphore avec la profondeur. Les deux techniques de travail du sol, le SD et le TC ont enregistré une teneur en phosphore plus élevée dans la couche 0-20 cm, avec des moyennes de 31,95 ppm et 32,18 ppm respectivement (Figure 35 "c"). Cela suggère que le phosphore est plus disponible dans les couches supérieures du sol, quel que soit le mode de travail du sol (**Maher et al., 2022**). En ce qui concerne les différentes cultures, les parcelles de blé, de triticales et de pois fourrager ont présenté une teneur en phosphore plus élevée dans la couche de 0-20 cm, tandis que les parcelles de lentille ont enregistré une teneur en phosphore plus élevée dans la couche 20-40 cm (Figure 35 "d"). *Cela pourrait être dû aux caractéristiques spécifiques des racines et de l'absorption du phosphore par chaque culture. Les cultures de blé, triticales et pois fourrager peuvent avoir des systèmes racinaires plus développés dans la couche supérieure du sol, ce qui expliquerait leur teneur en phosphore plus élevée dans cette zone. En revanche, les racines des lentilles peuvent atteindre une plus grande profondeur (racine pivotante), ce qui expliquerait leur teneur en phosphore plus élevée dans la couche de 20-40 cm.*

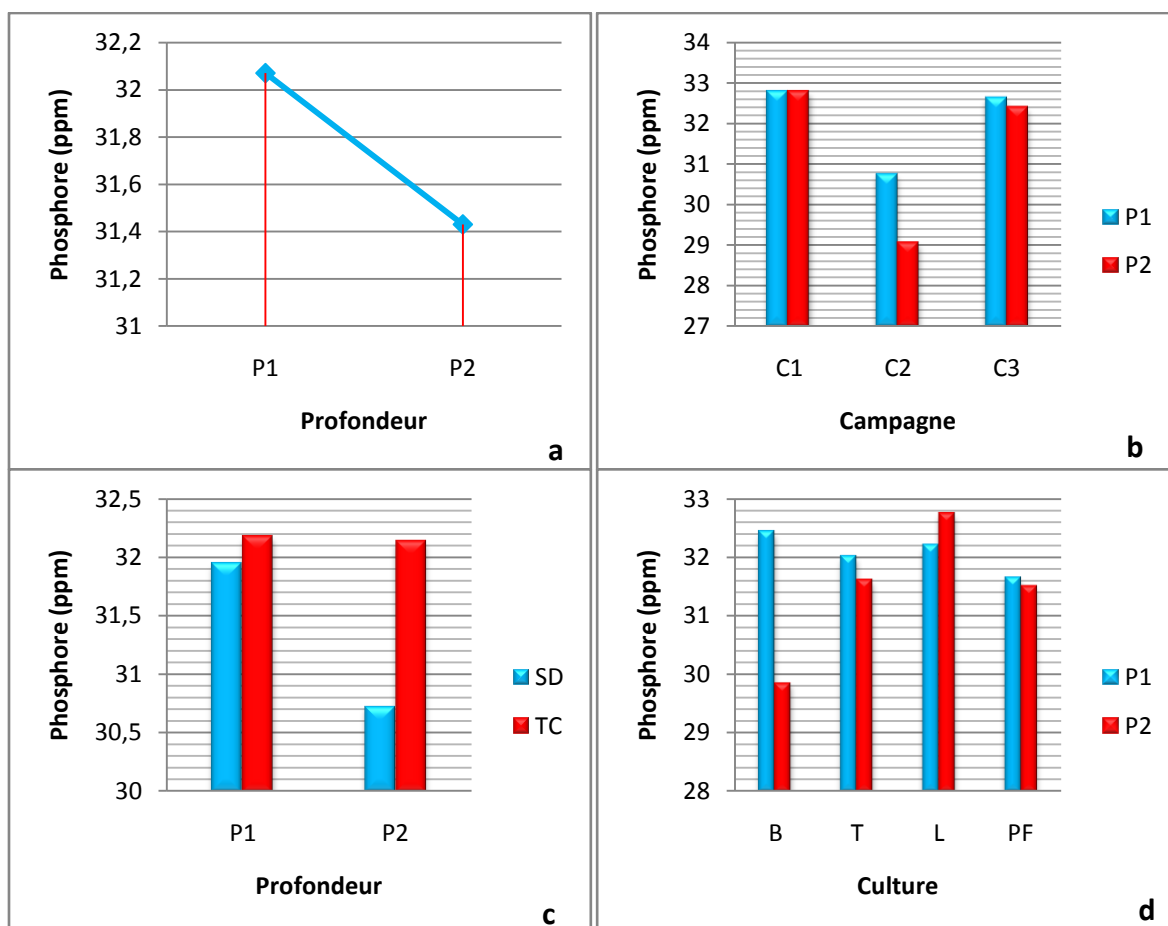


Figure 35 : Phosphore par profondeur "a", par campagne agricole "b", par techniques de travail du sol "c" et par culture "d". (P1 : profondeur 0-20 cm, P2 : profondeur 20-40 cm, C1 : Campagne 2016/17, C2 : Campagne 2017/18, C3 : Campagne 2018/19, SD : semis direct, TC : travail conventionnel, B : blé, T : triticales, L : lentille, PF : pois fourrager).

3.3.7. Potassium (K)

La teneur en potassium (K) varie de manière très significative sous l'effet année ($P < 0,001$) (**Tableau 06**). La teneur en potassium passe de 0,55 meq/ 100 g lors de la première campagne (2016/17) à 0,57 meq/ 100 g lors de la deuxième campagne (2017/18) et à 0,88 meq/ 100 g lors de la troisième campagne (2018/19) (**Figure 36 "a"**). L'effet du système de travail du sol sur la teneur en potassium n'est pas significatif ($P > 0,05$) (**Tableau 06**) ce qui est en accord avec les résultats de **Maher et al. (2022)**. Cependant, on peut observer que les parcelles conduites en travail conventionnel ont une teneur en potassium plus élevée que celles conduites en semis direct (**Figure 36 "b"**). Ces résultats sont en accord avec ceux de **Boudiar et al. (2022)**, qui ont également constaté que les sols en semis direct présentaient une teneur en potassium plus faible que les sols en travail minimum et en travail conventionnel.

En résumé, la teneur en potassium varie significativement selon les années, mais n'est pas affectée par le système de travail du sol. Les parcelles en travail conventionnel ont tendance à présenter une teneur plus élevée en potassium par rapport aux parcelles en semis direct. Cependant, des études supplémentaires sont nécessaires pour comprendre pleinement les facteurs qui influencent la disponibilité en potassium dans les différentes conditions de sol et de gestion.

ANOVA montre que la teneur en potassium dans le sol varie d'une manière significative ($P < 0,05$) et très hautement significative ($P < 0,001$) sous l'effet de culture et l'interaction cultures x années (**Tableau 06**). En troisième campagne, toutes les cultures présentent une teneur en potassium élevée. Cependant, d'après la **figure 36 « c »**, il y a une différence notable entre les cultures de blé et de triticales, où la teneur en potassium diminue de la première à la deuxième année, puis augmente en troisième année. En revanche, les cultures légumières présentent une augmentation de la teneur en potassium de la première à la troisième année, principalement en raison de l'effet du précédent cultural de triticales, qui a une forte accumulation de potassium, et qui entraîne une perte plus faible de cet élément (**Rosolem & Calonego, 2013**). De plus, il est à noter que les parcelles travaillées en labour pour les quatre cultures ont une teneur en potassium plus élevée que celles cultivées en semis direct (**Figure 36 "d"**). En général, les cultures légumières telles que la lentille et le pois fourrager présentent une teneur en potassium plus élevée (0,689 meq/ 100 g et 0,73 meq/ 100 g par ordre) que les cultures de blé et triticales (0,599 meq/ 100 g et 0,656 meq/ 100 g respectivement).

En résumé, la teneur en potassium dans les parcelles varie en fonction des cultures et des années de culture. Les cultures de légumineuses ont tendance à avoir une teneur plus élevée en potassium, tandis que les cultures de blé et de triticales ont des niveaux légèrement inférieurs. De plus, les pratiques de travail du sol, telles que le labour, peuvent également influencer la teneur en potassium, avec des niveaux plus élevés observés dans les parcelles travaillées en labour par rapport aux parcelles en semis direct. Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte ces facteurs dans la gestion des cultures pour maintenir des niveaux adéquats de potassium dans le sol.

Ces résultats suggèrent l'importance de choisir les bonnes pratiques culturelles, telles que le choix des cultures précédentes, ainsi que la méthode de travail du sol, pour maintenir des niveaux adéquats de potassium dans le sol. Cela pourrait avoir un impact positif sur le rendement et la qualité des cultures, notamment en favorisant le développement des racines et l'absorption des nutriments. Il convient donc de prendre en compte ces facteurs lors de la planification des rotations culturales et des techniques de travail du sol.

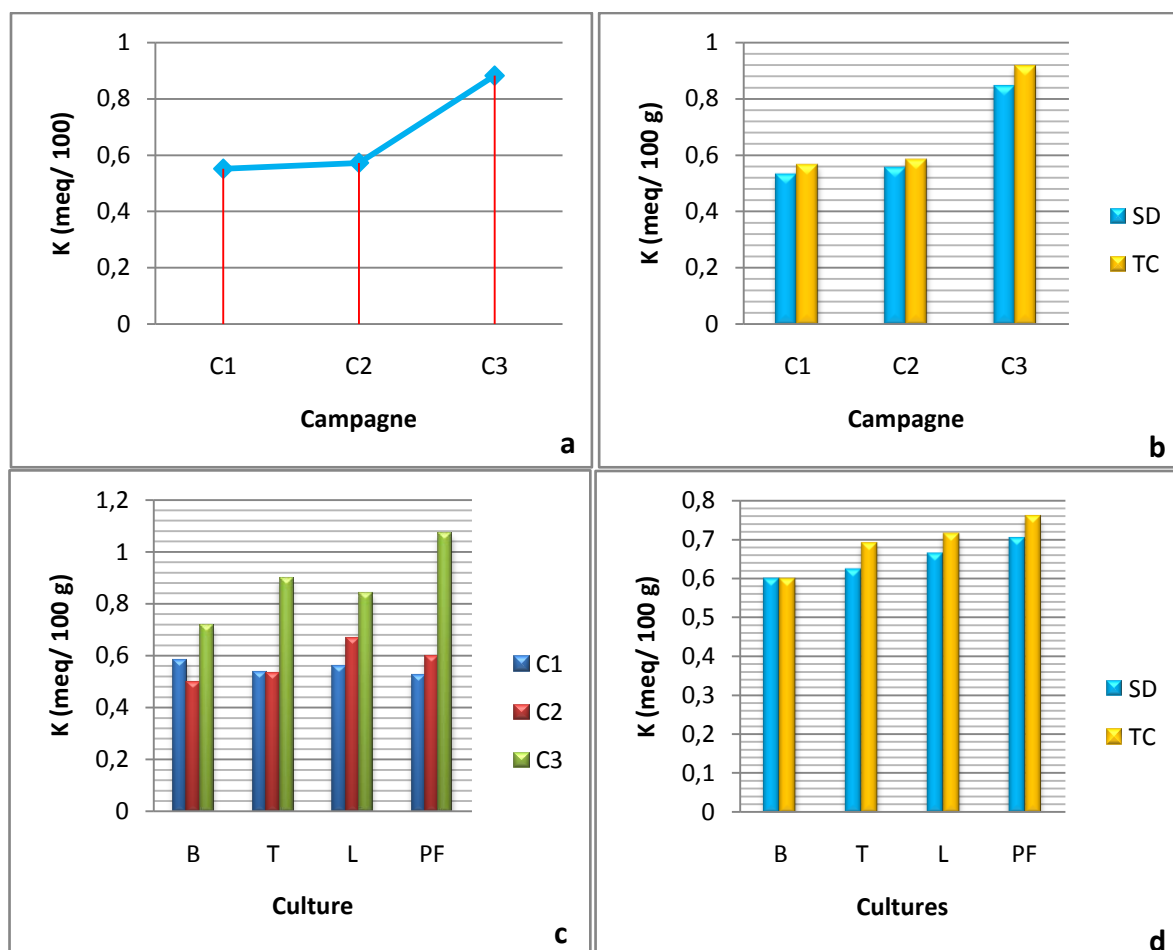


Figure 36 : Teneur en potassium par campagne d'étude "a", par mode de travail du sol "b", et par culture "c et d". (C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, SD : semis direct, TC : travail conventionnel, B : blé, T : triticales, L : lentille, PF : pois fourrager).

Les résultats de l'analyse statistique montrent que la profondeur du sol n'a pas d'influence significative ($P > 0,05$) sur la teneur en potassium. Cependant, il est intéressant de noter que la teneur en potassium diminue légèrement avec l'augmentation de la profondeur du sol. Elle est généralement plus élevée dans la couche superficielle (0-20 cm), avec 0,682 meq/100 g par rapport à la couche plus profonde 20-40 cm, avec 0,654 meq/100 g (**figure 37 "a"**). Cependant, La teneur en potassium est de 6,19 % et de 7,78 % supérieure en TC par rapport SD dans les profondeurs 0-20 cm et 20-40 cm respectivement (**Figure 37 « c »**). D'après **Maher et al. (2022)**, les valeurs élevées de potassium sont enregistrées dans la couche de surface et les valeurs faibles sont enregistrées dans les couches profondes dans les deux modes de travail du sol (SD et TC). De plus, la teneur en potassium peut varier en fonction du type de culture, avec certaines cultures présentant des niveaux plus élevés de potassium dans la couche superficielle et d'autres dans la couche plus profonde. Les parcelles de blé, de triticales et de pois fourrager ont enregistré une teneur en potassium élevée en couche 0-20 cm, par contre les parcelles de la culture de lentille ont une teneur en potassium élevée en couche 20-40 cm (**Figure 37 "d"**).

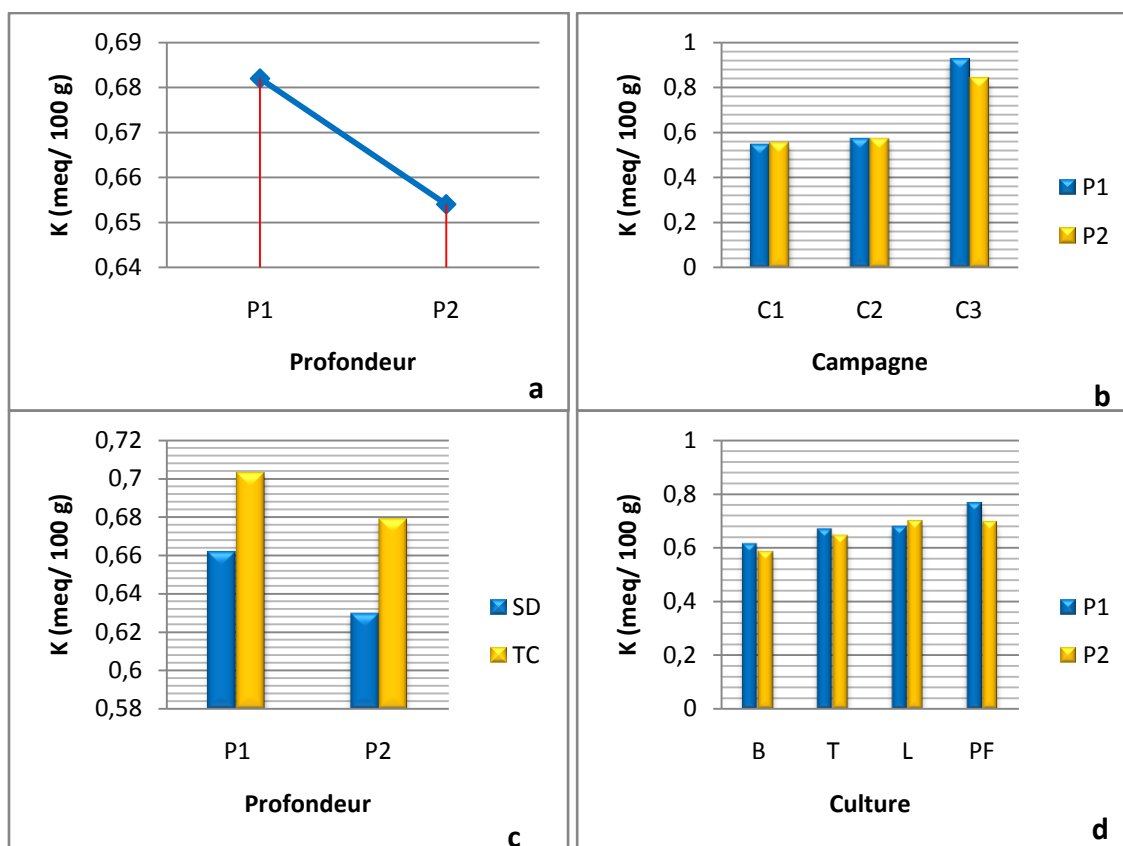


Figure 37 : Potassium dans le sol par profondeur du sol "a", par campagne agricole "b", par mode de travail du sol "c" et par culture « d ». (P1 : profondeur 0-20 cm, P2 : profondeur 20-40 cm, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, SD : semis direct, TC : travail conventionnel, B : blé, T : triticale, L : lentille, PF : pois fourrager).

3.3.8. Rapport C/N

Le rapport C/N varié d'une manière très hautement significative ($P < 0,001$) sous l'effet de la campagne, culture et l'interaction campagne x culture (**Tableau 06**).

L'étude des moyennes suggère que les valeurs du rapport C/N augmente de la au fil des années (**Figure 38 "a"**). Le rapport C/N des cultures est élevé en troisième campagne par rapport à ce deux autres campagnes (**Figure 38 "c"**). Les résultats indiquent également que le triticale et le blé (8,71 et 5,81) ont des rapports C/N plus élevés que la lentille et le pois fourrager. (5,16 et 5,09), **Figure 38 "c"**. **Mohammad et al. (2012)** ont noté que les légumineuses ont un faible rapport de C/ N. **Woźniak & Soroka (2018)** ont marqué que l'introduction du pois en rotation avec le blé et l'orge a entraînée un rapport C/ N plus faible que blé monoculture. Le rapport C/N est plus faible dans les cultures de légumineuses par rapport aux céréales est expliqué par la minéralisation rapide des résidus aériens des légumineuses que celle des céréales (**Voisin et al., 2015**).

En général, un rapport C/N élevé indique une plus grande quantité de carbone par rapport à l'azote dans le sol. Cela peut être dû à une plus grande quantité de matière organique présente dans le sol, qui est riche en carbone. Les légumineuses, telles que la lentille et le pois fourrager, ont tendance à avoir des rapports C/N plus faibles en raison de leur capacité à fixer l'azote atmosphérique dans le sol.

Le système de travail du sol et la profondeur du sol n'ont aucun effet significatif sur le rapport C/N (**Tableau 06**) ; ce qui est en accord avec les travaux de **Al-Kaisi et al. (2005)**, qui ont souligné que le système de travail du sol n'a aucun effet significative sur le rapport C/N. Cependant, il est intéressant de noter que le rapport C/N est plus élevé en SD par rapport au TC dans toutes les campagnes agricoles (**Figure 38 "b"**). Cela pourrait s'expliquer par le fait que le sol en SD conserve davantage de matières organiques et de résidus de culture, ce qui augmente le rapport C/N. En revanche, le travail du sol intensif du TC peut entraîner une décomposition plus rapide des matières organiques, ce qui réduit le rapport C/N. Les histogrammes de la **figure 38 "d"**, révèlent que le rapport C/N est élevé en SD pour les cultures de blé, triticale et lentille, contre la culture de pois fourrager qui a un rapport C/N élevé en TC.

En conclusion, le système de travail du sol n'a pas d'effet sur le rapport C/N, mais le rapport C/N est généralement plus élevé en semis direct par rapport au travail conventionnel du sol. Cependant, d'autres facteurs tels que le type de culture peuvent également avoir un impact sur le rapport C/N. Il est important de prendre en compte ces facteurs lors de la gestion du sol et de la fertilisation pour optimiser la disponibilité des éléments nutritifs aux cultures. Exemple un rapport C/N plus élevé peut indiquer une plus grande stabilité de la matière organique et une libération plus lente des nutriments, ce qui peut être bénéfique pour la fertilité du sol à long terme. Cependant, certaines cultures, comme le pois fourrager, peuvent nécessiter des niveaux plus faibles de rapport C/N pour une décomposition et une disponibilité plus rapides des nutriments.

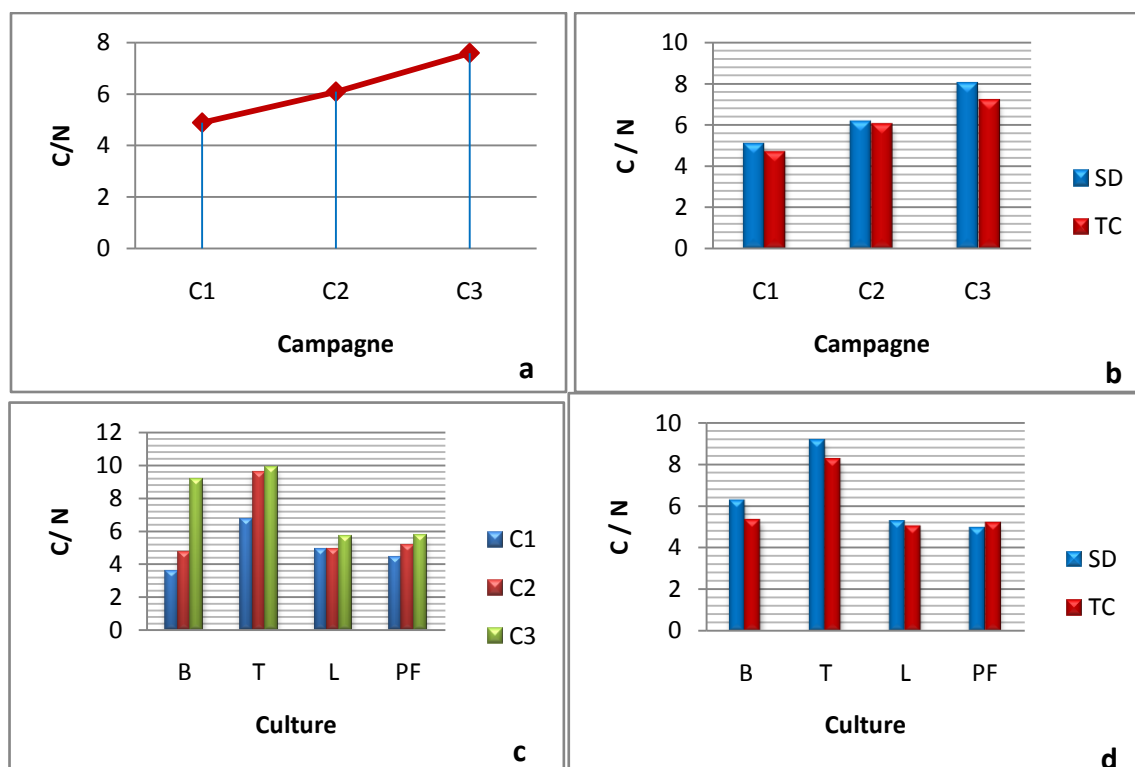


Figure 38 : Rapport C/N par année d'étude "a", par mode de travail du sol "b", et par type de culture "c & d". (C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, SD : semis direct, TC : travail conventionnel, B : blé, T : triticale, L : lentille, PF : pois fourrager).

En général, le rapport C/N tend à diminuer avec l'augmentation des profondeurs de prélèvement (**Figure 39 "a"**). *Cela peut s'expliquer par le fait que les matières organiques sont généralement plus décomposées en profondeur, ce qui entraîne une diminution du rapport C/N.*

Cependant, il est intéressant de noter que les résultats varient d'une campagne à l'autre. Par exemple, dans les campagnes 2016/17 et 2018/19, le rapport C/N était plus élevé en profondeur de 0-20 cm, tandis que dans la campagne 2017/18, il était plus élevé en profondeur de 20-40 cm (**Figure 39 "b"**). En ce qui concerne les différents systèmes de travail du sol, il semble y avoir des différences dans l'effet de la profondeur sur le rapport C/N. Dans le TC, le rapport C/N augmente avec l'accroissement de la profondeur (C/N passe de 5,59 en couche 0-20 cm à 6,32 en couche 20-40 cm), par contre, en semis direct, ce rapport diminue avec l'accroissement de la profondeur ; il est de 6,99 sur la couche 0-20 cm et de 5,87 en couche 20-40 cm (**Figure 39 "c"**). Cela peut être dû à des variations dans les conditions du sol et le cycle de décomposition des matières organiques d'une année à l'autre.

En ce qui concerne les différentes cultures, il semble y avoir des variations dans le rapport C/N en fonction de la profondeur. Par exemple, le blé, la lentille et le pois fourrager ont tendance à avoir un rapport C/N légèrement plus élevé en profondeur de 20-40 cm, tandis que le triticale a un rapport C/N plus élevé en profondeur de 0-20 cm (**Figure 39 "d"**).

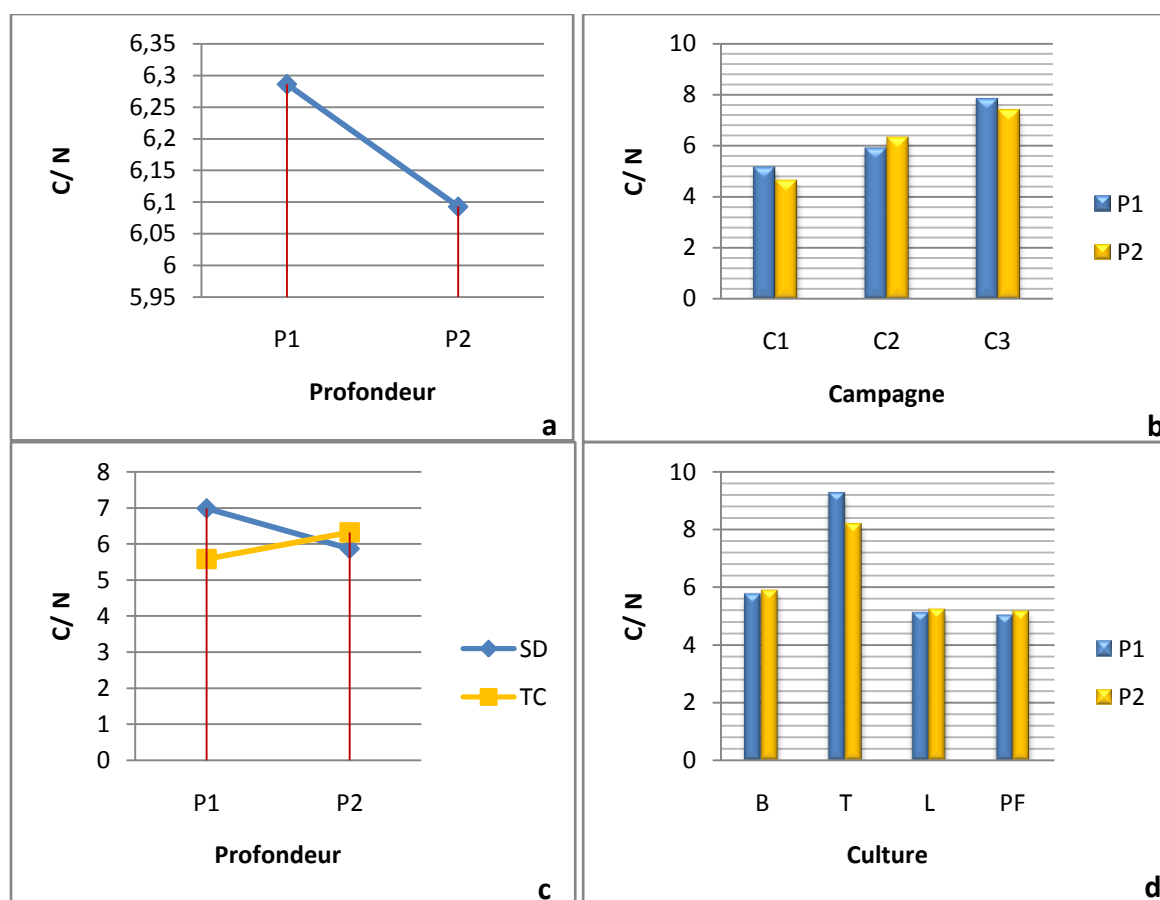


Figure 39: Rapport de C/N du sol par profondeur "a", par campagne "b", par mode de travail du sol "c", et par culture "d". (P1 : profondeur 0-20 cm, P2 : profondeur 20-40 cm, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, SD : semis direct, TC : travail conventionnel, B : blé, T : triticale, L : lentille, PF : pois fourrager).

3.3.9. Magnésium (Mg)

L'analyse de la variance montre un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) des sources de variations (année et types de culture et l'interaction année x culture) sur la teneur en Mg. Cependant, le mode de travail du sol et la profondeur de prélèvement n'ont pas d'effet significatif sur la teneur en Mg (**Tableau 06**). Ceci est en accord avec les résultats de **Van et al. (2014)** ; **Neugschwandtner et al. (2022)**, qui ont trouvé que le type de travail du sol n'a aucun effet sur la concentration de Mg.

La teneur en Mg du sol régresse au fil des années : 2,115 meq/ 100 g en première campagne et 1,743 meq/ 100 g en troisième campagne (**Figure 40 "a"**). En ce qui concerne la technique du travail du sol, la teneur en Mg est supérieure en TC lors des deux premières campagnes cependant, en troisième campagne, la valeur élevée de Mg est en faveur du SD (**Figure 40 "b "**).

Par type de culture, la teneur en magnésium dans le sol de chacune des parcelles de blé, de lentille et de pois fourrager diminue de la première campagne à la troisième campagne, tandis que la teneur en Mg de la parcelle du triticales augmente de la première campagne à la troisième campagne (**Figure 40 "c"**). Les parcelles des cultures de blé et de lentille ont une teneur de magnésium élevée en travail conventionnel (TC) par contre, les parcelles de pois fourrager et de triticales ont une teneur de magnésium élevée en semis direct (SD), (**Figure 40 « "d"**). Les parcelles de blé et de lentille ont une teneur de magnésium élevée (2,31 meq/ 100 g et 2,031 meq/ 100 g respectivement) suivies par les parcelles de pois fourrager avec une moyenne de 1,833 meq/ 100 g et les parcelles de triticales avec une valeur de 1,609 meq/ 100 g.

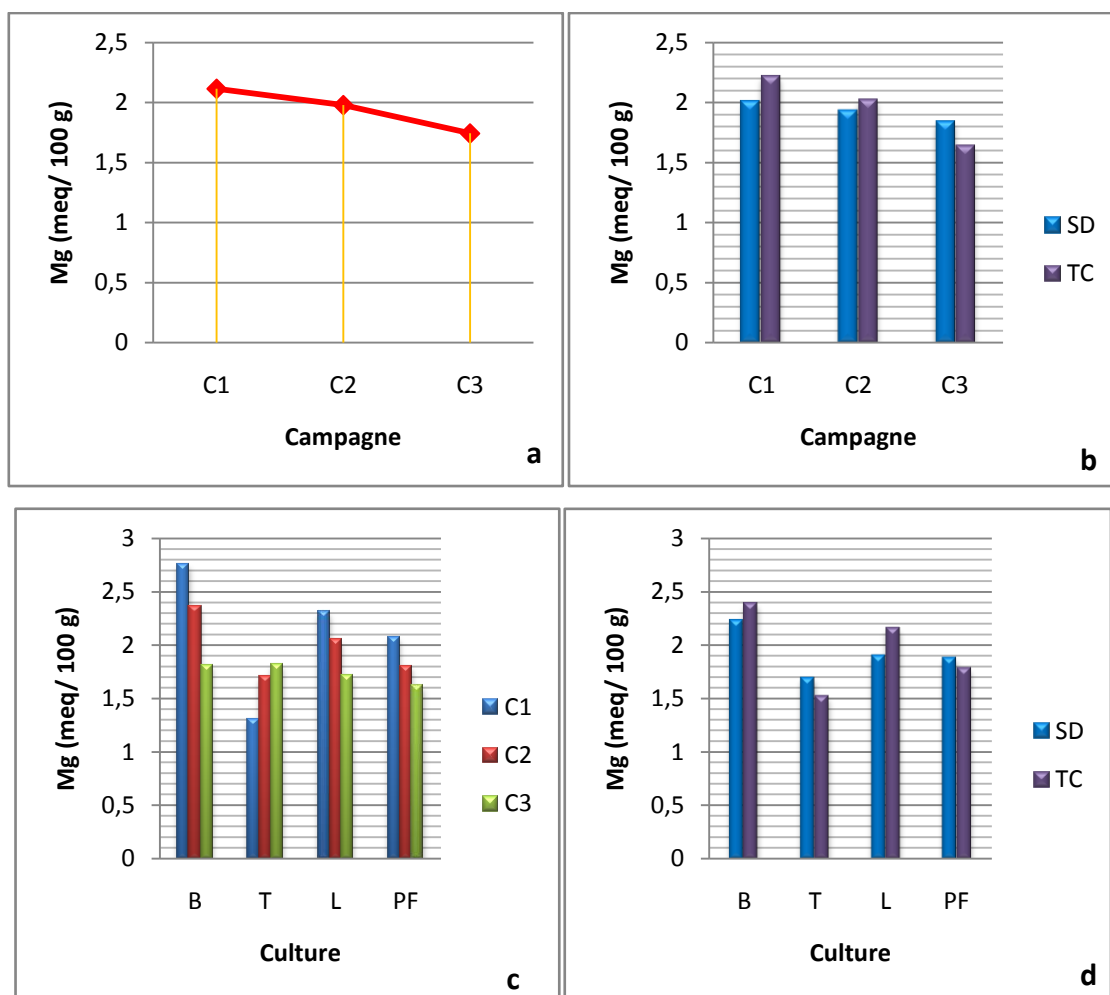


Figure 40 : Teneur en magnésium par campagne agricole "a", par mode de travail du sol "b", par culture "c & d". (C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, SD : semis direct, TC : travail conventionnel, B : blé, T : triticale, L : lentille, PF : pois fourrager).

La relation entre la teneur en magnésium et la profondeur du sol est divergente (**Figure 41 "a »**). Selon la **figure 41 "b"**, la teneur en magnésium du sol sur les deux profondeurs de prélèvement diminue au fil des années d'expérimentation. En ce qui concerne le travail du sol, les parcelles conduites en TC ont une teneur en magnésium plus élevée aux parcelles soumises en SD et ce sur les deux couches 0-20 cm et 20-40 cm (**Figure 41 "c"**). Les mêmes résultats ont été trouvés par **Thomas et al. (2007)**, où la concentration en magnésium était élevée en TC qu'en SD. Les parcelles des cultures de triticale, de lentille et de pois fourrager ont une teneur élevée en magnésium dans la couche 0-20 cm, par contre, les parcelles de blé ont une teneur de magnésium élevée dans la couche 20-40 cm (**Figure 41 "d"**).

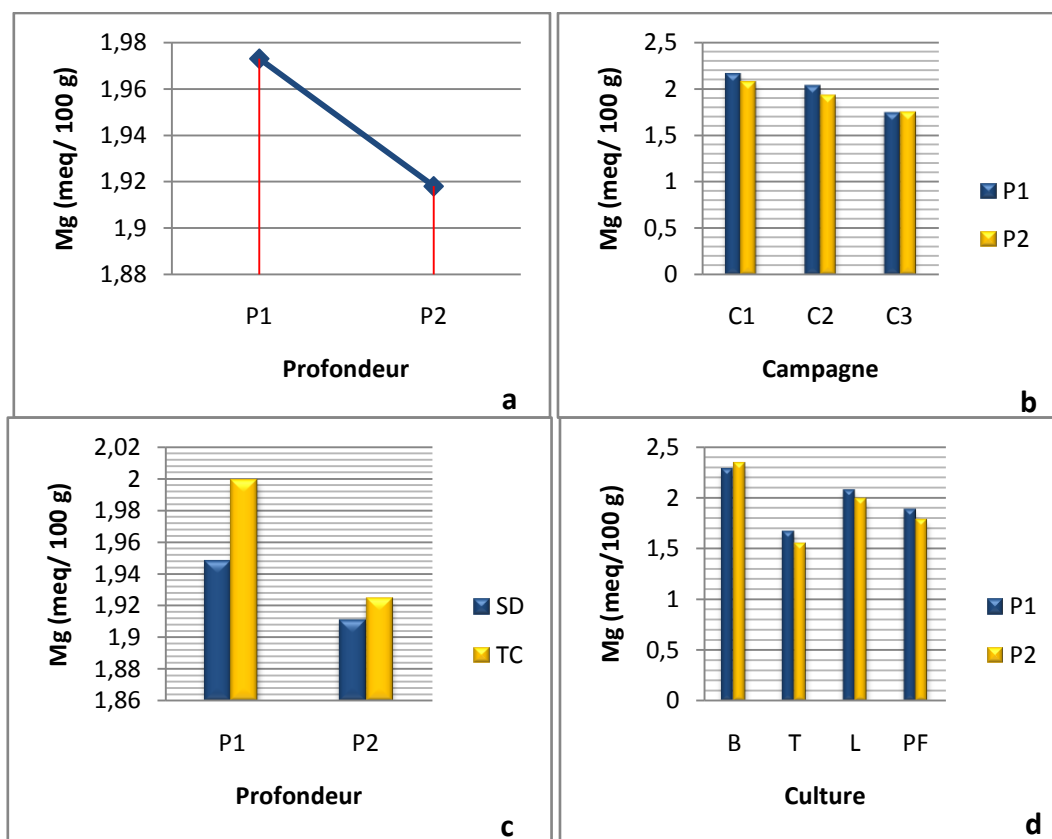


Figure 41: Teneur du magnésium du sol par couche de sol "a", par campagne agricole "b", par système de travail du sol "c" par culture "d". (P1 : profondeur 0-20 cm, P2 : profondeur 20-40 cm, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, SD : semis direct, TC : travail conventionnel, B : blé, T : triticales, L : lentille, PF : pois fourrager).

3.3.10. Calcium (Ca)

Les analyses de variance ont montré une différence très hautement significative sous l'effet campagne agricole, systèmes de travail du sol et de type de culture et de leur interaction ($P < 0,001$) sur la teneur en calcium du sol (Ca), cependant, la profondeur du sol, n'a aucun effet significatif sur la teneur de Ca ($P > 0,05$). Tandis que l'effet de l'interaction de la profondeur et les types de cultures est significatif ($P < 0,05$) (**Tableau 06**).

L'analyse des moyennes a montré que la teneur de calcium dans le sol entre les années est élevée en première campagne (40,975 meq/100 g), elle été relativement faible en deuxième et troisième année (40,768 meq/ 100 g et 39,901 meq/ 100 g respectivement), **figure 42 "a"**).

Les parcelles conduites en TC ont une valeur élevée de calcium (41,248 meq/ 100 g) par rapport aux parcelles conduites en SD (39,849 meq/ 100 g) (**Figure 42 « b »**), ce résultat corrobore le résultat de **Thomas et al. (2007)**.

En ce qui concerne les parcelles de blé et de triticales, la teneur en calcium est élevée (41,857 meq/ 100 g et 40,965 meq/ 100 g respectivement), que celles de lentille et de pois fourrager (39,654 meq/ 100 g et 39,717 meq/ 100 g) (**Figure 42 "c"**). L'ensemble des cultures ont une teneur moyenne élevée en calcium en TC qu'en SD. Cependant, en technique de SD, les parcelles de blé ont une teneur élevée en Ca (41,674 meq/ 100 g). Tandis qu'en

TC, les parcelles de triticale ont une teneur élevée en Ca avec une valeur de 42,567 meq/ 100 g (**Figure 42 "d"**).

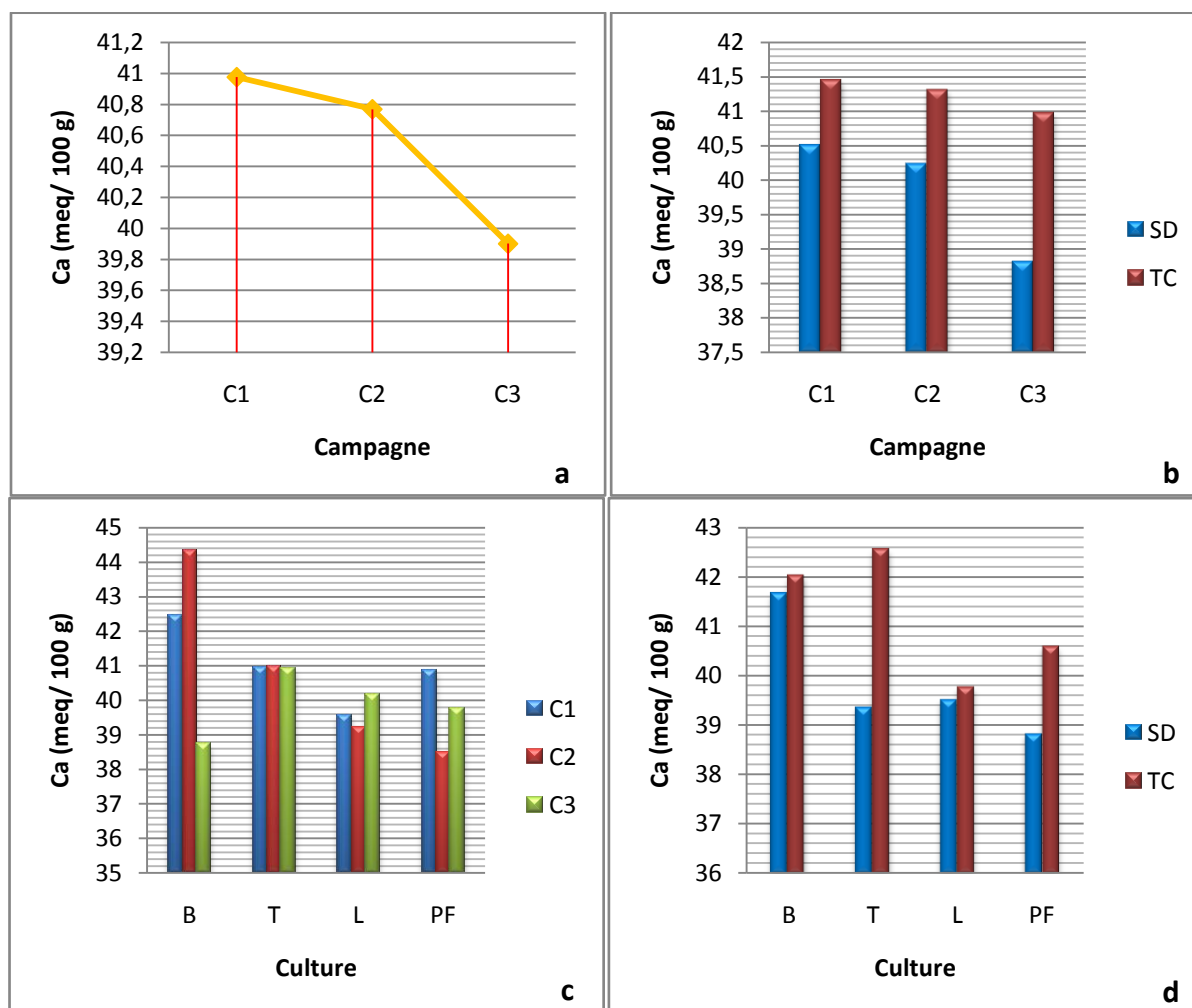


Figure 42: Valeurs de calcium du sol par campagne agricole "a", par mode de travail du sol "b", et par type de culture "c et d". (C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, SD : semis direct, TC : travail conventionnel, B : blé, T : triticale, L : lentille, PF : pois fourrager).

Concernant la teneur en calcium dans les profondeurs de prélèvement, elle est proportionnelle à l'augmentation de la profondeur, de fait, la teneur en Ca est élevée sur la deuxième couche (20-40 cm), avec une moyenne de 40,637 meq/ 100 g et relativement faible à la première couche, (40,459 meq/ 100 g) (**Figure 43 "a"**). Sur les deux profondeurs, les parcelles soumises en TC ont une teneur élevée en calcium comparé à celles de SD (**Figure 43 "c"**). D'après la **figure 43 "d"**, les parcelles de triticale et de pois fourrager ont une teneur élevée en calcium sur la première couche (0-20 cm), cependant, les parcelles de blé et de lentille ont une teneur en calcium élevée dans la couche 20-40 cm.

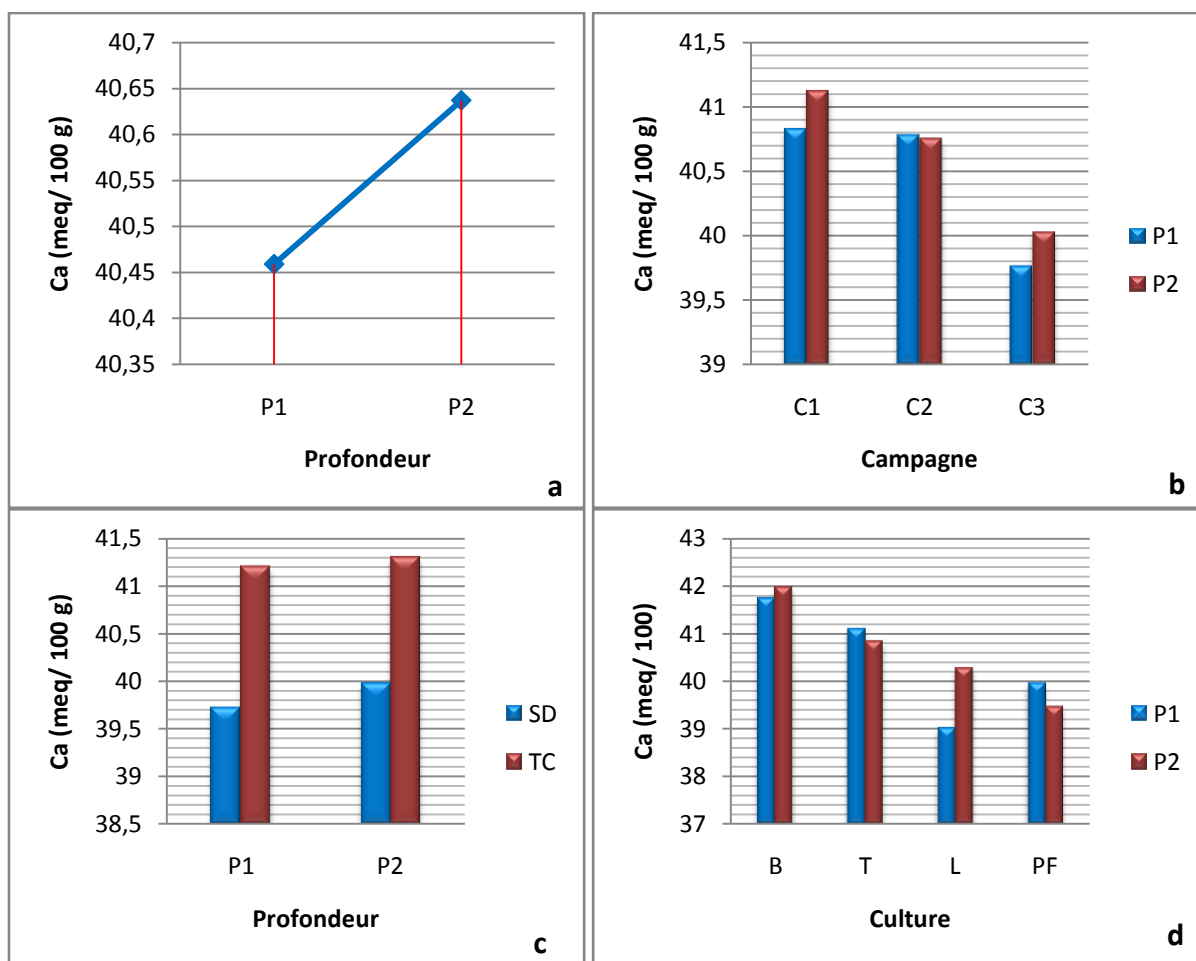


Figure 43: Teneur du calcium du sol par profondeur "a", par campagne d'étude "b", par système de travail du sol "c" et par type de culture "d". (P1 : profondeur 0-20 cm, P2 : profondeur 20-40 cm, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, SD : semis direct, TC : travail conventionnel, B : blé, T : triticales, L : lentille, PF : pois fourrager).

3.3.11. Sodium (Na)

D'après le **tableau 06**, la teneur de sodium (Na) du sol a été variée d'une façon très hautement significative ($P < 0,001$) sous l'effet de l'année, de la culture et l'interaction année x cultures. Concernant le système de travail du sol n'a aucun effet significatif ($P > 0,05$) sur la teneur de Na du sol. Alors, l'interaction du mode de travail du sol et de type cultures a un effet très hautement significatif ($P < 0,001$), cependant, la profondeur du sol n'a aucun effet significatif sur la teneur de Na ($P > 0,05$).

La comparaison des moyennes a montré que la teneur de sodium est faible en deuxième année agricole (2017/18), avec une moyenne de 0,172 par rapport à la troisième et la première année, avec des moyennes de: 0,199 meq/ 100 g et 0,200 meq/ 100 g respectivement (**Figure 44 "a"**). Les parcelles de blé ont une teneur élevée en sodium en première et troisième année. Tandis qu'en troisième année, les parcelles de triticales et de pois fourrager qui ont une teneur élevée en Na. En moyenne, les parcelles des cultures céréalières (blé et triticales) ont enregistré une teneur élevée en Na, (0,202 meq/ 100 g et 0,192 meq/ 100 g), que les parcelles de lentille et de pois qui ont enregistré une faible teneur en Na (0,184 meq/ 100 g et 0,183 meq/ 100 g par ordre) (**Figure 44 "c"**).

Pour la technique de travail du sol, la comparaison des moyennes de sodium a montré une différence nulle entre le SD et le TC (**Figure 44 "b"**), ce qui est en contradiction avec les résultats de **Thomas et al. (2007)** et de **Sosibo et al. (2022)** qui ont marqué une teneur de Na élevée dans le sol soumis en TC que sous SD. L'interaction technique de travail du sol et type de cultures a montré que les cultures de triticale et de lentille ont une teneur en sodium plus élevées sous TC (2,03 meq/ 100 g et 1,84 meq/ 100 g) par rapport à celles conduites en SD (0,18 meq/ 100 g et 0,183 meq/ 100 g). Cependant, les parcelles de blé et de pois fourrager conduite en SD ont une teneur en sodium supérieure (0,212 meq/ 100 g et 0,185 meq/ 100 g) à celles conduites en TC (0,192 meq/ 100 g et 0,181 meq/ 100 g) (**Figure 44 "d"**).

Concernant la profondeur du sol, la concentration du Na du sol augmente légèrement avec l'augmentation de la profondeur (**Figure 45 "a"**). D'après les histogrammes de la **figure 45 "b"**, les teneurs de sodium montre que l'interaction profondeur du sol et techniques de travail du sol sont identiques. Les parcelles des cultures de blé et de lentille ont enregistré une teneur de sodium élevée en couche 20-40 cm, avec une valeur de 0,2 meq/ 100 g, par rapport aux parcelles des cultures de triticale et de pois fourrager, qui ont enregistré une teneur en sodium élevée en couche superficielle (0-20 cm) : 0,186 meq/ 100 g et 0,183 meq/ 100 g respectivement (**Figure 45 "d"**).

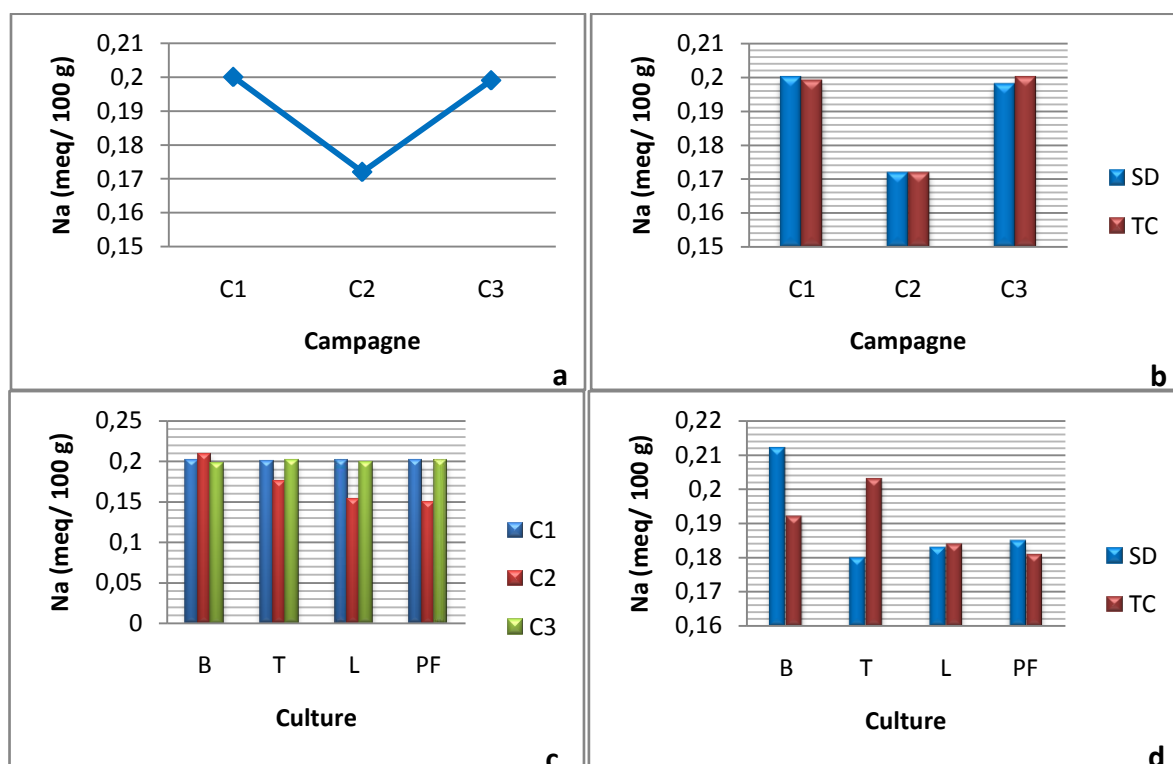


Figure 44 : Valeurs de sodium du sol par campagne agricole "a", par mode de travail du sol "b", et par type de culture "c et d". (C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, SD : semis direct, TC : travail conventionnel, B : blé, T : triticale, L : lentille, PF : pois fourrager).

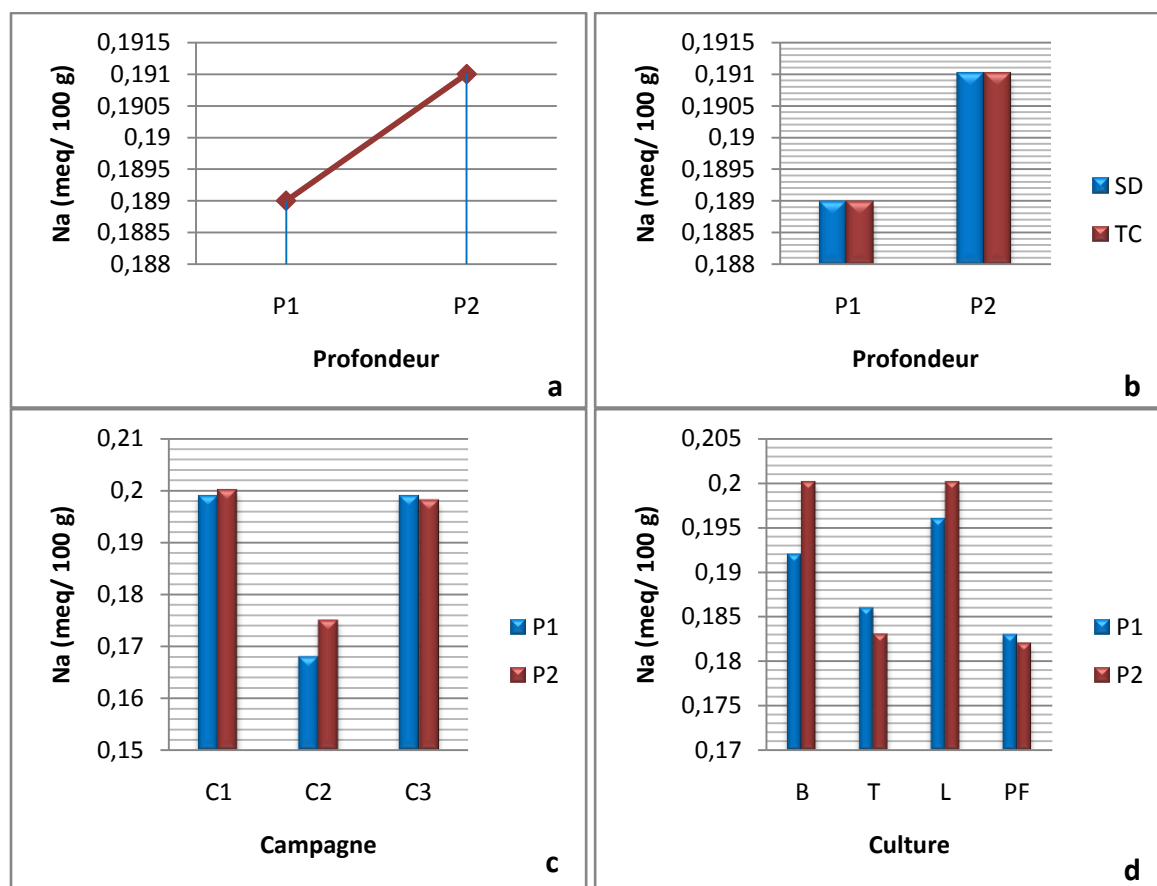


Figure 45 : Teneur de sodium du sol par couche de sol "a", par campagne agricole "c", par système de travail du sol "b" et par culture "d". (P1 : profondeur 0-20 cm, P2 : profondeur 20-40 cm, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, SD : semis direct, TC : travail conventionnel, B : blé, T : triticales, L : lentille, PF : pois fourrager).

Tableau 06: Analyse de la variance des paramètres chimiques du sol.

Source de variation	DDL	pH	CE	CaCO ₃	MO	N	P	K	C/N	Mg	Ca	Na
Années	2	1,98***	0,05***	44,82** *	13,28** *	0,02***	119,93** *	1,65** *	87,99***	7,83***	8,74***	0,01***
STS	1	1,96***	0,0001 ns	17,44** *	2,41***	0,01***	23,97 ns	0,07 ns	8,11ns	0,18 ns	39,54** *	0,00 ns
Clts	3	0,94***	0,005** *	18,70** *	2,35***	0,07***	11,11 ns	0,11*	104,97** *	14,70** *	22,74** *	0,003** *
Pro	1	0,00 ns	0,00 ns	6,85*	0,39*	0,0004 ns	14,70 ns	0,03 ns	1,34 ns	0,51 ns	0,64	0,0002 ns
STS*années	2	0,93***	0,003*	6,17*	0,35*	0,001 ns	19,60 ns	0,01 ns	1,48 ns	2,47 ns	2,92 ns	0,00 ns
STS*Clts	3	0,26*	0,001 ns	5,15*	0,14 ns	0,0004 ns	58,62 **	0,01 ns	2,87 ns	1,71 ns	9,62***	0,003** *
STS*Pro	1	0,06 ns	0,001 ns	0,41 ns	4,25***	0,003** *	12,95 ns	0,00 ns	30,80***	0,05 ns	0,13 ns	0,00 ns
Années*Clts	6	0,75***	0,005** *	10,53** *	0,64***	0,002** *	13,20 ns	0,11** *	20,04***	5,42***	19,31** *	0,003** *
Campagne*Pro	2	0,003 ns	0,01***	0,41 ns	0,03 ns	0,00 ns	9,86 ns	0,03 ns	3,26 ns	0,19 ns	0,21 ns	0,0002 ns
Clts*Pro	3	0,06 ns	0,00 ns	1,00 ns	0,18 ns	0,0002 ns	16,41 ns	0,01 ns	3,27 ns	0,28 ns	3,03*	0,0003 ns
CV (%)	//	0,129	2,997	0,125	0,372	0,269	0,13	0,348	0,418	0,302	0,057	0,14
Ecart-type	//	0,99	0,94	1,98	0,64	0,04	4,13	0,23	2,59	0,59	2,29	0,03

STS : système de travail du sol, Clts : Cultures, Pro : profondeur, ns : effet non significatif, * : effet significatif, ** : effet hautement significatif, *** : effet très hautement significatif.

3.4. Etude des corrélations

L'analyse des corrélations (**Tableau 07**) a révélé que la **MO** est significativement et positivement corrélée à la **CE** (0,50), et elle est négativement et significativement corrélée au **pH** (-0,55) et donc quand le taux de la matière organique augmente, le pH diminue. L'analyse a montré aussi que la **porosité** est significativement et négativement corrélée à la **densité apparente** (-1,00) et à la **Rp** (-0,62), et que la **densité apparente** est positivement et significativement corrélée à la **Rp** (0,62), donc on peut conclure que si la densité apparente augmente, les valeurs de la résistance au pénétromètre augmentent et donc les valeurs de porosité diminuent.

Tableau 07 : Coefficient de Pearson de corrélation entre les paramètres physico-chimiques du sol étudiés.

V ar	C E	pH	C/ N	Ca C O3	M O	N	P	K	M g	Ca	Na	H S1	H S2	H S3	H S4	H S5	H S6	H S7	H S8	H S9	H S10	H S11	Da	Po	R p
C E	1																								
p H	- 0,59**	1																							
C/ N	0,27	- 0,23	1																						
Ca C o3	0,31*	- 0,23	- 0,11	1																					
M O	0,50**	- 0,55**	0,71**	- 0,04	1																				
N	0,39**	- 0,47**	- 0,27	0,13	0,47**	1																			
P	- 0,19	0,10	- 0,10	- 0,02	0,05	0,12	1																		
K	0,35*	- 0,21	0,23	- 0,01	0,59**	0,47**	0,20	1																	
M g	- 0,27	0,05	- 0,41**	- 0,06	- 0,42**	- 0,11	- 0,20	- 0,29*	1																
C a	- 0,44**	0,69**	- 0,22	- 0,03	- 0,54**	- 0,46**	0,01	- 0,19	0,25	1															
N a	- 0,55**	0,52**	- 0,01	- 0,12	- 0,10	0,19	0,35**	0,11	0,02	0,49**	1														
H S1	0,5**	- 0,48**	0,12	0,28	0,37**	0,36**	- 0,16	0,35*	- 0,25	- 0,35**	- 0,22	1													

[illegible]

* : corrélation significative, ** : corrélation hautement significative, *** : corrélation très hautement significative, Var : variables, CE : conductivité électrique, pH : potentiel .., MO : matière organique, N : azote, P : phosphore, K : potassium, Mg : magnésium, Ca : calcium, Na : sodium, Da : densité apparente, Po : porosité, Rp : résistance au pénétromètre, HS1 : humidité stade 1, HS2 : humidité stade 2, HS3 : humidité stade 3, HS4 : humidité stade 4, HS5 : humidité stade5, HS6 : humidité stade 6, HS7 : humidité stade 7, HS8 : humidité stade 8, HS9 : humidité stade 9, HS10 : humidité stade 10, HS11 : humidité stade 11).

3.5. Etude d'analyse en composante principale (ACP)

Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée pour vérifier la localisation des traitements, à savoir la technique de travail du sol (SD et TC) et les cultures

précédentes (blé, triticales, lentille et pois fourrager) par rapport aux variables mesurées comme le montre la **figure 46**. Les deux premiers axes de l'ACP expliquent **62,93 %** de la variation totale.

L'axe 1 explique **33,72 %** de l'information de la variance totale, il a été formé principalement par les variables **pH (7,20 %)**, **humidité** après la récolte (**21,56 %**), la **résistance au pénétromètre (14,67)** et la **densité apparente (8,47 %)** dans le sens positif. Cependant, on constate un positionnement sur le côté négatif **la porosité (8,47 %)**, et la **matière organique (18,56 %)** (**Figure 46**). L'opposition entre le taux de la matière organique et le pH montre que lorsque le taux de la matière organique augmente, le pH diminue, ce qui indique qu'il existe une corrélation négative entre le taux de la matière organique et le pH.

L'axe 2, avec **29,21%** de l'information de la variance totale, représente la variation de la **CE (14,18 %)**, **Da (24,02 %)** et **Rp (10,06 %)** dans la direction positive et dans la direction négative, on trouve la variation de la **porosité (24,02 %)**, et le **pH (11,70 %)** (**Figure 46**). L'opposition entre la densité apparente et la porosité montre que lorsque la densité apparente augmente, la porosité diminue, ce qui indique qu'il existe une corrélation négative entre la porosité et la densité apparente.

La projection des systèmes de travail du sol et les cultures sur le plan (1-2) révèle une nette opposition entre la campagne 2016/17, qui été une année à faible pluviométrie et les campagnes 2017/18 et 2018/19, caractérisées par une précipitation élevée et bien répartie. En première campagne (2016/17), des valeurs élevées de pH et d'humidité du sol ont été enregistré en semis direct ; associée à un taux de matière organique et valeur de CE faibles. Le travail conventionnel en première campagne (2016/17), a enregistré une valeur de porosité élevée ; associé à des valeurs de densité apparente et de Rp faible, ce qui est du à la meilleure préparation du sol sous la pratique conventionnelle. En deuxième campagne (2017/18), des valeurs élevées de la densité apparente et de Rp associée à une faible valeur de porosité ont été enregistré en semis direct, en raison de l'absence de la perturbation du sol en cette technique. Un taux de matière organique et une CE élevés associée à une grande valeur de porosité ont été enregistrés en semis direct en troisième campagne (2018/19), due principalement aux effets cumulatifs des semis direct à long terme, ce qui confirme que le semis direct à long terme améliore les propriétés physico-chimiques du sol (**Figure 46**). Aussi la **figure 46** montre qu'il y a une différence visible entre les deux modes de travail du sol pour les quatre cultures. Les parcelles de blé, triticales, lentille et pois fourrager conduites en semis direct sont caractérisées par des valeurs de MO, Da et Rp élevées. Tandis que les parcelles de blé, triticales, lentille et pois fourrager soumise en travail conventionnel sont caractérisées par des valeurs de porosité et de pH élevées.

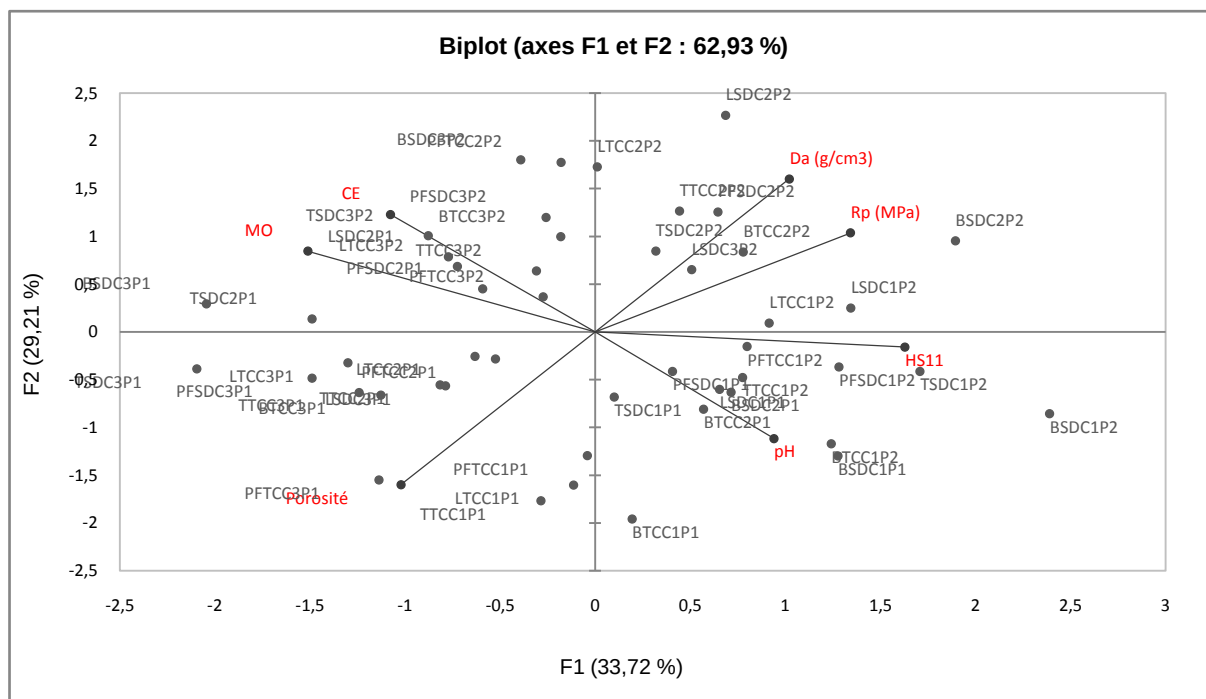


Figure 46 : Représentation temporelle évolutive des variables mesurées, par rapport aux traitements étudiés sur le plan formé par les axes 1 et 2 de l'ACP. (*pH* : potentiel hydrogène, *MO* : matière organique, *CE* : conductivité électrique, *Da* : densité apparente, *Rp* : résistance à la pénétration, *HS11* : humidité après la récolte)

Conclusion

D'après nos résultats, le système de travail du sol et la succession des cultures affectent les propriétés hydriques et physico-chimiques du sol en zone semi-aride de l'Est d'Algérie cas de la région de Sétif.

Le profil hydrique révèle que le stockage d'humidité dans le sol était élevé en technique de semis direct que dans le travail conventionnel. L'importance de la conservation d'humidité en semis direct est apparue dans les stades de croissance critiques des cultures (épiaison-floraison et la formations des graines), au moment et en post-récolte ; où le système semis direct a laissé le sol relatif plus humide qu'en travail conventionnel. Egalement pour l'inclusion des légumineuses dans la rotation des cultures, qui a favorisé la rétention de l'humidité du sol, surtout lorsque celles-ci sont combinées à la technique de semis direct.

Les parcelles conduites en labour conventionnel ont une densité apparente et une résistance à la pénétration faible et une porosité totale élevée, par contre les parcelles de semis direct ont un sol compact à faible porosité. Dans ces deux systèmes de travail du sol, la densité apparente et la résistance à la pénétration augmentent suivant la profondeur du sol, au contraire les valeurs de porosité diminuent avec la profondeur. La différence entre les deux systèmes de travail du sol plus visible dans les deux premières couches (0-5 cm et 5-10 cm) que dans la couche profonde (10-15 cm).

En outre, le sol soumis en semis direct a été marqué par un pH faible et une teneur en MO et en azote élevés par rapport aux sols conduits en travail conventionnel Dans le semis direct, le taux de la MO et la teneur en azote diminuent avec l'augmentation de la profondeur,

par contre, les valeurs de pH augmentent en fonction de la profondeur. Tandis qu'en travail conventionnel, les valeurs de la matière organique et de l'azote du sol sont élevées dans la couche profonde (20-40 cm) par rapport à la couche de surface (0-20 cm). L'introduction des légumineuses (Lentille et Pois fourrager) dans le système de culture a permis d'augmenter les pourcentages de la matière organique, de l'azote et de diminuer le pH du sol.

Egalement, le pourcentage dans le sol de chacune de phosphore, de potassium, de magnésium et de calcium est élevé en semis direct par rapport au travail conventionnel. Ces éléments sont faibles en profondeur du sol. L'intégration des légumineuses dans la rotation des cultures avec les céréales a amélioré la concentration de ces éléments dans le sol : phosphore, de potassium et de magnésium. Tandis que les céréales introduites dans la succession des cultures ont amélioré la concentration du calcium et de sodium (Na). La concentration en sodium (Na) s'élève avec la profondeur du sol de manière semblable entre les deux techniques de travail du sol (SD et TC).

L'agriculture de conservation basée sur la technique de semis direct et la rotation culturale (céréale/ légumineuse) semble intéressante dans la zone semi-aride d'Algérie où la sécheresse fréquente et la mauvaise qualité du sol sont des freins de la productivité des cultures, car l'agriculture de conservation améliore la fertilité du sol, améliore leur structure, réduit l'érosion, tout en assurant la durabilité des agro-écosystèmes.

Références bibliographiques

1. **Alhameid A., Singh J., Sekaran U., Ozlu E., Kumar S., Singh S., 2019.** Crop rotational diversity impacts soil physical and hydrological properties under long-term no and conventional-till soils. *Soil Research*, 58 (1) : 84-94.
2. **Al-Kaisi M. M., Yin X., Licht M., 2005.** Soil carbon and nitrogen changes as influenced by tillage and cropping systems in some Iowa soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 105 : 635-647.
3. **Alvarez R. & Steinbach H. S., 2009.** A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crop yield in the Argentine pampas. *Soil and Tillage Research*, 104 : 1-15.
4. **Arshad M. A., Franzluebbers A. J., Azooz R. H., 1999.** Components of surface soil structure under conventional and no-tillage in northwestern Canada. *Soil & Tillage Research*, 53 : 41-47.
5. **Baize D. 2000.** Guide des analyses en pédologie, Paris. 328 p.
6. **Barut Z. B. & Celik I., 2017.** Tillage effects on some soil physical properties in a semi-arid mediterranean region of Turkey. *Chemical Engineering Transactions*, 58 : 217-222.
7. **Bennioui R., 2012.** Agriculture conservation role of moisture and soil organic matter semi-arid. *J. Mater Environ. Sci*, 3 (1) : 91-98. <http://www.jmaterenvironsci.com/Journal/vol3.html>
8. **Bennioui R., Badache F., Regoub A., Bendada H., 2018.** Etude comparative de comportement et de l'adaptation de différents génotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) en zone semi-aride dans l'est de l'Algérie. *Revue Agriculture*, 9 (1) : 16-31.
9. **Bennioui R., Benkherbache N., Belgasmi Z., Mezaache M., 2014.** The impact of conservation tillage in soil quality and yield in semi-arid conditions. Book of proceedings, The Soul of soil and civilization, Ed. Ridvan Kizikaya and Coskum Gülser, Ondokuz Mayıs University, Turkey, pp: 167-172.
10. **Bennioui R., Tayeb-Bey H., Yahiaoui S., Tir C., 2020.** Comparaison des techniques culturales sur l'efficacité d'utilisation de l'eau chez le blé dur en conditions pluviales en zone semi-aride. *Revue*

- des Régions Arides, 46 (1) : 189-194.
[http://www.ira.agrinet.tn/imgcommon/files/publication/Tome%201%20RRA%2046\(1-2020\).pdf](http://www.ira.agrinet.tn/imgcommon/files/publication/Tome%201%20RRA%2046(1-2020).pdf)
11. **Bhattacharyya R., Prakash V., Kundu S., Gupta H. S., 2006.** Effect of tillage and crop rotation on pore size distribution and soil hydraulic conductivity in sandy clay loam soil on the Indian Himalayas. *Soil & Tillage Research*, 86 (2) : 129-140.
 12. **Blanco-Canqui H., Holman J. D., Schlegel A. J., Tatarko J., Shaver T. M., 2013.** Replacing fallow with cover crop in a semi-arid soil : effects on soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 77 (3) : 1026-1034.
 13. **Boudiar R., Alshallash K. S., Alharbi K., Okasha S. A., Fenni M., Mekhlouf A., Fortas B., Hamsi K., Nadjem K., Belagrouz A., Mansour E., Mekhlouf M., 2022.** Influence of tillage and cropping systems on soil properties and crop performance under semi-arid conditions. *Sustainability*, 14 : 11651.
 14. **Bueno J., Amiana C., Hernanz J. L., Pereira J. M., 2006.** Penetration resistance, soil water content, and workability of grasslands soil under two tillage systems. *Transactions of the ASABE*, 49 (4) : 875-882.
 15. **Chen H., Marhan S., Billen N., Stahr K., 2009.** Soil organic carbon and total nitrogen stocks as affected by different land uses in Baden-Württemberg (Southwest Germany). *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 172 : 32-42.
 16. **Costa E. A., Goedert W. J., Sousa D. M.G.D., 2006.** Soil quality under tillage and no-tillage cropping systems. *Pesquisa Agropécuária Brasileira*, 41 : 1185-1191.
 17. **Dam R. F., Mehdi B. B., Burgess M. S. E., Madramootoo C. A., Mehys G. R., Callum I. R., 2005.** Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada. *Soil & Tillage Research*, 84 : 41-53.
 18. **Devkota M., Devkota K. P., Kumar S., 2022.** Conservation agriculture improves agronomic, economic, and soil fertility indicators for a clay soil in a rainfed Mediterranean climate in Morocco. *Agriculture Systems*, 201 : 103470.
 19. **Du C., Li L., Xie J., Effah J., Luo Z., Wang L., 2023.** Long-term conservation tillage increases yield and water use efficiency of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) by regulating substances related to stress on the semi-arid loess plateau of China. *Agronomy*, 13 : 1301.
 20. **Elabbadi O., Benniou R., Khaoui K., Merouche R., Belguet H., 2022.** Comparative study analysis of three tillage technologies on soil and sowing depth of durum wheat. *Journal of EcoAgriTourism*, 18 (2) : 25-30. http://rosita.ro/jeat/archive/2_2022.pdf
 21. **Fan L., McConkey B. G., Luce M. St., Brandt K., 2020.** Rotational benefit of pulse crop with no-till increase over time in a semi-arid climate. *European Journal of Agronomy*, 121 : 126155.
 22. **Ferreras L. A., Costa J. L., Garcia F. O., Pecorari C., 2000.** Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded petrocalcic paleudoll of the southern « Pampa » of Argentina. *Soil & Tillage Research*, 54 : 31-39.
 23. **French R. J., 2016.** Field pea : Agronomy. In : Wrigley C., Corke H., Seetharaman K., Faubion J. (ed.). *Encyclopedia of food grains*, 2nd edition. Oxford, Academic press, pp : 240-250.
 24. **Fu X., Wang J., Sainju U. M., Liu W., 2017.** Soil carbon fractions in response to long-term crop rotation in loess plateau of China. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 81 (3) : 503-513.
 25. **Glab T. & Kulig B., 2008.** Effect of mulch and tillage system on soil porosity under wheat (*Triticum aestivum*). *Soil & Tillage Research*, 99 : 169-178.
 26. **Hao X., Chang C., Lindwall C. W., 2001.** Tillage and crop sequence effects on organic carbon and total nitrogen content in an irrigated Alberta soil. *Soil & Tillage Research*, 62 : 167-169.
 27. **Havlin J. L., Kissel D. E., Maddux L. D., Claassen M. M., Long J. H., 1990.** Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54 : 448-452.

28. Huang G. B., Chai Q., Feng F. X., Yu A. Z., 2012. Effects of different tillage systems on soil properties, root growth, grain yield and water use efficiency of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in arid north west China. *Journal of Integrative Agriculture*, 11 (8) : 1286-1296.
29. Iheshiulo E. M-A., Larney F. J., Hernandez-Ramirez G., Luce M. St. Liu K., Chau H. W., 2023. Do diversified crop rotation influence soil physical health ? A meta-analysis. *Soil & Tillage Research*, 233 : 105781.
30. Jabro J. D., Sainju U. M., Lenssen A. W., Evans R. G., 2011. Tillage effects on dryland soil physical properties in northeastern Montana. *Communication in soil science and plant analysis*, 42 (18) : 2179-2187.
31. Jabro J. D., Sainju U. M., Stevens W. B., Lenssen A.W., Evans R. G., 2008. Long-term tillage frequency effects on dry land soil physical and hydraulic properties. Proceedings of the international soil conservation oranzation conference, Budapest, 15-23. https://www.tucson.ars.ag.gov/isco/isco15/pdf/Jabro%20J_Long-term%20tillage%20frequency.pdf
32. Jabro J. D., Sainju U. M., Stevens W. B., Lenssen A. W., Evans R. G., 2009. Long-term tillage influences on soil physical properties under dryland conditions in northeastern Montana. *Archives of Agronomy & Soil Science*, 55 (6) : 633-640.
33. Jemai I., Ben Aissa N., Ben Guirat S., Ben-Hammouda M., Gallali T., 2013. Impact of three and seven years of no-tillage on the soil water storage, in the plant root zone, under a dry subhumid tunisian climate. *Soil & Tillage Research*, 126 : 26-33.
34. Jena J., Maitra S., Hossain A., Pramanick B., Gitari H. I., Praharaj S., Shankar T., Palai J. B., Rathore A., Mandal T. K., Jatav H. S., 2022. Role of legume in cropping system for soil ecosystem improvement ecosystem service : types, management and benefits. *Nova Science Publishers, Inc*, 415 p.
35. Juhos K., Nugroho P. A., Jakob G., Prettl N., Kotrocó Z., Szigeti N., Szalai Z., Madarász B., 2023. A comprehensive analysis of soil health in indicators in a long-term conservation tillage experiment. *Soil Use and Management*, 00 : 1-15.
36. Karbin S., Alikhani H. A., Sahu P., Mogare B., Mitra B., Viswakarma S., Singh J., Mahajan R., Malviya S., Badole P., Patidar N., Kassam A., 2018. Transformation to conservation agriculture shows reduced soil CO₂ emissions and improved soil aggregate stability in the first season in rain-fed areas in India. <http://dx.doi.org/10.20944/preprints201804.0111.v1>
37. Kaushal S., Sinha A., Jyoti A. K., 2022. Soil fertility and crop yield response to reduced tillage under organic management : A review. *International Journal of Plant Pathology and Microbiology* , 2 (1) : 33-36.
38. Kovács G. P., Simon B., Balla I., Bozóki B., Dekemati I., Gyuricza C., Percze A., Birkás M., 2023. Conservation tillage improves soil quality and crop yield in Hungary. *Agronomy*, 13 : 894.
39. Labad R., 2018. Effets environnementaux du désherbage chimique associé au semis direct : pratiques agricoles et impacts sur les sols des hautes plaines Sétifiennes. Thèse de doctorat, ENSA, El-Harrach, Alger, 104 p.
40. Lipiec J., Kuś J., Słowińska-Jurkiewicz A., Nosalewicz A., 2006. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil & Tillage Research*, 89 : 210-220.
41. Maher H., Moussadek R., Ghanimi A., Zouidi O., Douaik A., Dakak H., Amenjou N. E., Zouahri A., 2022. Effect of tillage and nitrogen fertilization on soil properties and yield of five durum wheat germoplasm in a dry area of Morocco. *Appl. Sci.*, 13 : 910.
42. Maiga A., Alhameid A., Singh S., Polat A., Singh J., Kumar S., Osborne S., 2019. Responses of soil organic carbon, aggregate stability, carbon and nitrogen fractions to 15 and 24 years of no-till diversified crop rotation. *Soil Research*, 57 (2) : 149-157.

43. McVay K. A., Budde J. A., Fabrizzi K., Mikha M. M., Rice C. W., Schlegel A. J., Paterson D. E., Sweeney D. W., Thompson C., 2006. Management effects on soil physical properties in long-term tillage studies in Kansas. *Soil Science Society of America Journal*, 70 (2) : 434-438.
44. Mekhlouf A., Djaidjaa Z., Rouag N., Boutakrabet A., Rouabhi A., Fortas B., 2019. Influence of systems culture and rotation on the soil's and the durum wheat culture in high plains of Algeria. *J. A. H.*, 1 (1) : 5-10.
45. Mekhlouf A., Rouag N., Boukhadra R., Chenni S., Fenni M., Makhlouf M., 2013. Influence of cropping systems on soil properties in semi-arid conditions of Setif, Algeria. *Journal of Agricultural Science and Technology*, A (3) : 653-658.
46. Mielke L. N. & Wilhelm W. W., 1998. Comparisons of soil physical characteristics in long-term tillage winter wheat-fallow tillage experiments. *Soil & tillage Research*, 49 : 29-35.
47. Mina B. L., Saha S., Kumar N., Srivastva A. K., Gupta H. S., 2008. Changes in soil nutrient content and enzymatic activity under conventional and zero-tillage practices. *Agroecosyst.*, 82 : 273-281.
48. Mohammad W., Shah S. M., Shehzadi S., Shah S. A., 2012. Effect of tillage, rotation and crop residues on wheat crop productivity, fertilizer nitrogen and water use efficiency and soil organic carbon status in dry area (rainfed) of north-west Pakistan. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12 (4) : 715-727.
49. Mondal S., Chakraborty D., Aggarwal P., Das T. K., 2023. Conservation agriculture augments water uptake in wheat : Evidence from modelling. *Int. Agrophys*, 37 (1) : 89-99.
50. Mouelhi B., Slim S., Arfaoui S., Boussalmi A., Jarrahi T., Ben Jeddi F., 2016. Impact de la rotation culturale et de mode de semis sur les composantes physico-chimiques du sol et analyse de l'évolution des mycorhizes. *International Multilingual Journal of Science and Technology (IMJST)*, 1(2) : 71-81.
51. Mrabet R., Moussadek R., Fadlaoui A., Ranst E. V., 2012. Conservation agriculture in dry areas of Morocco. *Field Crops Research*, 132 : 84-94.
52. Mrabet R., Saber N., El-Brahli A., Lahlou S., Bessam F., 2001. Total, Particulate organic matter and structural stability of a calcixeroll soil under different wheat rotations and tillage systems in semi arid area of Morocco. *Soil & Tillage Research*, 57 : 225-235.
53. Mtyobile M., Muzanguva L., Mnkeni P. N. S., 2020. Tillag and crop rotation effects on soil carbon and selected soil physical properties in haplic Cambisol in eastern cap, South Africa. *Soil & Water Research*, 15 (1) : 47-54.
54. Munkholm L. J., Heck R. J., Deen B., 2013. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. *Soil Till. Res.*, 127 : 85-91.
55. Naorem A., Jayaraman S., Sinha N. K., Mohanty M., Chaudhary R. S., Hati K. M., Mandal A., Thakur J. K., Patra A. K., Srinivasarao Ch., Chaudhari S. K., Dalal R. C., Lal R., 2023. Eight year impacts of conservation agriculture on soil quality, carbon storage, and carbone emission foot print. *Soil & Tillage Research*, 232 : 105748.
56. Nath C. P., Dutta A., Hazra K. K., Praharaj C. S., Kumar N., Singh S. S., Singh U., Das K., 2023. Long-term impact of pulses and organic amendmants inclusion in cropping system on soil physical and chemical properties. *Scientific Reports*, 13 (1) : 6508.
57. Neugschwandtner R. W., Száková J., Pachtrog V., Tlustoš P., Kulhanek M., Černý J., Kaul H-P., Wagentristl H., Moitzi G., Euteneuer P., 2022. Exchangeable and plant available macronutrients in a long-term tillage and crop rotation experiment after 15 years. *Plants*, 11 : 565.
58. Nleya T. & Rickertsen J., 2011. Seeding rate and variety effects on yield, yield components, and economic return of field pea in the northern Great plains. *Crops management*, 10 (1): 0. <https://doi.org/10.1094/CM-2011-0221-01-RS>

59. **Obour A. K., Holman J. D., Simon L. M., Assefa Y., 2023.** No-tillage and nitrogen fertilization on soil chemical properties under dryland wheat-sorghum-fallow rotation. *Agroecosystems, Geosciences and Environment*, 6 (1) : e20330.
60. **Page K. L., Dang Y. P., Dalal R. C., 2020.** The ability of conservation agriculture to conserve soil organic carbon and the subsequent impact on soil physical, chemical and biological properties and yield. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4 : 31.
61. **Pala M., Harris H. C., Ryan J., Makboul R., Dozom S., 2000.** Tillage systems and stubble management in a mediterranean- type environment in relation to crop yield and soil moisture. *Expl. Agric.*, 33 : 223-242.
62. **Papini R., Valboa G., Piovanelli C., Brandi G., 2007.** Nitrogen and phosphorus in a loam soil of central Italy as affected by 6 years of different tillage systems. *Soil & Tillage Research*, 92 : 175-180.
63. **Parida P. K., Satapathy A. S., Swain S. M., 2023.** Conservation agriculture : Strategie for soil erosion and water conservation. In Pawar A. R., Patil M., Baliyan A., Gite D. P., Novel approaches in agronomy and plant science, EPH, New Delhi, pp : 150-165.
64. **Pereira J. O., Siqueira J. A. C., Uribe-Opazo M. A., Silva S. D. L., 2002.** Soil penetration resistance as a function of tillage system and soil water content. *Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental*, 6 : 171-174.
65. **Rosolem C. A. & Calonego J. C., 2013.** Phosphorus and potassium budget in the soil-plant system in crop rotation under no-till. *Soil & Tillage Research*, 126 : 127-133.
66. **Rouabhi A., Hafsi M., Monneveux P., 2019.** Climate change and farming systems in the region of Setif (Algeria). *J. A. E. I. D.*, 113 (1) : 79- 95.
67. **Saber N. & Mrabet R., 2002.** Influence du travail du sol et des rotations de cultures sur la qualité d'un sol argileux gonflant en milieu semi-aride marocain. *Etude et Gestion des Sols*, 9 (1) : 43-53.
68. **Salem H. M., Ali A. M., Wu W., Tu Q., 2021.** Initial effect of shifting from traditional to no-tillage on runoff retention and sediment reduction under rainfall simulation. *Soil Research*, 60 (6) : 547-560.
69. **Semenikhina Y., Kambulov S., Podlesniy D., Vladimirova T., Belousova S., 2021.** The efficiency of the system tillage during of the cultivation crops. In E3S Web of Conferences, 273 : 05011. EDP Sciences. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2021/49/e3sconf_interagromash2021_05011/e3sconf_interagromash2021_05011.html
70. **Smettem K. R. J., Rovira A. D., Wace S. A., Wilson B. R., Simon A., 1992.** Effect of tillage and crop rotation on the surface stability and chemical properties of a red-brown earth (Alfisol) under wheat. *Soil & Tillage Research*, 22 : 27-40.
71. **Sombrero A., Benito A. D., 2010.** Carbon accumulation in soil ten-year study of conservation tillage and crop rotation in a semi-arid area of Castil-Leon, Spain. *Soil & Tillage Research*, 107 (2) : 64-70.
72. **Sosibo N. Z., Muchaonyerwa P., Dube E., Tsilo T. J., 2022.** Soil carbon and phosphorus after 40 years of contrasting tillage and straw management in dryland wheat production under semi-arid temperate climate. *Land*, 11 : 1305.
73. **Tedonc L., Verdini L., De Mastro G., 2023.** Effects of different types of soil management on organic carbon and nitrogen contents and the stability index of a durum wheat-Faba bean rotation under a mediterranean climate. *Agronomy*, 13 : 1298.
74. **Thomas G. A., Dalal R. C., Standley J., 2007.** No-till effects on organic matter, pH, cation exchange capacity and nutrient distribution in a luvisol in the semi-arid subtropics. *Soil & Tillage Research*, 94 : 295-304.
75. **Tigka E., Beslemes D., Rakabouki I., Vlachos-Stergios D., Roussis I., Danalatos N., 2023.** Effect of lentil cover cropping on soil hydraulic properties and subsequent crop productivity in two

soil types in central Greece. Bulletin of university of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. *Horticulture*, 79 (1) : 1-7.

76. Toth M., Stumpp C., Klik A., Strauss P., Mehdi-Schulz B., Liebhard G., Strohmeier S., 2024. Long-term effects of tillage systems on soil health of a silt loam in lower Austria. *Soil & Tillage Research*, 241 : 106120.

77. Van Eerd L. L., Congreves K. A., Hayes A., Verhallem A., Hooker D. C., 2014. Long-term tillage and crop rotation effects on soil quality, organic carbon, and total nitrogen. *Can. J. Soil Sci.*, 94 : 303-315.

78. Voisin A.-S., Cellier P., Jeuffoy M.-H., 2015. Fonctionnement de la symbiose fixatrice de N₂ des légumineuses à graines : Impacts agronomiques et environnementaux. *Innovations Agronomiques*, 43 : 139-160.

79. Wiese J. D., Labuschagne J., Agenbag G. A., 2016. Soil water and mineral nitrogen content as influenced by crop rotation and tillage practice in the swartland subregion of the western cape. *South African Journal of Plant & Soil*, 33 (1) : 33-42.

80. Woźniak A. & Soroka M., 2018. Effect of crop rotation and tillage systems on the weed infestation and yield of spring wheat and on soil properties. *Applied Ecology and Environment Research*, 16 (3) : 3087-3096.

81. Wright A. L. & Hons F. M., 2005. Tillage impacts on soil aggrégation and carbon and nitrogen sequestration under wheat cropping sequences. *Soil & Tillage Research*, 84 : 67-75.

82. Yuan J., Sadiq M., Rahim N., Tahir M. M., Liang Y., Zhuo M., Yan L., Shaheen A., Mahmood B., Li G., 2023. Changes in soil properties and crop yield under sustainable conservation tillage systems in spring wheat agroecosystems. *Land*, 12 : 1253.

Chapitre VI : La variabilité des rendements et de la rentabilité économique des cultures (blé, triticales, lentille et pois fourrager) en fonction du type de travail du sol et de précédent cultural en zone semi-aride d'Algérie.

Une partie des résultats présentés dans ce chapitre a été publiée dans la revue Fourrages (https://afpf-asso.fr/_old/revue/non-thematique-268?a=2354), et la revue Agricultural Science Digest (Doi 10.18805/ag.DF-438)

Résumé

Une expérience en champ a été réalisée à l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Sétif pour évaluer l'effet du système de travail du sol et les précédents culturaux sur les paramètres morphologiques, agronomiques et la rentabilité économique des cultures de blé, de triticales, de lentille et de pois fourrager et ce sur trois campagnes agricoles (2016/17, 2017/18 et 2018/19). Toutes les cultures de la succession culturale ont enregistré un poids de mille grains (PMG) et un rendement en grains plus élevés en deuxième campagne (2017/18). Les cultures céréalières (blé et triticales) ont enregistré un PMG élevé dans les parcelles sous la gestion conventionnelle, tandis que les légumineuses (lentille et pois fourrager) ont des PMG élevés dans les parcelles en semis direct (SD). Le rendement en grains des quatre cultures était plus élevé dans les parcelles en SD que celles en travail conventionnel (TC). Du point de vue économique, l'étude a montré que les meilleurs résultats ont été enregistrés pour les cultures en SD pour l'ensemble des précédents culturaux par rapport à celles en TC. L'étude a montré que la diversification des cultures par la rotation sous la gestion de SD est plus productive et rentable que les techniques conventionnelles.

Mots clé : semis direct, labour, rentabilité, rendement, succession culturale, semi-aride.

Introduction

Les précipitations irrégulières et mal réparties, la sécheresse printanière fréquente ainsi que les sols à faible fertilité sont des principales contraintes abiotiques qui menacent la productivité des cultures dans la zone semi-aride d'Algérie. En y ajoutant également des contraintes d'ordre agro-techniques telles que le labour, la jachère nue et la monoculture céréalière qui sont des pratiques inappropriées pour les sols des zones semi-arides et qui causent une grave diminution des rendements des cultures.

Le travail conventionnel du sol perturbe la structure du sol et augmente le risque de ruissellement et l'érosion du sol (**Martínez et al., 2008**), entraînant ainsi une perte de fertilité du sol. De plus, la monoculture est souvent associée à plusieurs inconvénients comme une augmentation des populations de mauvaises herbes, une grande prolifération des ravageurs et des maladies, et une utilisation moins efficace de l'eau et des nutriments, qui peuvent tous réduire le rendement des cultures (**Lithourgidis et al., 2006**). De même, le système blé/jachère a connu plusieurs problèmes, notamment une forte érosion due aux vents, des infestations accrues par les parasites, des coûts de production élevés, ainsi que des rendements réduits et une faible rentabilité (**Bewick et al., 2008**).

Par conséquent, l'adoption de pratiques agricoles qui s'adaptent bien aux conditions météorologiques contraignantes de la région semi-aride d'Algérie et qui permettent de

maintenir la fertilité du sol, de diminuer l'érosion éolienne et hydrique et d'améliorer la productivité des cultures est nécessaire.

L'agriculture de conservation, basée sur le non-perturbation du sol (semis direct), la diversification des cultures par la succession culturale et la conservation des résidus de culture à la surface du sol, est apparue comme une alternative prometteuse à l'agriculture conventionnelle pour restaurer la fertilité du sol, augmenter la conservation de l'eau, améliorer la productivité et la rentabilité économique des cultures, tout en maintenant la durabilité environnementale (**De Cárcer et al., 2019**).

La combinaison de semis direct avec la rotation des cultures a tendance à augmenter le rendement des cultures (**Su et al., 2021**). Selon **Jalli et al. (2021)**, une rotation de cultures diversifiée a amélioré le rendement du blé de 30 % en semis direct par rapport à la monoculture. L'augmentation du rendement des cultures dans une rotation de cultures diversifiée, y compris des légumineuses, est essentiellement due à une utilisation plus efficace de l'eau et de l'azote (**Lensen et al., 2020**). De plus, le semis direct contribue à l'augmentation du rendement des cultures par l'accroissement de la disponibilité en eau du sol pour la plante et la réduction de l'évaporation (**Schlegel et al., 2018**).

Les pratiques agricoles comme la rotation des cultures et l'intensité du travail du sol sont connues pour leurs effets sur le rendement économique des systèmes de production (**Dayananda et al., 2021**). **Jat et al. (2014)** et **Falcone et al. (2019)** ont souligné que l'application de diverses techniques de travail du sol peut affecter le niveau de rentabilité en raison de la différenciation des cultures et des coûts de production. Selon **Singh et al. (2021)** ; **Erenstein et al. (2012)** et **Saak et al. (2021)**, les coûts de production totaux dans le système de semis direct étaient inférieurs à ceux du travail conventionnel en raison de la suppression des opérations de labour, ce qui réduit les dépenses en mains d'œuvres, en machines et en carburant. En outre, la rotation biennale céréale/jachère travaillée, où le sol est labouré au printemps et laissé au repos jusqu'à l'automne, puis retravaillé et ensemencé, semble avoir des coûts supplémentaires par rapport au semis direct (**Rouabhi et al., 2019a**).

Une diversification des cultures à base de rotation augmente la rentabilité économique par rapport à une rotation simple ou à une monoculture (**Dayananda et al., 2021**), car la monoculture a produit des rendements plus faibles et était sujette aux fluctuations des précipitations de la campagne agricole, avec des coûts de production totaux très élevés, ce qui a fourni une faible rentabilité (**Bewick et al., 2008**).

Néanmoins, la productivité et la rentabilité économique des cultures (céréales ou légumineuses) conduites en pluvial dans la zone semi-aride d'Algérie sont faibles et affectées par les variations climatiques (températures extrêmes et sécheresse) et par les aspects techniques (travail du sol traditionnel).

Dans le but de maximiser le rendement en grains et la rentabilité économique des cultures, nous avons étudié l'effet du type de travail du sol (semis direct et travail conventionnel) dans quatre successions culturales sur la production et la rentabilité économique des cultures de blé, triticale, lentille et pois fourrager dans des conditions agro-

climatiques contraignantes de la région semi-aride d'Algérie. L'objectif était d'identifier la technique culturale la plus pertinente à long terme, pour répondre au mieux aux objectifs de l'agriculture de la zone d'étude.

II. Matériels et Méthode

II.1. Localisation de l'essai

Les essais expérimentaux ont été menés au cours de trois campagnes agricoles (S1 = 2016/17, S2 = 2017/18 et S3 = 2018/19), au niveau de la ferme expérimentale de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Sétif, située à 4 km au sud-ouest de la ville de Sétif, sur le lieu dit R'Mada (**Figure 01**). Les coordonnées géographiques du lieu sont : une altitude de 962 m, une latitude de 36°08' Nord et une longitude de 5°20' Est. La région d'étude appartient à l'étage bioclimatique semi-aride central, caractérisé par des hivers froids et pluvieux et des étés chauds et secs, avec une pluviométrie irrégulière d'une moyenne de 400 mm/an (**Rouabhi et al., 2018**).



Figure 01 : Emplacement de la parcelle d'étude (source google earth, 2022)

II.2. Caractéristiques pédoclimatiques du site

II.2.1. Caractéristiques intrinsèque du sol

Avant la mise en place de l'essai et afin de déterminer les principales propriétés qui caractérisent le sol de l'essai, une série d'analyses a été réalisée sur un échantillon issu d'un mélange de cinq prélèvements de sol effectués à l'aide d'une tarière, suivant les diagonales de la parcelle, à deux profondeurs : 0-20 cm et 20-40 cm. Les analyses ont été effectuées au laboratoire de pédologie de l'université de M'sila.

L'analyse de la composition physico-chimique du sol indique: une structure limono-argileuse à pH faiblement alcalin, un sol pauvre en matière organique, une teneur modérée en calcaire, en potassium et en magnésium, une teneur moyenne en azote, une faible teneur en sodium et une bonne teneur en phosphore (**Tableau 1**).

Tableau 1: Caractéristiques physico-chimiques du sol de site de l'expérimentation

Paramètres	Profondeur: 0-20 cm	Profondeur : > 20 cm
Distribution Granulométrique		
<0,002 mm (Argile) (%)		26 %
0,002-0,05 mm (Limon) (%)		32 %
> 0,05 mm (Sable) (%)		42 %
Matière organique (MO) (%)	2,21	1,17
Azote (N) (%)	0,22	0,12
C/N ratio	12,21	5,67
pH eau	07,8	7,84
CE (ms/cm)	0,21	0,19
CaCO ₃ (%)	5,64	6,69
Phosphore (P) (p.p.m)	42	13,8
Potassium (K) (meq/100 g)	0,55	0,5
Magnésium (Mg) (meq/100 g)	2,9	2,9
Calcium (Ca) (meq/100 g)	43,8	43,6
Sodium (Na) (meq/100 g)	0,3	0,15

II.2.2. Caractéristiques climatiques

Les conditions climatiques des campagnes agricoles durant lesquelles s'est déroulée l'expérimentation sont mentionnées dans **le tableau 2**.

- **Les précipitations:** la comparaison de la pluviométrie entre les trois campagnes agricoles (2016/17, 2017/18, 2018/19) a montré une importante variabilité annuelle des précipitations. La campagne 2017/18 a été pluvieuse avec un cumul de précipitations de 419,40 mm. La campagne 2016/2017 a été considérée comme année sèche, avec un cumul inférieur à 200 mm (195.40 mm). Alors, lors de la campagne 2018/19, le cumule pluviométrique s'est élevé à 356.20 mm. D'après **Touitou & Abulquasem (2018)**, l'Algérie connaîtra une réduction des précipitations de l'ordre de 5 à 13 % à l'horizon de 2020.

- **Les températures** ont été plus basses au cours de la deuxième et la troisième année d'étude, et les amplitudes sont plus fortes la troisième année. Les températures saisonnières extrêmes ont un effet négatif sur le développement des cultures (**Rouabhi et al., 2019b**). Selon **Sivakumar et al. (2013)**, en Algérie la température moyenne devrait augmenter de 1,2 °C-1,8 °C d'ici 2050.

Tableau 2: Conditions climatiques des trois campagnes agricoles au niveau de la région semi-aride de Sétif.

Campagnes	Mois										
	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Jun	
	Précipitation (mm)										Total
2016/2017	12,00	14,90	29,70	07,20	46,90	13,82	0,00	05,90	09,20	55,50	195,12
2017/2018	41,00	10,70	55,70	33,50	13,90	23,20	90,20	81,30	51,90	17,80	419,40
2018/2019	25,00	63,70	25,70	10,80	77,10	15,10	24,00	43,80	12,40	58,60	356,20
	Température (c°)										Moy
2016/2017	20,85	18,51	10,54	07,71	04,28	08,26	10,26	11,59	19,59	24,47	13,61
2017/2018	20,90	15,95	09,45	05,28	06,43	03,43	08,86	11,21	15,40	20,78	11,77
2018/2019	28,40	14,10	09,55	07,25	03,60	05,49	10,00	12,15	14,49	28,80	13,38

II.3. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé pour cette expérimentation est constitué de plusieurs espèces : le blé dur, le triticales, la lentille et le pois fourrager. Les caractéristiques de ces

espèces sont présentées dans le **tableau 3**. Le taux de germination a été mesuré au laboratoire du Centre National de Contrôle et de Certification des semences et des plants (CNCC) à Sétif.

Tableau 03: Caractéristiques des espèces incluant dans la rotation

Caractère	Pois fourrager	Blé	Triticale	Lentille
Nom de la variété	Sefrou	Bousselam	Clercal	Syrie 229
PMG (g)	88,20	39,4	39,28	45,0
Taux de germination*	90 %	90 %	91 %	88 %

II.4. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental adopté est un strip-plot ou nommé split-block, organisé en blocs aléatoires complets avec trois répétitions. Chaque parcelle élémentaire fait 50 m de longueur sur 10 m de largeur, avec un espace de 5 m entre les blocs et de 2 m entre les parcelles (**Figure 02**). Le premier facteur comporte deux modalités: le semis direct (aucun travail du sol préalable, le semis direct avec un semoir spécial de type John Shearer) et le travail conventionnel (labour à 30 cm de profondeur avec une charrue à soc, suivi d'un passage de cover-crop et d'un hersage). Le deuxième facteur correspond aux rotations culturales, réparties de manière aléatoire dans chaque bloc, avec trois répétitions. La densité de semis est estimée à 300 graines/m² pour les céréales et 250 graines/m² pour les légumineuses. Les successions culturales testées sont les suivantes :

- Campagne 2016/17 : blé/blé, blé/triticale, blé/lentille et blé/pois fourrager.
- Campagne 2017/18 ; blé/blé/lentille, blé/triticale/pois fourrager, blé/lentille/blé et blé/pois fourrager/triticale.
- Campagne 2018/19 : blé/blé/lentille/triticale, blé/triticale/pois fourrager/blé, blé/lentille/blé/pois fourrager, blé/pois fourrager/triticale/lentille.

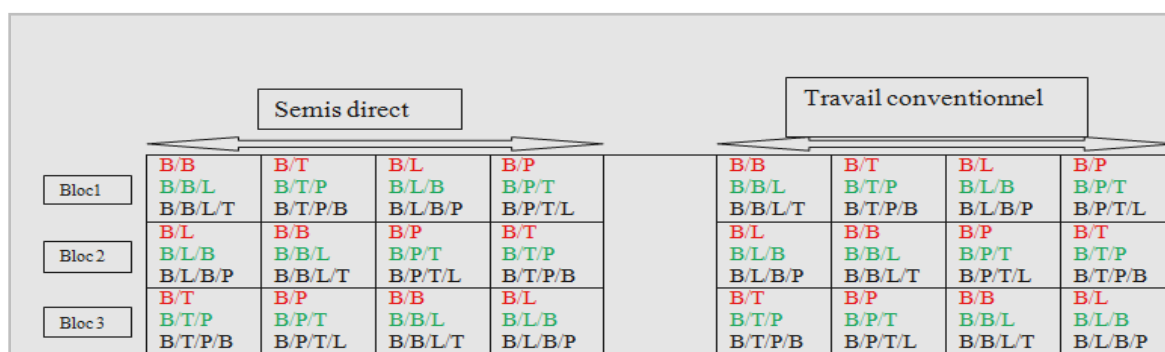


Figure 02: Schéma représentatif du dispositif expérimental adopté lors des trois campagnes d'étude (2016/17 en rouge, 2017/18 en vert, 2018/19 en noir).

➤ **Itinéraires techniques :** pour le semis direct, aucune préparation du sol n'a été réalisée (travail zéro) ; concernant le travail conventionnel, un labour profond de 30 cm à l'aide d'une charrue à soc a été effectué, suivi d'un passage de cover-crop et d'un hersage. Le semis a été

réalisé fin décembre pour les trois campagnes et pour toutes les cultures dans les deux modalités de travail du sol.

II.5. Entretien des cultures

II.5.1. Fertilisation du sol

L'épandage d'engrais de fond, du triple superphosphate (TSP 46%) (0, 46, 0) à raison de 100 kg/ha, a été effectué manuellement juste avant la mise en place des cultures, en technique conventionnelle. En semis direct, il a été réalisé en même temps que l'opération de semis. L'épandage d'engrais de couverture sous forme d'urée 46% a été effectué mécaniquement en deux fractions : la première au stade trois feuilles à raison de 40 kg et la deuxième au stade épi un centimètre à raison de 60 kg (soit 27.5 unités d'azote) (réalisé uniquement pour le blé et le triticales).

II.5.2. Désherbage

Afin d'éliminer l'ensemble des mauvaises herbes de l'essai, l'opération de désherbage a été effectuée en deux passages pour le système semis direct et en un seul passage pour le système conventionnel. Le désherbage en post-émergence concerne les céréales seulement (**Tableau 04**).

Tableau 4 : Désherbage chimique de l'essai

Système	Herbicide utilisé	Dose	Stade
Semis direct	Herbicide total: Glyphosate	3 litres/ha	Avant semis
	Double action: Topik/Zoom	0.75 litre/ha et 150 g/ha	Post émergence
travail conventionnel	Double action: Topik/Zoom	0.75 litre/ha et 150 g/ha	Post émergence

II.6. Paramètres étudiés

1) Paramètres agronomiques

Toutes les variables relatives à la culture ont été déterminées sur la base des mesures faites sur un échantillon de végétation d'un mètre linéaire avec trois répétitions pour chaque parcelle élémentaire, puis les chiffres obtenus ont été ramenés au mètre carré (**Figure 03**).



Figure 03 : Schéma de fixation des stations de notation

➤ **Nombre de plantes levées par m² (NPM) :** Ce caractère a été déterminé au stade trois feuilles (pour les céréales) et stade jeune plante (pour les légumineuses), en comptant le nombre de pieds par les 3 mètres linéaires. La valeur obtenue est rapportée au mètre carré.

- **Nombre de talles par mètre carré (NTM) :** Le nombre de talles herbacées est déterminé lorsque le stade tallage est atteint (plein tallage) pour le blé et triticales, en comptant le nombre de talles sur les trois mètres linéaires. La valeur obtenue est rapportée au mètre carré.
- **Nombre de ramifications primaires (R_p) :** Le nombre de ramifications primaires est déterminé au stade ramification de la lentille et du pois fourrager, sur un échantillon de 20 plantes pour chaque espèce.
- **Nombre d'épis par mètre carré (NEM) :** Le dénombrement se fait en stade épiaison par le comptage du nombre d'épis sur les trois mètres linéaires. La valeur obtenue est rapportée au mètre carré.
- **Nombre de fleurs par plante (FP) :** Au stade de pleine floraison de la culture de la lentille et du pois fourrager, 20 plantes ont été choisies au hasard dans chaque parcelle élémentaire.
- **Nombre de gousses par plante (NGP) :** le dénombrement se fait par le comptage du nombre de gousses sur un échantillon de 20 plantes de lentille et du pois fourrager.
- **Nombre de grains par épi (NGE) :** Il a été déterminé par le comptage du nombre de grains par épi sur un échantillon de 20 épis pour chaque parcelle élémentaire de blé et triticales.
- **Nombre de grains par gousse (NGG) :** Il a été déterminé par le comptage du nombre de grains par gousses sur un échantillon de 20 gousses choisi au hasard de la lentille et du pois fourrager.
- **Poids de mille grains (PMG) (g) :** Il est estimé sur la base d'un comptage et pesage de 250 graines par parcelle élémentaire pour chaque espèce.
- **Rendement réel en grain (RR) (q/ha) :** Les grains de chaque espèce récoltée ont été pesés puis rapportés à l'hectare.
- **Biomasse aérienne à la récolte (BM) (q/ha) :** A la récolte, toute la partie aérienne de chaque espèce a été pesée. La valeur obtenue a été rapportée à l'hectare.
- **Rendement en paille (RP) (q/ha) :** Après avoir déterminé la biomasse aérienne, les pieds ont été débarrassés des épis puis pesés. La valeur obtenue a été rapportée à l'hectare.
- **Indice de récolte (IR) :** Il a été calculé selon la formule suivante :

$$IR = \text{Rendement en grains (RR)} / \text{Biomasse aérienne (BM)}$$

2) Les paramètres morphologiques

Les paramètres morphologiques ont été déterminés sur 20 échantillons pour chaque espèce en plein champ et sur pieds.

- **Hauteur de la tige (HT) :** Elle a été déterminée en mesurant la distance de la base de la tige jusqu'à celle de l'épi.
- **Hauteur de la plante (HP) :** Elle a été déterminée en mesurant la distance de la base du sol jusqu'à la plus longue ramification (au stade plein floraison).
- **Longueur de l'épi (LE) :** Nous avons mesuré cette longueur à partir de la base de l'épi jusqu'au dernier épillet (en cm).
- **Longueur de gousse (LG) :** Nous avons mesuré cette longueur à partir d'un échantillon de 20 gousses par bloc dans chaque traitement.

➤ **Longueur des barbes (LB)** : Elle a été déterminée par la mesure de la distance entre l'extrémité de l'épi et celle des barbes (en cm).

➤ **La longueur des racines (LSR) (en cm)**: Au stade floraison de chaque culture (blé, triticale, lentille et pois fourrager), 20 plantes ont été prélevées au hasard dans chaque parcelle élémentaire. Après lavage, la longueur des racines a été mesurée à l'aide d'un papier millimétré.

➤ **Nombre total de nodules (Nn_t), nodules actifs (Nn_a) et nodules inactifs (Nn_i)** : Au stade de pleine floraison, dans chaque parcelle élémentaire, 20 plantes ont été coupées délicatement à la base de la tige, puis, après lavage, les racines ont été observées sous loupe pour noter le Nn_t et le Nn_a (coloration rose). Le nombre de nodules inactifs est obtenu par la différence entre le Nn_t et le Nn_a :

$$Nn_i = Nn_t - Nn_a.$$

3) Paramètres physiologiques

Les paramètres physiologiques ont été mesurés uniquement pour le blé et le triticale.

a) Teneur relative en eau (TRE) (en %)

La teneur relative en eau (TRE, en %) est déterminée sur la feuille étandard par la méthode décrite par **Barrs & Weatherly (1962)**. Cinq feuilles de chaque parcelle élémentaire sont prélevées à la base du limbe et pesées immédiatement à l'aide d'une balance de précision pour obtenir le poids frais (PF). Les feuilles sont ensuite placées dans des tubes à essai contenant de l'eau distillée et mises à l'obscurité. Après 24 heures, les feuilles sont pesées de nouveau, après avoir pris soin d'essuyer l'eau restante en surface avec du papier buvard, pour obtenir le poids turgide (PT). Enfin, les feuilles sont mises à l'étuve à 70°C pendant 48h et pesées pour obtenir leur poids sec (PS) (**Figure 04**) (**annexe 04**).

La teneur relative en eau est calculée par la formule de **Pask et al., (2012)** :

$$TRE (\%) = \frac{PF - PS}{PT - PS} \times 100$$



Figure 04 : Images illustrant la mesure de la teneur relative en eau (Photo originale)

b) Teneur en chlorophylle (THC) (en SPAD)

La teneur en chlorophylle totale dans les feuilles a été déterminée à l'aide d'un chlorophylle-mètre numérique (digital) de type SPAD 501, qui fournit des mesures en unités SPAD. Cet appareil est utilisé pour évaluer la teneur en azote des feuilles, car la majeure partie de l'azote est contenue dans la chlorophylle. Le principe repose sur la mesure de la fraction de la lumière transmise par la feuille à deux longueurs d'ondes (650 nm et 940 nm) sur une surface de 2 mm × 3 mm. Sur le limbe de la feuille étandard, nous avons mesuré la teneur

moyenne en chlorophylle totale, à raison de dix plantes pour chaque parcelle élémentaire et pour chaque traitement étudié (**Figure 05**).



Figure 05 : Mesure de chlorophylle par le SPAD (Photo originale)

4) Paramètres économiques

L'analyse de la rentabilité économique des quatre cultures dans les deux modes de gestion du sol est fondée sur le calcul du ratio coûts-bénéfice (RCB). Ce ratio correspond au revenu total divisé par le coût de production total.

$$\text{RCB} = \text{Revenu total (DA)} / \text{Coût de production total (DA)}$$

Le coût de production total a été calculé en tenant compte des dépenses pour les intrants et les opérations agricoles (labour, préparation du lit de semence, semis, fertilisation, désherbage, roulage, récolte). Le revenu a été estimé comme étant le produit du rendement en grains et en paille et du prix annuel moyen payé à l'agriculteur pour chaque campagne agricole.

Le RCB est un indicateur d'analyse financier qui exprime le gain financier total obtenu. L'interprétation du RCB se fait en le comparant à la valeur 1. Nous avons deux cas:

Si le **RCB** > 1, l'activité est économiquement rentable.

Si le **RCA** < 1, l'activité n'est pas économiquement rentable car le producteur gagne moins qu'il s'investit.

II.7. Les analyses statistiques

Les résultats obtenus ont été traités à l'aide du logiciel XLSTAT 2019, selon une analyse de variance basée sur la comparaison des moyennes de Fisher (LSD) (avec un seuil de signification de 5%). Une analyse en composantes principales (ACP) a été effectuée pour étudier les relations entre les différentes de variables.

III. Résultats et Discussion

III.1. Paramètres agronomiques

Dans les cas où l'effet de l'interaction entre le système de travail du sol et l'année est significatif, cela signifie que l'effet du système de travail du sol change selon l'année.

a) Nombre de pieds levés par mètre carré (NPM)

Le nombre de pieds levés (NPM) de blé varie de manière très hautement significative ($P < 0,001$) sous l'effet du système de travail du sol, de l'année et l'interaction entre le système de travail du sol et l'année (**Tableau 05**). Le NPM a diminué de la première année à la troisième année, avec un taux de diminution de 11,67 % entre la première et la deuxième année, et de 47,04 % entre la deuxième et la troisième année. Durant ces trois années d'étude,

le NPM était plus élevé pour la culture de blé conduite en semis direct (SD) avec une moyenne générale de 241,06 plantes/m², comparé à la culture en travail du sol conventionnel (TC) avec une moyenne de 193,56 plantes/m². Selon **Lensen et al. (2020)**, la densité de peuplement à la levée était 37% plus élevée en SD qu'en TC. En technique de SD, le NPM de blé était le plus élevé en deuxième année avec 292,27 plantes/m², et le plus faible en troisième année avec 147,82 plantes/m². Pour le TC, le NPM a diminué de la première année (271,50 plantes/m²) à la troisième année (111,60 plantes/m²) (**Figure 06**). Le système de SD avait un potentiel plus élevé de maintenir l'humidité du sol et, par conséquent, d'améliorer l'émergence des semences de blé comparativement au TC (**Shahrinezhad et al., 2015**).

L'ANOVA a révélé un effet significatif ($P < 0,05$) du système de travail du sol et un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) de l'année sur le NPM de la culture de triticales. L'interaction entre le système de travail du sol et l'année n'a pas d'effet significatif ($P > 0,05$) sur le NPM du triticales (**Tableau 06**). Le NPM a diminué de la première année à la troisième année, passant de 279,23 plantes/m² à 141,91 plantes/m². En première année, le NPM était plus élevé en TC (280,19 plantes/m²) qu'en SD (278,26 plantes/m²). En deuxième et troisième année, la culture de triticales conduite en SD a eu un NPM plus élevé (238,16 plantes/m² ; 162,07 plantes/m² respectivement) comparé à la culture en TC (197,58 plantes/m² et 121,74 plantes/m² respectivement) (**Figure 06**). Le NPM de triticales est globalement plus élevé en technique de non-labour avec une moyenne de 226,17 pieds levés/m², comparé au TC avec une moyenne de 199,84 pieds levés/m². Selon **Woźniak (2022)**, le nombre de plants levés a été plus élevé en TC qu'en SD, ce qui est en contradiction avec nos résultats.

Le tableau 07 a montré que le NPM de la culture de la lentille a varié de manière très hautement significative ($P < 0,001$) sous l'effet du système de travail du sol, de l'année et de manière hautement significative ($P < 0,01$) sous l'effet de l'interaction du système de travail du sol et de l'année. Le NPM de la lentille a diminué de la première année (233,38 plantes/m²) à la troisième année (161,60 plantes/m²). La culture de la lentille en semis direct (SD) a eu un NPM élevé en deuxième campagne (2017/18), tandis que le NPM de la culture de la lentille en travail conventionnel (TC) a diminué de la première à la troisième campagne. Lors des deux premières campagnes agricoles (2016/17 et 2017/18), la culture de la lentille en SD a eu un NPM élevé avec des moyennes respectives de 242,12 plantes/m² et 245,89 plantes/m² comparativement à la culture de la lentille en TC avec des moyennes respectives de 224,64 plantes/m² et 189,37 plantes/m². Cependant, en troisième campagne (2018/19), la culture de lentille en TC a eu un NPM légèrement plus élevé (161,84 plantes/m²) par rapport à la culture de lentille en SD avec une moyenne de 161,35 plantes/m² (**Figure 06**). D'après ces résultats, la culture de la lentille en SD a eu un NPM un peu plus élevé que la culture de la lentille en TC, ce qui est en accord avec les résultats de **Mukherjee et al. (2023)**. Cela s'explique par le fait que les graines de la culture de la lentille en technique de SD sont placées dans une position optimale dans le sol, ce qui favorise une bonne germination et une émergence élevée (**Kumar et al., 2011**).

Le NPM de la culture du pois fourrager a varié de manière hautement significative ($P < 0,001$) sous l'effet de l'année et de manière significative ($P < 0,05$) sous l'effet de l'interaction du système de travail du sol et de l'année. Le système de travail du sol n'a eu aucun effet significatif ($P > 0,05$) sur le NPM de la culture du pois fourrager (**Tableau 08**), ce

qui corrobore les résultats de **Lafond et al. (1992)**. Le NPM a diminué de la première année à la troisième année avec des moyennes respectives de 213,16 plantes/m², 207,49 plantes/m² et 111,83 plantes/m². La grande variabilité du NPM pour la culture de pois fourrager entre les années est probablement due aux variations des conditions environnementales (le stress hydrique, la variation des températures) et à l'effet du précédent cultural qui change d'une campagne à l'autre. Le NPM de la culture de pois fourrager en SD a diminué de la première campagne à la troisième campagne avec des moyennes de 231,16 plantes/m², 207,25 plantes/m² et 100 plantes/m². Le NPM du pois fourrager cultivé en TC est resté élevé en deuxième campagne avec une moyenne de 207,73 plantes/m², suivie par la première et la troisième campagne avec des valeurs de 195,17 plantes/m² et 123,67 plantes/m² respectivement (**Figure 06**). En général, le NPM était supérieur en SD avec une moyenne de 179,47 plantes/m² qu'en TC (175,52 plantes/m²). **Lensen et al. (2018)** ont trouvé que le peuplement de pois fourrager est plus important en technique de non-labour que dans le travail conventionnel. La réduction de la densité du peuplement du pois fourrager en TC est due à une mauvaise préparation du lit de semence ou à une profondeur de semis moins uniforme (**Mohr et al., 2007**).

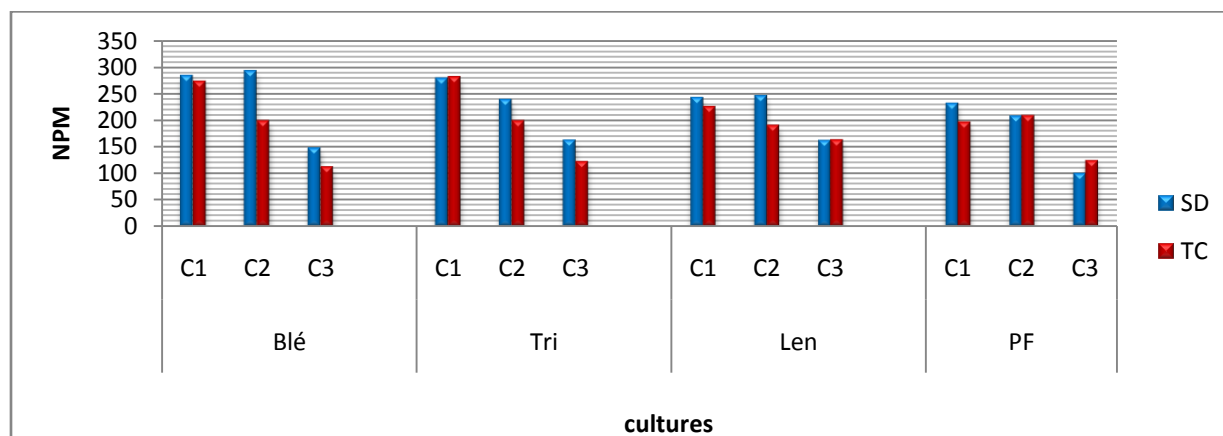


Figure 06 : Nombre de pieds levés par m² (NPM) pour les quatre cultures dans les deux modes de gestion du sol et dans les trois campagnes d'expérimentation. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, Tri : triticales, Len : lentille, PF : pois fourrager.)

b). Nombre de talles par m² (NTM) du blé et triticales

Le nombre de talles par m² (NTM) de la culture de blé dur varie d'une manière très hautement significative ($P < 0,001$) sous l'effet du système de travail du sol, de l'année et de l'interaction entre le système de travail du sol et l'année (**Tableau 05**). le NTM le plus élevé est enregistré lors de la deuxième campagne avec une moyenne de 798,17 talles/m², suivi par la première et la troisième campagne avec des moyennes respectives de 553,62 talles/m² et 226,81 talles/m². La **figure 07** montre que le NTM de la culture de blé conduite en travail conventionnel (TC) diminue de la première campagne à la troisième campagne, avec des moyennes de 525,12 talles/m² et de 187,43 talles/m² respectivement. Pour la culture de blé conduite en semis direct (SD), le NTM le plus élevé est observé lors de la deuxième campagne avec une moyenne de 1173,14 talles/m² et que la valeur la plus faible est enregistrée lors de la troisième campagne avec une moyenne de 266,19 talles/m² (**Figure 07**).

D'après le **tableau 06**, le NTM de la culture de triticales varie de manière significative ($P < 0,05$) sous l'effet du système de travail du sol, et de manière très hautement significative ($P < 0,001$) sous l'effet de l'année. L'effet de l'interaction entre le système de travail du sol et l'année sur le NTM est hautement significatif ($P < 0,01$). Le NTM du triticales est le plus élevé lors de la deuxième campagne avec une valeur de 761,59 talles/m², suivi par la première et troisième campagne avec des moyennes de 467,88 talles/m² et 252,66 talles/m² respectivement. La **figure 07** montre que les deux modes de gestion du sol (SD et TC) ont un NTM plus élevé lors de la deuxième campagne, avec des valeurs de 1000,96 talles/m² et 522,22 talles/m² respectivement. Lors de la première campagne, la culture de triticales conduite en TC a un NTM plus élevé (498,55 talles/m²) que la culture conduite en SD avec une moyenne de 437,20 talles/m². Lors de la troisième campagne, la culture de triticales conduite soit en SD soit en TC, a un NTM plus faible par rapport aux deux autres campagnes, avec des moyennes respectives de 274,39 talles/m² et 230,93 talles/m² (**Figure 07**).

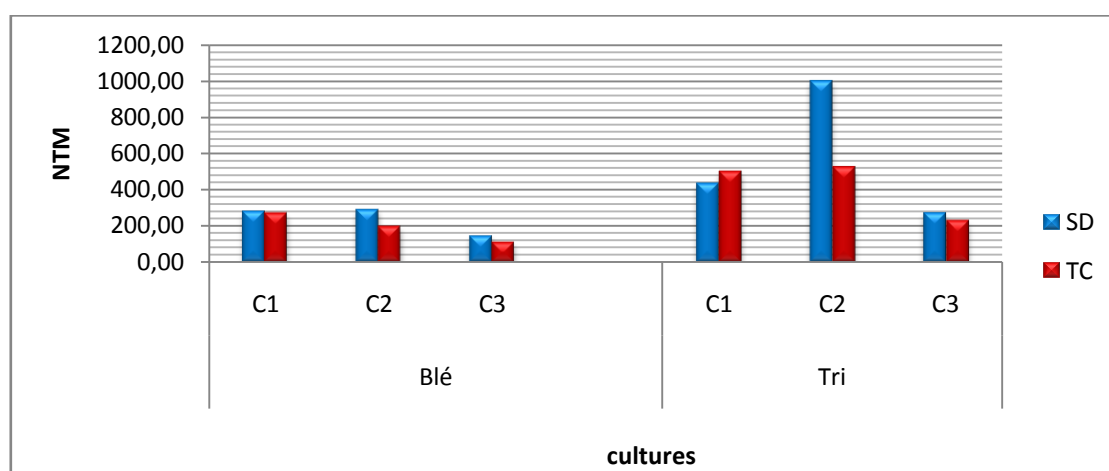


Figure 07 : Nombre de talles par m² (NTM) pour le blé et triticales dans les deux modes de gestion du sol et dans les trois campagnes d'expérimentation. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, Tri : triticales)

c). Nombre de ramifications primaires (R_p) de la lentille et du pois fourrager

Le nombre de ramifications primaires (R_p) de la culture de la lentille varie significativement ($P < 0,05$) sous l'effet de l'année et de l'interaction système de travail du sol et l'année. L'effet du système de travail sur le R_p est non significatif ($P > 0,05$) (**Tableau 07**). Le nombre de R_p est élevé en deuxième campagne avec une moyenne de 2,72 ramifications/plante, suivi par la troisième et la première campagne avec des moyennes respectives de 2,46 ramifications/plante et 2,28 ramifications/plante. Le faible nombre de ramifications primaires en première campagne peut être expliqué par le stress hydrique, comme l'a montré **Choukri et al. (2020)**. Le nombre de R_p de la culture de lentille sous SD augmente de la première campagne à la troisième campagne, avec des valeurs de 2,20 ramifications/plante, 2,70 ramifications/plante et 2,80 ramifications/plante. La culture de lentille conduite en travail conventionnel (TC) a un nombre de ramifications primaires élevé en deuxième campagne avec une moyenne de 2,73 ramifications/plante, suivi par la première campagne avec une valeur de 2,37 ramifications/plante et la troisième campagne avec une valeur de 2,11 ramifications/plante (**Figure 08**). D'une manière générale, le semis direct (SD) favorise la

ramification primaire de la culture de lentille avec une moyenne de 2,57 ramifications/plante, par rapport à la culture de lentille sous travail conventionnel (TC) avec une moyenne de 2,40 ramifications/plante.

D'après le **tableau 08**, le système de travail du sol, l'année et leur interaction n'ont aucun effet significatif ($P > 0,05$) sur le nombre de ramifications primaires/plante de la culture de pois fourrager. Le nombre de R_p du pois fourrager est élevé en deuxième campagne agricole avec une moyenne de 2,23 ramifications/plante, suivi par la première et la troisième campagne avec des valeurs respectives de 2,10 et 1,79 ramifications/plante. Le nombre de R_p de la culture de pois fourrager conduite en TC diminue de la première campagne à la troisième campagne avec des moyennes respectives de 2,23, 2,07 et 1,78 ramifications/plante (**Figure 08**). La culture de pois fourrager conduite en SD a un nombre de R_p élevé en deuxième année (2,40 ramifications/plante) suivie, par la première et la troisième campagne avec des moyennes respectives de 1,97 et 1,80 ramifications/plante (**Figure 08**). Le semis direct (SD) favorise la ramification primaire de la culture de pois fourrager avec une valeur de 2,06 ramifications/plante.

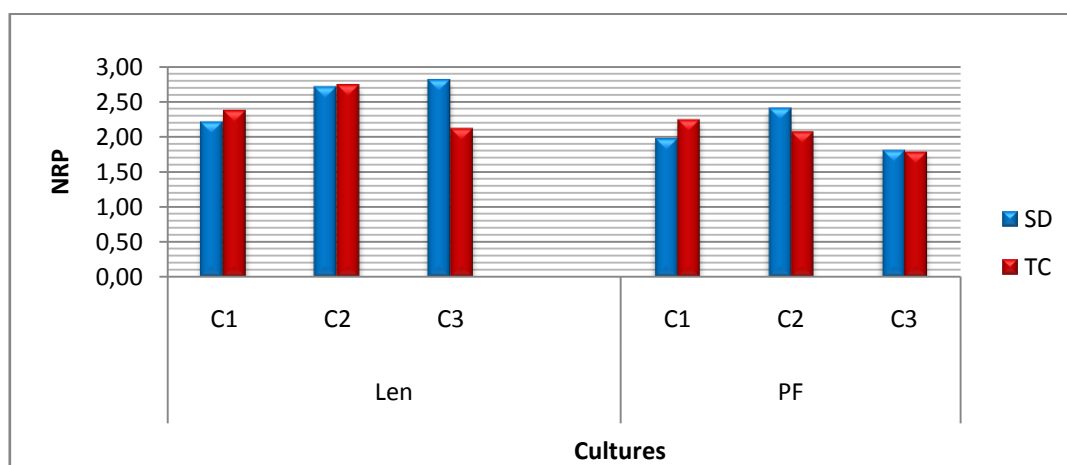


Figure 08 : Nombre de ramifications primaires par plante (NRP) pour la culture de la lentille et du pois fourrager dans les deux modes de gestion du sol et dans les trois campagnes agricoles. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, Len : lentille, PF : pois fourrager)

d). Nombre de fleurs par plante (FP) de la lentille et du pois fourrager

Le **tableau 07** montre que le nombre de fleurs par plante (FP) de la lentille varie de manière très hautement significatif ($P < 0,001$) en fonction de l'année, et de manière hautement significatif ($P < 0,01$) selon le système de travail du sol, ainsi que pour l'interaction entre le système de travail du sol et l'année. Le nombre de FP augmente de la première campagne à la troisième campagne, avec des valeurs respectives de 18,75 ; 24,80 et 57,12 fleurs par plante. Le nombre de fleurs de la lentille, cultivée soit en semis direct (SD), soit en travail conventionnel (TC) augmente également de la première année à la troisième année (**Figure 09**). Lors des première et troisième campagnes, la lentille cultivée en SD affiche un nombre de fleurs élevé (22,07 et 72,80 fleurs par plante, respectivement) comparativement à celle cultivée sous TC, qui présente des valeurs respectives de 15,43 et 41,44 fleurs par plante (**Figure 09**). En deuxième campagne, la lentille cultivée en TC a un

nombre de fleurs par plante plus élevé (25,33 fleurs par plante) par rapport à celle cultivée en SD, qui affiche une valeur de 24,27 fleurs par plante (**Figure 09**).

Concernant le pois fourrager, le système de travail du sol n'a aucun effet significatif ($P > 0,05$) sur le nombre de fleurs par plante. En revanche, l'effet de l'année est très hautement significatif ($P < 0,001$) (**Tableau 08**). Le nombre de fleurs par plante de pois fourrager est plus élevé lors des années humides (deuxième et troisième campagnes), avec des moyennes de 6,03 et 3,39 fleurs par plante, comparativement à la saison sèche (première campagne), qui présente une moyenne de 2,04 fleurs par plante. Au cours des trois campagnes d'étude, la culture de pois fourrager cultivée en SD a un nombre de fleurs par plante plus élevé (2,15 fleurs par plante en 2016/17 ; 6,23 fleurs par plante en 2017/18 et 3,67 fleurs par plante en 2018/19), par rapport à celle cultivée en TC, qui a des valeurs de 1,93 fleurs par plante en 2016/17, 5,83 fleurs par plante en 2017/18 et 3,11 fleurs par plante en 2018/19 (**Figure 09**).

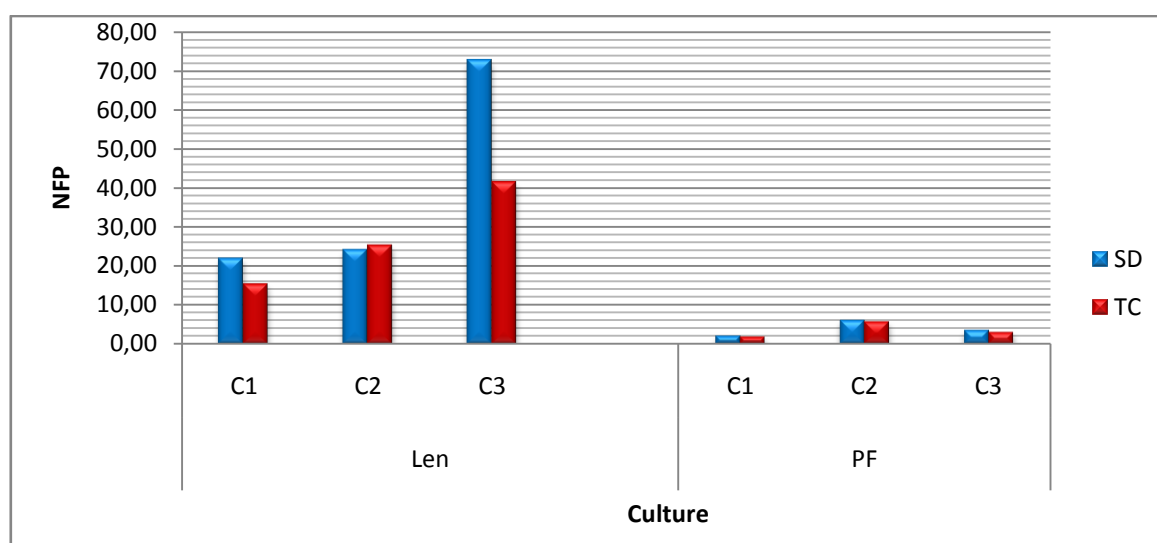


Figure 09 : Nombre de fleurs par plante (NFP) pour la culture de la lentille et du pois fourrager dans les deux modes de gestion du sol et dans les trois campagnes agricoles. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, Len : lentille, PF : pois fourrager)

e). Nombre d'épis par mètre carré (NEM) du blé et du triticale

D'après le **tableau 05**, le système de travail du sol a un effet significatif ($P < 0,05$) sur le nombre d'épis par mètre carré dans la culture de blé. Ainsi, le système de semis direct (SD) a présenté un nombre élevé d'épis (262,31 épis/ m²) comparativement au travail conventionnel (TC), qui affiche un nombre d'épis égal à 221,31 épis/ m². L'effet de l'année sur le nombre d'épis est très hautement significatif ($P < 0,001$). Le plus grand nombre d'épi par mètre carré de blé a été enregistré la deuxième année, avec une valeur de 289,70 épis/ m², tandis que le nombre le plus faible a été observé lors de la troisième campagne, avec une moyenne de 166,18 épis/ m². Au cours des trois années d'étude, la culture de blé conduite en SD a un nombre d'épis élevé par rapport à celle conduite en TC (**Figure 10**). En TC, le nombre d'épis est également élevé lors de la deuxième campagne, avec une valeur de 282,30 épis/m². Le nombre d'épis de blé cultivé en SD a diminué de la première campagne à la troisième, avec des moyennes respectives de 309,66 épis/m² en 2016/17, 297,09 épis/m² en

2017/18 et 180,19 épis/m² en 2018/19 (**Figure 10**). En conclusion, le nombre d'épis de blé était plus élevé en SD (262,31 épis/ m²) qu'en TC (221,31 épis/m²), ce qui corrobore les résultats de **Labad et al. (2022)**. D'après **Djouadi et al. (2021)**, le nombre élevé d'épis de la culture de blé sous SD est du principalement dû à de meilleures conditions d'émergence des semences et de la disponibilité de l'eau dans le sol non perturbé.

Concernant la culture de triticales, le système de travail du sol n'a pas d'effet significatif ($P > 0,05$) sur le nombre d'épis (**Tableau 06**). Ainsi, le nombre d'épis de triticales cultivé en SD est supérieur (243,64 épis/m²) à celui cultivé en TC (224,47 épis/m²). Nos résultats sont en contradiction avec ceux de **Woźniak & Soroka (2014)** qui ont trouvé que le nombre épis/m² était faible en SD et élevé en TC. D'après le **tableau 06**, l'effet de l'année sur le nombre d'épis de la culture de triticales est très hautement significatif ($P < 0,001$). Le nombre d'épis a diminué de la première année à la troisième année, avec des valeurs respectives 264,73 épis/m² en 2016/17, 262,31 épis/m² en 2017/18 et 175,12 épis/m² en 2018/19. En technique de travail conventionnel, le nombre d'épis de triticales diminue également de la première campagne à la troisième campagne, avec des moyennes de 268,60, 250,23 et 154,58 épis/m² (**Figure 10**). En travail de conservation du sol (SD), le nombre d'épis est élevé lors des deuxième et première campagnes, avec des valeurs respectives de 274,39 épis/m² et 260,87 épis/m², par rapport à la troisième campagne (195,65 épis/ m²) (**Figure 10**).

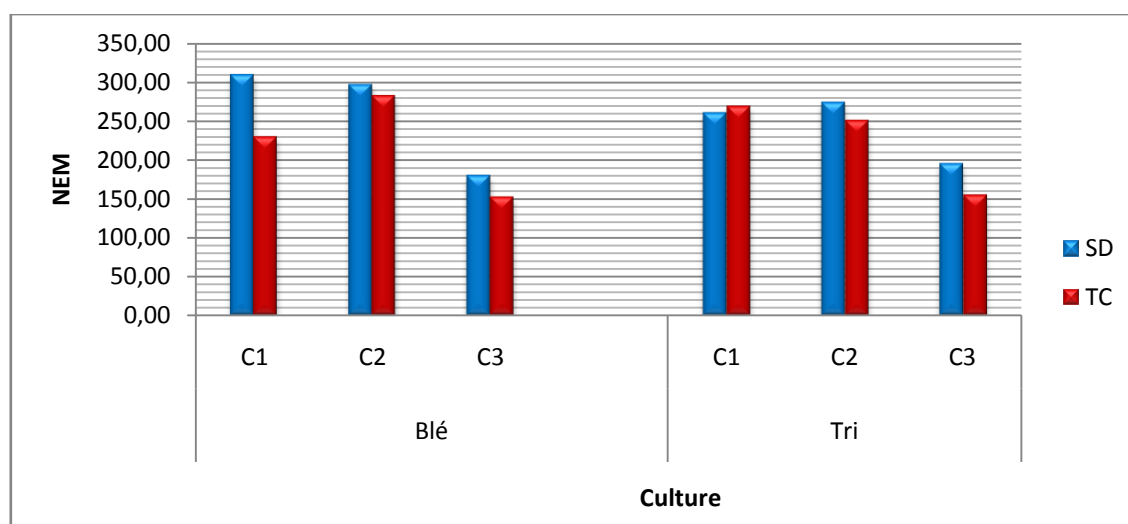


Figure 10 : variation du nombre d'épis par m² (NE/M²) pour le blé et le triticales en fonction de travail du sol et de l'année agricole. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, Tri : triticales.)

f). Nombre de gousses par plante (NGP) de lentille et du pois fourrager

Le **tableau 07** montre que le nombre de gousses par plante (NGP) de la lentille varie de manière très hautement significative sous l'effet du système de travail du sol et l'année ($P < 0,001$). La culture de la lentille en semis direct (SD) présente un nombre de gousses élevé (9,19 gousses/ plante) comparée à celle cultivée en travail conventionnel (TC) : 4,59 gousses/plante. **Mukherjee et al. (2023)** ont confirmé que les parcelles de lentille conduites en non-labour ont enregistré un nombre supérieur de gousses par plante par rapport à celles cultivées sous TC. Le nombre de gousses de lentille augmente de la première campagne à la

troisième, avec des moyennes respectives de 0, 9,47 et 11,20 gousses/ plante. L'interaction entre le système de travail du sol et l'année a un effet hautement significatif ($P < 0,01$) sur le NGP de la lentille. La **figure 11** montre que, pour les campagnes 2017/18 et 2018/19, la gestion de la culture de lentille sous SD a favorisé la formation des gousses (13,77 et 13,80 gousses/ plante respectivement) comparativement à celles cultivées de manière conventionnelle (5,17 et 8,60 gousses/ plante).

Le nombre de gousses par plante de la culture de pois fourrager varie de manière très hautement significative ($P < 0,001$) sous l'effet de l'année (**Tableau 08**). Le NGP est élevé lors de la deuxième campagne, avec une moyenne de 5,33 gousses par plante, par rapport à la troisième et à la première campagne, qui affichent des valeurs respectives de 3,52 gousses/ plante et 00 gousses/ plante. D'après le **tableau 08**, le mode de gestion du sol n'a aucun effet significatif ($P > 0,05$) sur le nombre de gousses par plante de pois fourrager, ce qui est en accord avec les résultats de **Borstlap & Entz (1994)**. Pour les campagnes 2017/18 et 2018/19, la culture de pois fourrager conduite en SD présente un nombre de gousses par plante élevé (5,88 et 4,77 gousses/ plante respectivement) comparativement à celle cultivée en TC (3,50 et 3,53 gousses/ plante) (**Figure 11**). Ainsi, le nombre de gousses par plante est plus élevé en SD.

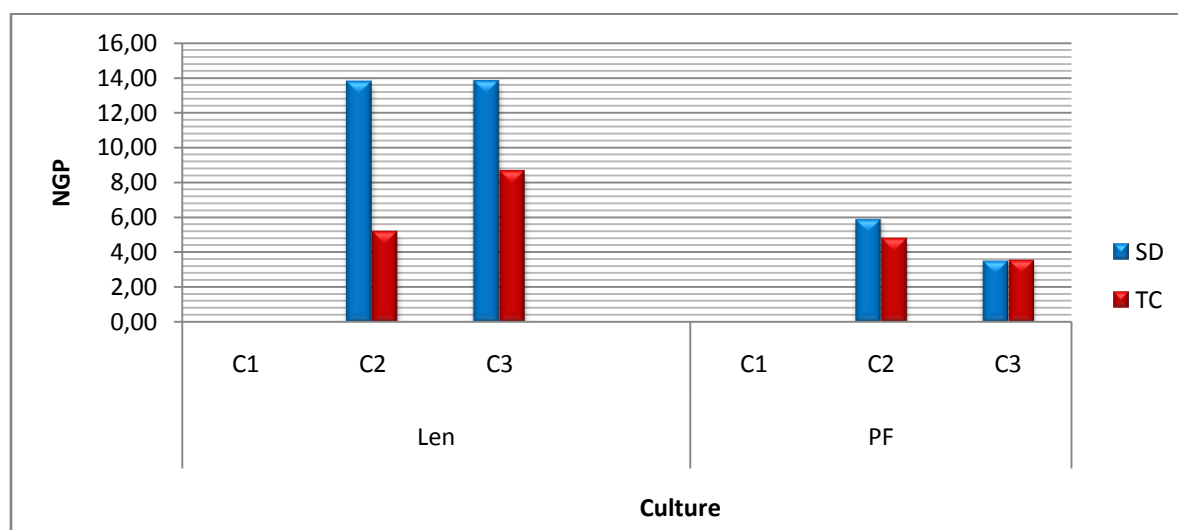


Figure 11 : Variation du nombre de gousses par plante pour la culture de lentille et du pois fourrager en fonction de la gestion du sol et de l'année agricole. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, Len : lentille, PF : pois fourrager)

g). Nombre de grains par épi (NGE) de la culture de blé et de triticale

L'ANOVA a révélé un effet significatif ($P < 0,05$) de l'année ainsi qu'une interaction significative entre l'année et le système de travail du sol sur le nombre de grains par épi de la culture de blé. La technique de travail du sol n'a pas montré d'effet significatif ($P > 0,05$) sur le nombre de grains par épi (NGE) (**Tableau 05**), ce qui corrobore les résultats de **Shahrinezhad et al. (2015)**. Le NGE est plus élevé en troisième campagne, avec une moyenne de 28,92 grains par épi, suivi par la première et la deuxième campagne, avec des moyennes respectives de 23,38 et 22,18 grains par épi. Dans les années humides (2017/18 et 2018/19), la gestion conventionnelle du blé a enregistré un nombre de grains par épis élevé,

avec des valeurs respectives de 23,77 et 31,67 grains/ épi, comparativement à la gestion conservatrice du sol qui a enregistré les moyennes suivantes 20,60 et 26,17 grains par épi (**Figure 12**). La culture de blé conduite en semis direct (SD) a également enregistré un nombre de grains par épi élevé durant la saison sèche (2016/17), avec une moyenne de 27,77 grains par épi, contre 19 grains par épi pour la culture de blé sous travail du sol traditionnel (TC) (**Figure 12**). En générale, le NGE du blé est plus élevé sous technique de non-labour que sous TC, ce qui est en accord avec les résultats de **Benniou & Bahlouli (2015)** ainsi que ceux de **Labad et al. (2022)**.

Le nombre de grains par épi de la culture de triticales a varié de manière très hautement significative ($P < 0,001$) sous l'effet de l'année et a montré une interaction significative entre le système de travail du sol et l'année ($P < 0,05$). L'effet du système de travail du sol sur le NGE de triticales n'est pas significatif ($P > 0,05$) (**Tableau 06**). La culture de triticales dans les années humides (2017/18 et 2018/19) a présenté un NGE élevé, avec des moyennes respectives de 41,52 et 32,90 grains par épi, par rapport à la saison sèche où le NGE était de 26,47 grains par épi. Le NGE a été particulièrement élevé pour la culture de triticales conduite conventionnellement durant les années humides (2017/18 et 2018/19), avec des valeurs de 46,50 et 37,20 grains/épi comparé à la culture de triticales en SD, qui affiche des moyennes de 36,53 et 28,60 grains par épi. Pour la saison sèche 2016/17, la culture de triticales en SD a enregistré un NGE de 29,30 grains par épi, contre 23,63 grains par épi pour celle conduite en TC (**Figure 12**).

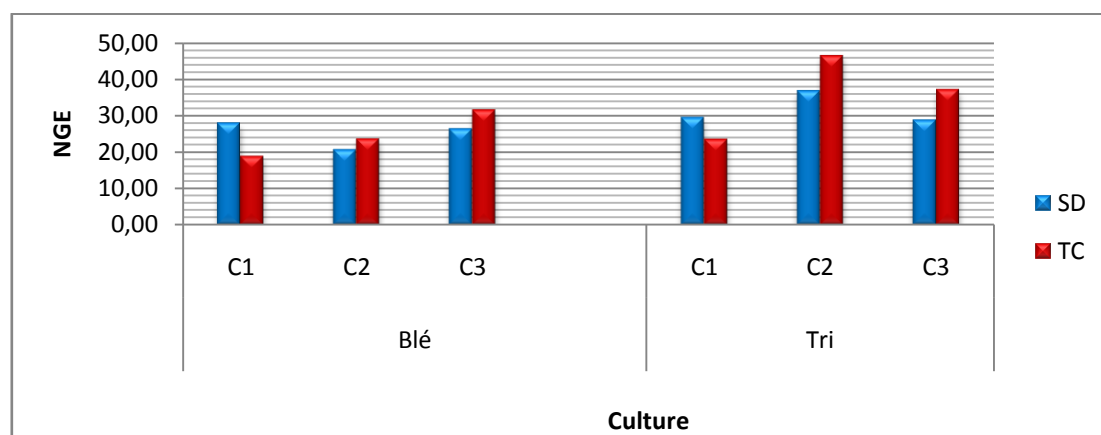


Figure 12 : Nombre de grains par épis pour le blé et le triticales en fonction des techniques de travail du sol et des années agricoles. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, Tri : Triticale)

h). Nombre de grains par gousses (NGG) de la lentille et du pois fourrager

Le **tableau 07** montre que le nombre de grains par gousse (NGG) de la culture de la lentille a varié de manière très hautement significative ($P < 0,001$) en fonction de l'année. En revanche, l'effet du système de travail du sol et son interaction avec l'année sont non significatifs ($P > 0,05$). Le NGG est élevé lors de la deuxième campagne, avec une moyenne de 1,65 grains par gousse, suivi de la troisième campagne avec une valeur de 1,27 grains par gousse et de la première campagne avec une valeur de 0,00 grains par gousse. De plus, la culture de la lentille conduite en semis direct (SD) a enregistré un NGG plus élevé (0,99 grains par gousse) comparativement à celle sous travail conventionnel (TC), avec une

moyenne de 0,96 grains par gousse. Selon la **figure 13**, lors de la deuxième campagne (2017/18), la lentille cultivée sous TC présente un NGG élevé (1,67 grains par gousse) par rapport à celle cultivée en SD (1,63 grains par gousse). Lors de la troisième campagne, où la pluviométrie est inférieure à celle de la deuxième campagne, la culture de lentille en SD a un NGG plus élevé (1,33 grains par gousse) que celle conduite en TC (1,20 grains par gousse).

L'analyse de la variance a révélé un effet significatif ($P < 0,05$) du système de travail du sol sur le nombre de grains par gousse (**Tableau 08**). La culture de pois fourrager conduite en SD a un NGG élevé (4,61 grains par gousse) par rapport à celle conduite en labour conventionnel (4,17 grains par gousse). L'effet de l'année est très hautement significatif ($P < 0,001$) sur le NGG de la culture de pois fourrager (**Tableau 08**). Le plus grand nombre de grains par gousse de la culture de pois fourrager a été enregistré lors de la deuxième campagne, avec une moyenne de 6,76 grains par gousse suivi de la troisième campagne (6,40 grains par gousse) et de la première campagne (0,00 grains par gousse). Pour l'année à forte pluviométrie (2017/18), la culture de pois fourrager sous labour conventionnel a enregistré un NGG élevé (6,93 grains par gousse) par rapport à celle sous SD (6,88 grains par gousse). Lors de la troisième campagne (2018/19), la culture de pois fourrager en SD a enregistré un NGG supérieur (6,63 grains par gousse) à celui conduit en TC (5,87 grains par gousse) (**Figure 13**).

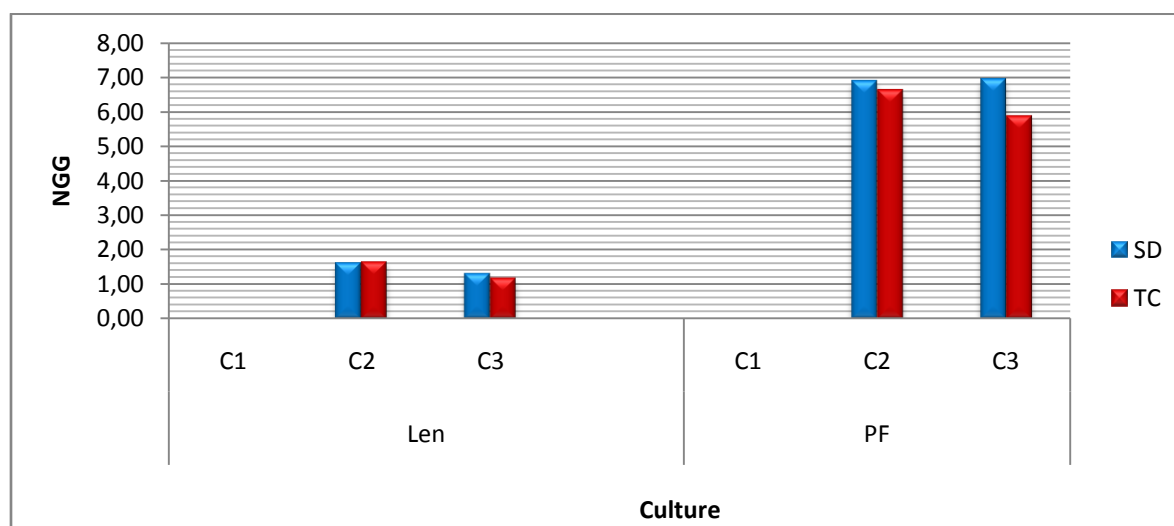


Figure 13 : Nombre de grains par gousse (NG/G) pour la culture de la lentille et du pois fourrager en fonction de la gestion du sol et de l'année agricole. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, Len : lentille, PF : pois fourrager.)

i). Poids de mille grains (PMG) de blé, de triticales, de lentille et du pois fourrager

Le poids de mille grains (PMG) de blé a varié de manière très hautement significative ($P < 0,001$) en fonction de l'année (**Tableau 05**). Le PMG est élevé lors des campagnes pluvieuses (2017/18 et 2018/19) avec des valeurs respectives de 51,13 g et 42,99 g, tandis que, durant l'année à faible pluviométrie (2016/17), le PMG est faible, avec une moyenne de 34,45 g. La sécheresse a réduit le PMG du blé de 10,2 % à 32,9 % (**Islam et al., 2021**). Selon le **tableau 05**, l'effet du système de travail du sol sur le PMG est non significatif ($P > 0,05$), ce qui est en accord avec les résultats de **Shahrinezhad et al. (2015)**. En générale, le PMG de la culture de blé conduite en travail conventionnel (TC) est légèrement supérieur à celui de blé

conduit en semis direct (SD), avec des valeurs respectives de 43,70 g et 42,01 g. Ce résultat est corroboré par les travaux de **Chennafi et al. (2011)** ; **Labad et al. (2022)** ; **Mebarki et al. (2022)**. La **figure 14** montre que, durant les deux années humides (2017/18 et 2018/19), le PMG de blé sous labour conventionnel est supérieur à celui de blé en semis direct (SD), avec des moyennes respectives de 52,65 g et 44,72 g pour le TC, contre 49,61 g et 41,25 g pour le SD. En revanche, durant la campagne sèche (2016/17), la comparaison entre le PMG de blé selon les deux modes de travail du sol révèle que le SD a enregistré un PMG plus élevé (35,17 g) que le TC (33,73 g) (**Figure 14**).

L'analyse de la variance du PMG de triticales indique un effet année très hautement significatif ($P < 0,001$) (**Tableau 06**). Le PMG le plus élevé pour la culture de triticales est enregistré lors de la deuxième année (39,33 g) et de la troisième année (36,75 g), tandis qu'un faible PMG est observé durant la première campagne (29,60 g). Aucune variation significative n'est observée entre les deux modes de gestion du sol ; le PMG de triticales conduite en TC (35,88 g) est supérieur à celui de triticales conduite en SD (34,58 g). Ce résultat corrobore les conclusions de **Woźniak (2022)** qui a trouvé que le PMG du triticales est élevé en rotation sous TC qu'en rotation sous SD. Le PMG de triticales est significativement ($P < 0,05$) influencé par l'interaction entre le système de travail du sol et l'année agricole (**Tableau 06**). Dans l'ensemble, la culture de triticales cultivée en SD présente les valeurs de PMG les plus élevées au cours de la première et la deuxième campagne (30,37 g et 40,15 g respectivement) (**Figure 14**). En revanche, lors de la troisième campagne, la valeur de PMG la plus élevée est enregistrée avec la technique de labour conventionnel (40,28 g) (**Figure 14**).

Le **tableau 07** indique que le PMG de la culture de lentille est très hautement significatif sous l'effet de l'année ($P < 0,001$). Aucun effet significatif n'est observé ($P > 0,05$) pour le système de travail du sol ni pour l'interaction entre le système de travail du sol et l'année. Le PMG de la lentille augmente considérablement de la première année à la troisième année, avec des moyennes respectives 0,00 g, 40,37 g et 41,70 g. Le PMG de la lentille conduite en TC est élevé durant l'année à forte pluviométrie, notamment lors de la deuxième campagne avec une moyenne de 40,53 g, et diminue avec la baisse de la pluviométrie, atteignant 39,93 g lors de la troisième campagne (**Figure 14**). Pour la culture de lentille cultivée en technique de conservation du sol, la plus grande valeur de PMG est enregistrée lors de la troisième campagne (43,47 g) par rapport à la deuxième campagne (40,20 g) (**Figure 14**). Dans l'ensemble, le travail de conservation du sol présente une valeur de PMG plus élevée (27,89 g) que le travail conventionnel (26,82 g).

Les résultats de **tableau 08** montrent que le PMG de la culture de pois fourrager varie très hautement significativement ($P < 0,001$) en fonction de l'année. La valeur maximale de PMG est enregistrée lors de la deuxième campagne (99,97 g). Lors de la troisième campagne, la valeur de PMG est de 87,67 g. Le PMG du pois fourrager ne présente pas de différence significative ($P > 0,05$) en fonction du système de travail du sol ni de l'interaction entre le système de travail du sol et l'année (**Tableau 08**). **Ruisi et al. (2012)** ont constaté que le système de travail du sol n'affectait pas le PMG du pois. Au cours de deuxième et troisième campagne, les valeurs de PMG de la culture de pois fourrager en SD (110,73 g et 89,07 g respectivement) sont supérieures à celles de la culture de pois fourrager en TC (89,20 g et

86,27 g) (**Figure 14**). Par conséquent, le PMG du pois fourrager est plus élevé en technique de non-labour qu'en TC, comme le confirme Carr et al. (2009).

On peut conclure que les valeurs moyennes de PMG des céréales (blé et triticale) sont élevées en travail conventionnel qu'en SD, tandis que les moyennes de PMG des légumineuses (lentille et pois fourrager) sont plus élevées dans les parcelles soumises à la technique de semis direct que celles conduites en TC.

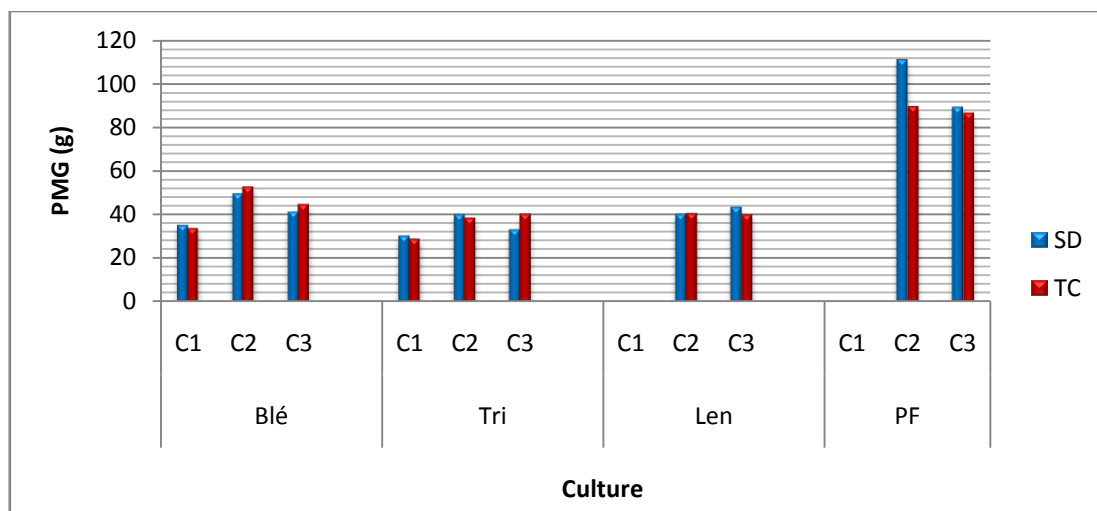


Figure 14 : Poids de mille grains des cultures en fonction de modes de gestion du sol et de l'année agricole. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, Tri : triticale, Len : lentille, PF : pois fourrager.)

j). Rendement réel en grains (RR) (en q/ ha)

L'ANOVA montre que le mode de gestion du sol et les campagnes agricoles affectent de manière hautement ($P < 0,01$) et très hautement significative ($P < 0,001$) le rendement en réel en grains de la culture de blé. L'interaction entre le mode de gestion du sol et les campagnes agricoles n'a aucun effet significatif sur le rendement de blé (**Tableau 05**). La **figure 15** illustre une grande variabilité des rendements entre les années. Le meilleur rendement en grains est enregistré lors de la deuxième campagne (25,60 q/ ha). Une baisse de rendement de 12,01 q/ ha a été observée entre la deuxième et la troisième campagne. Le rendement le plus faible est enregistré lors de la première campagne, avec une valeur de 10,40 q/ ha. Cette variabilité du rendement en blé d'une année à l'autre est expliquée par la variation des précipitations durant ces trois campagnes d'étude (**Tableau 02**). Au cours des trois années d'étude, le rendement en grains de blé été plus élevé en semis direct (SD) qu'en travail conventionnel (TC), avec des taux respectifs de 69,65 % en 2016/17, 9,66 % en 2017/18 et 23,7 % en 2018/19 (**Figure 15**). Selon DeCárce et al. (2019), la forte perturbation du sol causée par le labour a eu une incidence négative sur le rendement du blé. La différence de rendement entre les deux systèmes de travail du sol (SD et TC) est plus marquée dans les années de faible à moyennes pluviométrie (2016/17 et 2018/19). López-Bellido et al. (1996) ainsi que De Vita et al. (2007) ont montré que le rendement du blé lors des années sèches était plus élevé sous SD que sous TC, tandis que l'inverse a été observé lors des années humides. Le rendement en grains de blé cultivé en agriculture de conservation, basé sur le SD

a dépassé celui du blé cultivé sous TC, en raison de l'amélioration de la conservation de l'eau du sol (Souissi et al., 2020).

Les résultats de l'ANOVA montrent que le traitement campagnes agricoles et l'interaction entre le système de travail du sol et la campagne agricole ont un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) sur le rendement en grains de la culture de triticale (**Tableau 06**). Le rendement en grains de triticale varié en fonction des précipitations, avec des rendements plus élevés dans les années humides (comme la deuxième campagne, avec une valeur de 29,05 q/ha) et plus faibles dans les années sèches (comme en 2016/17, avec une moyenne de 12,32 q/ ha). Le rendement de la troisième année est de 15,84 q/ ha. La première campagne a connu une sévère sécheresse de mars à mai, coïncidant avec la phase d'épiaison-floraison. Ces faibles précipitations durant la période de floraison ont causé une pollinisation insuffisante ce réduisant ainsi le nombre de grain et, par conséquent, le rendement de triticale (Küçüközdemir et al., 2021). Selon la figure 15, lors de la première et deuxième campagne, la culture de triticale en SD présente des rendements plus importants (14,80 q/ ha et 35,01 q/ ha respectivement) que celle cultivée sous TC (9,84 q/ha et 23,10 q/ha). En revanche, lors de la troisième campagne, le rendement le plus élevé est enregistré pour la culture de triticale cultivée conventionnellement (19,81 q/ha). Selon Jaskiewicz et al. (2018) et Cociu (2019), sous des précipitations optimales, les rendements les plus élevés de triticale ont été obtenus sous labour conventionnel par rapport au SD. Dans l'ensemble, le rendement en grains de triticale est supérieur de 16,95 % en SD comparativement au TC, ce résultat est en contradictoire avec ceux de Woźniak (2016), qui a trouvé que le rendement de triticale était supérieur de 22,4 % en TC qu'en SD.

Les résultats de l'ANOVA concernant le rendement en grains de la culture de lentille (**Tableau 07**) montrent que le système de travail du sol a un effet hautement significatif ($P < 0,01$) sur le rendement en grains de la lentille. Le rendement le plus élevé est enregistré pour la culture de lentille conduite en SD (3,33 q/ ha), tandis que celle cultivée sous TC présente un faible rendement en grains (1,40 q/ ha). D'après Saha et al. (2020), la culture de lentille sous SD produit un rendement en grain supérieur de 7 % à celui cultivé sous la gestion conventionnelle. L'année et l'interaction entre le système de travail du sol et l'année affectent très hautement significativement ($P < 0,001$) le rendement en grains de la lentille (**Tableau 07**). Dans les conditions de pluviométrie suffisante, le rendement en grains de la lentille est élevé, comme en deuxième et troisième campagne (4,50 q/ ha et 2,63 q/ ha respectivement). En revanche, lors de l'année déficiente en pluviométrie (<200 mm), comme durant la première campagne, le rendement en grains de la lentille est nul. Pour les campagnes agricoles (2017/18 et 2018/19), la culture de lentille en SD a enregistré un rendement en grains supérieur (7,15 q/ ha et 2,85 q/ ha) à celle cultivée sous labour (1,84 q/ ha et 2,42 q/ ha) (**Figure 15**). Lors de la première campagne, une sévère sécheresse s'est installée de mars à mai, avec une pluviométrie totale inférieure à 200 mm (**Tableau 02**), entraînant un rendement nul pour la culture de lentille dans les deux modes de gestion du sol. Ce résultat corrobore les conclusions de Labad et al. (2022), qui ont confirmé que le rendement de lentille est nul à Sidi Bel Abbes, région semi-aride de l'ouest de l'Algérie, en raison de l'avortement des fleurs causé par la sécheresse et les températures élevées pendant la phase de reproduction en 2016/17. Dans la région méditerranéenne, le rendement de la culture de lentille est fortement

affecté par les fluctuations des précipitations saisonnières, car les pluies intenses sont fréquentes en hiver, tandis que de mars à mai, les plantes sont exposées à la sécheresse et à des températures élevées (Choukri et al., 2020). Selon Bhandari et al. (2016), la sécheresse terminale peut inhiber tous les processus de croissance et de métabolisme de la culture de lentille, entraînant d'importantes pertes de rendement, car elle réduit la production de fleurs, le nombre de gousses et le nombre de grains par gousses (Shrestha et al., 2005).

Le **tableau 08** montre que la campagne agricole affecte très hautement significativement ($P < 0,001$) le rendement en grains de la culture de pois fourrager. Dans des conditions de pluviométrie suffisante (campagne 2017/18), le pois fourrager a enregistré un rendement en grains élevé (19,29 q/ha). En revanche, lors des saisons à faible pluviométrie (troisième et première campagne), le rendement est faible, avec des valeurs respectives de 6,16 q/ha et 0,00 q/ha. Selon Caldéron et al. (2012), les conditions environnementales ont un impact important sur le rendement en grain du pois fourrager, surtout dans les régions semi-arides, où le rendement est faible lorsque les précipitations sont insuffisantes, notamment durant la période reproductive (Payne et al., 2000). Le système de travail du sol et l'interaction entre le système de travail du sol et l'année n'ont pas d'effet significatif sur le rendement en grains de la culture du pois fourrager (**Tableau 08**). Pour les campagnes agricoles (2017/18 et 2018/19), la culture de pois fourrager sous SD présente un rendement en grains plus important (22,60 q/ha et 7,29 q/ha) que celle sous TC (15,99 q/ha et 5,03 q/ha) (**Figure 15**). Globalement, le rendement en grains le plus élevé de la culture de pois est observé avec la technique de conservation du sol (9,96 q/ha) par rapport à la technique conventionnelle (7,01 q/ha). Le système de non-labour a conservé plus d'eau dans le sol, ce qui se reflète dans l'augmentation du rendement de pois fourrager par rapport au TC (Lafond et al., 1992 ; Arshad & Gill, 1996).

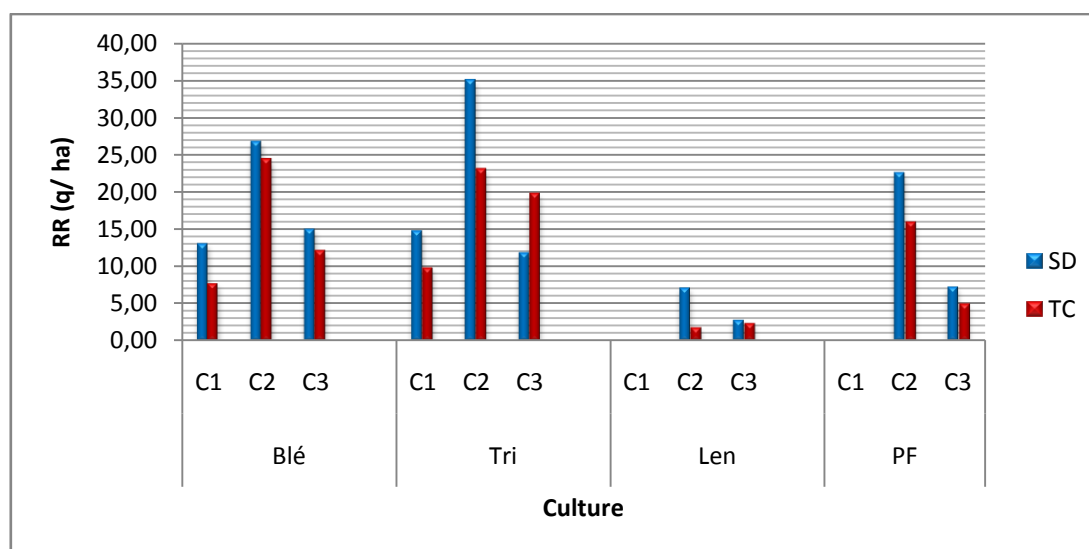


Figure 15 : Rendement en grains par culture en fonction de mode de gestion du sol et l'année agricole. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, Tri : triticales, Len : lentille, PF : pois fourrager)

k). Biomasse des cultures à la récolte (BM)

Les analyses statistiques de la biomasse à la récolte (BM) de la culture de blé ont révélé un effet de l'année très hautement significatif ($P < 0,001$) sur la BM. En revanche, le système de travail du sol et l'interaction entre le système de travail du sol et l'année n'ont montré aucun effet significatif ($P > 0,05$) sur la BM (**Tableau 05**). **Halvorson et al. (2002)** ont également constaté que le système de travail du sol n'affecte pas la biomasse à la récolte du blé. Les conditions climatiques défavorables ont entraîné une diminution significative de la biomasse à la récolte, comme en témoignant la première et troisième campagne, qui ont enregistré des moyennes de 44,20 q/ha et 42,26 q/ha respectivement. La meilleure BM a été observée lors de la deuxième campagne, avec une valeur de 194,90 q/ha. Pour la première et la deuxième campagne, la biomasse à la récolte est plus élevée pour la culture de blé conduite en semis direct (SD) : 46,09 q/ha et 202,66 q/ha respectivement que pour celle cultivée en travail conventionnel (TC) : 42,32 q/ha et 187,14 q/ha. En revanche, lors de la troisième campagne, la biomasse à la récolte la plus élevée a été enregistrée pour la culture de blé conduite en TC (45,17 q/ha) comme le montre la **figure 16**.

L'analyse de la variance montre un effet hautement significatif du système de travail du sol ($P < 0,01$) sur la biomasse de triticale (**Tableau 06**). Le rendement en biomasse est supérieur dans les parcelles travaillées, où on enregistre une moyenne de 115,31 q/ha contre 81,17 q/ha pour les parcelles en SD. Selon le **tableau 06**, la biomasse à la récolte est très hautement significativement influencée par l'année ($P < 0,001$). Ainsi, l'année à forte pluviométrie (2017/18) a enregistré une valeur élevée de BM (194,45 q/ha), tandis qu'une valeur basse de BM a été observée durant l'année sèche (2016/17) avec une moyenne de 48,84 q/ha. L'effet de l'interaction entre le système de travail du sol et l'année sur la biomasse est significatif ($P < 0,05$) (**Tableau 06**). Au cours des trois campagnes agricoles, la culture de triticale conduite en TC a enregistré une biomasse supérieure à celle conduite en SD, avec des différences de 6,38 q/ha en 2016/17, 79,71 q/ha et en 2017/18, 16,33 q/ha (**Figure 16**).

La biomasse à la récolte de la lentille est très hautement significativement influencée par l'année ($P < 0,001$). Les techniques de travail du sol et l'interaction entre celles-ci et l'année n'ont montré aucun effet significatif sur la biomasse ($P > 0,05$) (**Tableau 07**). Les résultats montrent une augmentation de la biomasse de la première campagne à la troisième campagne, où la plus grande valeur de biomasse a été enregistrée avec une moyenne de 30,04 q/ha. En 2017/18, la culture de lentille en SD a présenté une valeur de biomasse à la récolte élevée (21,89 q/ha) par rapport à celle en TC (19,82 q/ha). En 2018/19, la biomasse à la récolte était plus élevée en TC, avec une moyenne de 33,77 q/ha, qu'en SD, qui affichait 26,31 q/ha (**Figure 16**). En résumé, la biomasse de la culture de lentille est plus élevée en TC (17,86 q/ha) qu'en SD (16,07 q/ha), ce qui corrobore les résultats d'**Almaz et al. (2021)**. L'augmentation de la biomasse de la lentille en TC peut être attribuée à l'amélioration des conditions du sol sous la gestion conventionnelle, qui réduit le compactage et la densité apparente et favorise la prolifération des racines (**Birla et al., 2023**).

La biomasse à la récolte de la culture de pois fourrager a varié de manière très hautement significative sous l'effet de l'année ($P < 0,001$), tandis que le système de travail du sol et leur interaction avec l'année n'ont pas eu d'effet significatif sur la BM de pois fourrager

($P > 0,05$) (**Tableau 08**). La biomasse de la culture de pois fourrager a augmenté de la première année (00,00 q/ha) à la troisième année (52,17 q/ha), avec une biomasse à la récolte en deuxième campagne égale à 45,29 q/ha. En 2017/18, la technique de SD a enregistré une BM plus élevée (50,72 q/ha) qu'en TC (39,85 q/ha) comme montre la **figure 16**. Selon la **figure 16**, la biomasse en 2018/19 était plus élevée en technique conventionnelle (56,52 q/ha) qu'en technique non-labour (47,81 q/ha).

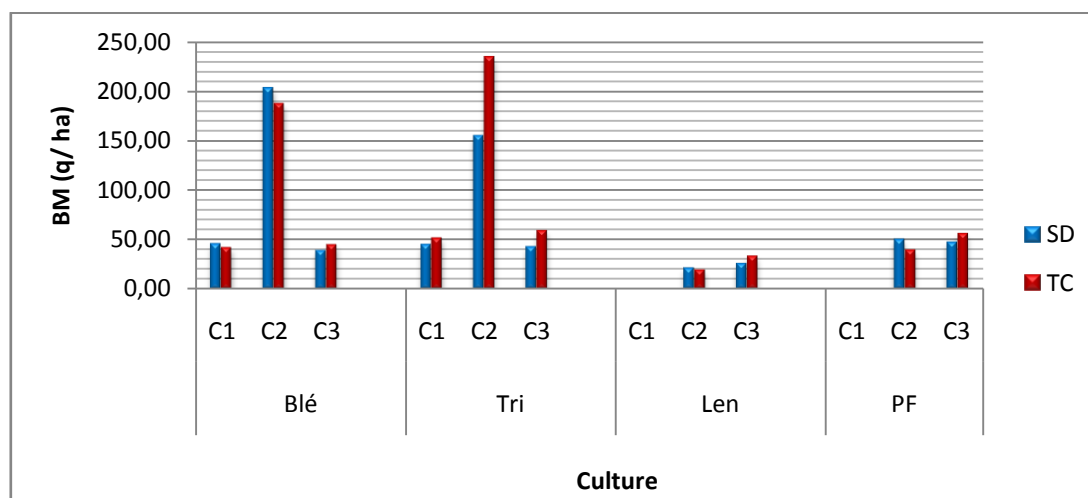


Figure 16 : Biomasse à la récolte par culture en fonction de mode de gestion du sol et de la campagne agricole. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, Tri : triticale, Len : lentille, PF : pois fourrager)

I). Indice récolte (IR)

D'après le **tableau 05**, l'indice de récolte de la culture de blé est très significativement influencé par les techniques de travail du sol et l'année ($P < 0,001$), tandis que l'effet de l'interaction entre des techniques de travail du sol et l'année est significatif ($P < 0,05$). La technique de non-labour a enregistré la plus grande valeur de l'indice de récolte (0,27) par rapport à la technique conventionnelle (0,19). **Elabbadi et al. (2024)** ont constaté que la culture de blé sous régime de non-labour avait un IR élevé comparativement au travail minimum et à la technique conventionnelle. L'indice de récolte est élevé en régime de non-labour, en raison de la sénescence tardive des feuilles de blé et d'une plus grande rétention d'eau dans le système (**Djouadi et al., 2021**). L'année ayant enregistré le plus faible indice de récolte est la deuxième année, avec une valeur de 0,13, tandis que l'indice de récolte est plus élevé lors de la troisième campagne, avec une moyenne de 0,33. L'indice de récolte en 2016/17 est égal de 0,23. La **figure 17** montre que durant les années de faibles à moyenne précipitations, l'indice de récolte est fortement supérieur avec la technique de non-labour (0,28 en 2016/17 et 0,39 en 2018/19) qu'avec le travail conventionnel (0,18 en 2016/17 et 0,27 en 2018/19). En revanche, lors de l'année à forte pluviométrie, l'indice de récolte de la culture de blé sous non-labour (SD) et travail conventionnel (TC) est similaire (0,13).

L'analyse de variance montre que l'effet de l'année sur l'indice de récolte du triticale est très hautement significatif ($P < 0,001$) (**Tableau 06**). La faible valeur de l'IR est enregistrée lors de la deuxième campagne (0,16), tandis que la plus grande valeur est observée lors troisième campagne, avec une moyenne de 0,30. Toutefois, l'effet du système de travail

du sol et leur interaction avec l'année sur l'IR est également significatif ($P < 0,05$) (**Tableau 06**). De manière générale, l'IR est plus élevé pour la culture de triticales conduite en non-labour (SD) : 0,27 que pour celle conduite en travail conventionnel (TC) : 0,21. La **figure 17** montre que, durant les saisons 2016/17 et 2017/18, la culture de triticales conduite en non-labour (SD) a enregistré des valeurs d'IR élevées (0,32 et 0,23 respectivement) par rapport au triticales sous travail conventionnel (TC) : 0,19 et 0,10 respectivement. Pour la troisième campagne, la technique conventionnelle a permis à la culture de triticales d'enregistrer un indice de récolte élevé (0,33) par rapport au travail de conservation du sol.

Le système de travail du sol, année et leur interaction ont un effet très hautement significatif sur l'indice de récolte de la lentille ($P < 0,001$) (**Tableau 07**). Le non-labour (SD) a enregistré un IR élevé (0,14) comparativement au travail conventionnel (TC), avec une valeur de 0,05. L'indice de récolte a atteint sa valeur maximale en deuxième année, avec une moyenne de 0,21, contrairement à la troisième année qui a enregistré une moyenne de 0,09. Pour les deux campagnes 2017/18 et 2018/19, la culture de lentille sous SD a affiché des moyennes élevées d'IR (0,32 et 0,10 respectivement) comparé à la culture de lentille sous TC avec des moyennes de 0,09 et 0,07 respectivement (**Figure 17**).

L'analyse de variance indique un effet très hautement significatif de l'année sur l'indice de récolte du pois fourrager ($P < 0,001$) (**Tableau 08**). La deuxième campagne a enregistré un IR élevé (0,42) comparé à la troisième campagne (0,12). Les techniques de travail du sol et l'interaction entre le système de travail du sol et l'année n'ont pas d'effet significatif sur l'IR ($P > 0,05$) (**Tableau 08**). Selon les histogrammes de la **figure 17**, le non-labour présente des valeurs élevées de l'IR durant les campagnes 2017/18 et 2018/19, avec des moyennes respectives de 0,45 et 0,14 comparativement à la technique conventionnelle qui a enregistré des valeurs de 0,39 et 0,09.

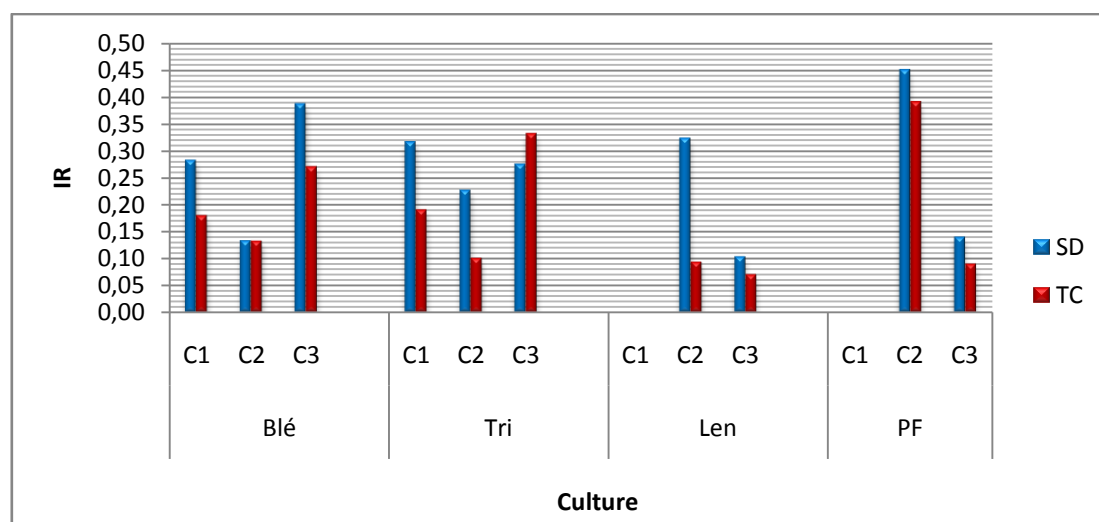


Figure 17 : Indice de récolte par culture en fonction de mode de travail du sol et de l'année agricole. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, Tri : triticales, Len : lentille, PF : pois fourrager)

m). Rendement en paille (RP) des céréales (blé et triticales)

D'après le **tableau 05**, le rendement en paille de la culture de blé a été très hautement significativement influencé par l'année ($P < 0,001$), tandis que l'effet du système de travail du sol et l'interaction entre le système de travail du sol et l'année n'ont pas d'effet sur ce paramètre. La valeur de rendement en paille est élevée lors de la deuxième campagne (2017/18) avec une moyenne de 169,30 q/ha, suivie par la première campagne (33,81 q/ha) et la troisième campagne (28,67 q/ha). Pour la première et la troisième campagne, le rendement en paille du blé cultivé en travail conventionnel (TC) est supérieur à celui du blé cultivé en semis direct (SD), avec des différences de 1,61 q/ha et 8,7 q/ha respectivement (**Figure 18**). Lors de la troisième campagne (2018/19), la culture de blé sous SD a enregistré une valeur de rendement élevée (175,88 q/ha) par rapport au blé cultivé de manière conventionnelle (162,72 q/ha) (**Figure 18**).

Un effet hautement significatif du système de travail du sol, très hautement significatif de l'année et significatif, de leur interaction ont été constaté sur le rendement en paille du triticales (**Tableau 06**). Le rendement en paille du triticales est élevé en TC (97,73 q/ha) qu'en SD (60,67 q/ha). L'année à forte pluviométrie a enregistré un rendement en paille (165,47 q/ha) supérieur à celui des années à pluviométrie moyenne ou faible, avec des valeurs respectives 35,61 q/ha et 36,52 q/ha. Pour les campagnes agricoles : 2016/17, 2017/18 et 2018/19, la culture de triticales cultivée conventionnellement a enregistré des valeurs élevées : 42,19 q/ha, 211,20 q/ha et 39,80 q/ha dans ordre par rapport à la culture de triticales conduite en SD, qui a présenté des valeurs respectives de 30,85 q/ha, 119,73 q/ha et 31,42 q/ha (**Figure 18**).

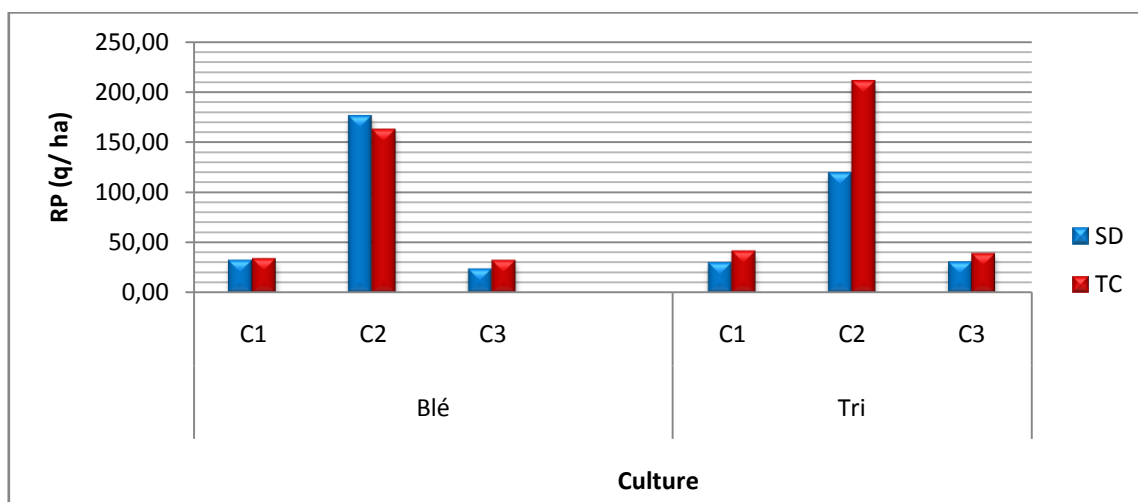


Figure 18 : Rendement en paille pour les céréales (blé et triticales) en fonction de mode de travail du sol et de la campagne agricole. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, Tri : triticales).

III. 2. Paramètres morphologiques

a) Hauteur de tige (HT) (en cm) et hauteur plante (HP) (en cm)

D'après le **tableau 05**, les techniques de travail du sol et l'année ont des effets très hautement significatifs ($P < 0,001$) sur la hauteur de la tige de blé. L'effet de l'interaction

entre les techniques de travail du sol et l'année sur ce paramètre est également significatif ($P < 0,05$). La culture de blé lors de la deuxième et de la troisième campagne a enregistré des valeurs moyennes de hauteur de tige les plus élevées, respectivement : 62,73 cm et 50,86 cm. Une valeur de HT plus basse a été enregistrée lors de la première campagne, avec une moyenne de 41,30 cm. Selon **la figure 19**, la hauteur de la tige de blé a présenté des valeurs plus élevées avec la technique conventionnelle qu'avec la technique conservatrice (SD) pour les trois campagnes agricoles. En générale, La culture de blé sous labour a présenté la valeur de HT la plus élevée (54,11 cm) par rapport à celle conduite en SD (49,15 cm). **Khodadoost et al. (2022)** ont montré que la hauteur de la tige de blé était légèrement supérieure en TC qu'en SD.

La hauteur de la tige de triticales a varié de manière très hautement significative ($P < 0,001$) en fonction de l'année (**Tableau 06**). La culture de triticales a enregistré une hauteur importante lors de la deuxième et de la troisième campagne, avec des valeurs respectives de 78,70 cm et 67,27 cm. La hauteur a été plus basse lors de la première campagne, avec une moyenne de 49,03 cm. Le système de travail du sol a également eu un effet significatif ($P < 0,05$) sur la hauteur de la tige de triticales (**Tableau 06**). Au cours des trois campagnes d'étude, la culture de triticales cultivée en technique conventionnelle a enregistré des hauteurs de tige supérieures à celles cultivées en SD (**Figure 19**). En moyenne, le triticales sous TC a présenté une hauteur de tige plus élevée (67,96 cm) que celui sous SD (62,04 cm), ce qui est en conforme aux résultats d'**Amara et al. (2023)**, qui ont trouvé que la hauteur de tige de triticales était inférieure en SD par rapport à TC.

Pour les cultures de légumineuses, la hauteur de la plante est un trait important dans la production. Les plantes de faible hauteur ont leurs gousses portées près du sol, ce qui complique à la récolte (**Nleya & Rickertsen, 2011**).

Un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) de l'année a été constaté sur la hauteur de la plante de lentille (**Tableau 07**). La hauteur de la lentille est maximale lors de la deuxième campagne avec une valeur de 28,98 cm, suivie par la troisième campagne avec une moyenne de 27,92 cm et enfin la première campagne avec 19,62 cm. La plus grande hauteur observée lors de la deuxième campagne est principalement due à la meilleure répartition des précipitations. Le système de travail du sol n'a pas eu d'effet significatif ($P > 0,05$) sur la hauteur de la plante de lentille, ce qui corrobore les résultats de **Kayan & Sait Adak (2006)**. L'interaction entre le système de travail du sol et l'année a un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) sur ce paramètre (**Tableau 07**). Lors de la première campagne, la hauteur de la plante de lentille conduite en SD (22,83 cm) est supérieure à celle cultivée en TC (16,40 cm). Lors des deuxième et troisième campagnes, les hauteurs de la lentille sont élevées en TC (30,92 cm et 29,57 cm) par rapport à celles sous SD (27,03 cm et 26,27 cm) (**Figure 19**). En général, nos résultats montrent que la hauteur de la plante de lentille cultivée en TC est supérieure à celle cultivée en SD. **Almaz et al. (2021)** ont également trouvé que la hauteur de la plante de lentille est plus élevée en travail conventionnel (48,61 cm) qu'en travail minimum (SD).

La hauteur de la plante de pois fourrager a été très hautement significative affectée ($P < 0,001$) par l'année (**Tableau 08**). La hauteur de la plante de pois fourrager est élevée lors de

la deuxième et de la troisième campagne, avec des valeurs respectives de 66,60 cm, et 46,22 cm, tandis que la hauteur la plus faible a été enregistrée lors de la première campagne avec une moyenne de 29,05 cm. L'augmentation des précipitations et une température de l'air favorable ont probablement contribué à la hauteur de la plante de pois (Lensen et al., 2018). Le **tableau 08** montre qu'il n'y a pas d'effet significatif du système de travail du sol ni de l'interaction entre le système de travail du sol et l'année sur la hauteur de la plante, comme l'a confirmé Carr et al. (2009). La **figure 19** montre que, durant les trois campagnes agricoles la culture de pois fourrager conduite en SD a enregistré des valeurs de hauteur plus élevées que celle cultivée en TC. En générale, la hauteur de la plante de pois fourrager a tendance à augmenté sous technique de non-labour (51,67 cm) par rapport à celle cultivée en TC (42,91 cm), ce qui corrobore les résultats de Carr et al. (2009). Borstlap & Entz (1994) ont constaté que la hauteur du pois fourrager sous SD est supérieure de 7 à 12 cm à celle sous TC.

Toutes les cultures ont des hauteurs très faibles lors de la première campagne en raison de la sécheresse printanière de mars à mai. Bayoumi et al. (2008) ont prouvé que la diminution de la hauteur des plantes pendant la sécheresse pourrait être due à une réduction de la turgescence relative et à la déshydratation du protoplasme, associées à une diminution de la division cellulaire et de l'expansion cellulaire.

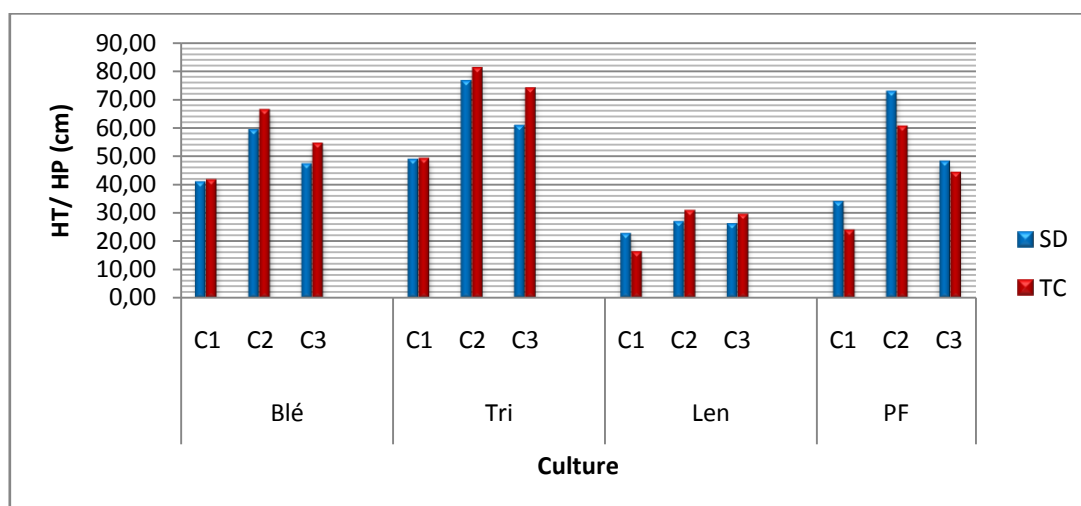


Figure 19 : Hauteur de tige par culture en fonction de mode de travail du sol et de la campagne agricole. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, Tri : triticales, Len : lentille, PF : pois fourrager).

b) Longueur du système racinaire (LSR) (cm)

L'analyse de la variance a révélé un effet significatif de l'année ($P < 0,05$) sur la longueur du système racinaire du blé. En revanche, l'effet du système de travail du sol et l'interaction entre le système de travail du sol et l'année sont non significatifs ($P > 0,05$) (**Tableau 05**). La longueur du système racinaire était la plus élevée lors de la deuxième campagne, avec une moyenne de 14,32 cm, suivie par la troisième campagne avec une valeur de 14,18 cm, tandis que la première année affichait une moyenne de 11,94 cm. L'augmentation des précipitations pendant la deuxième saison (2017/18) a permis d'obtenir une valeur de longueur du système racinaire (LSR) plus élevée que lors des deux autres saisons. Pour les trois campagnes, la culture de blé conduite en TC a enregistré un système

racinaire plus long que celle conduite en non-labour (SD) (**Figure 20**), avec une moyenne générale de 14,21 cm pour le TC contre 12,74 cm pour le SD. La longueur des racines de blé était meilleur lorsque le sol était labouré (**Benniou, 2012 ; Echcherki et al., 2021**), ce qui s'explique par une plus grande porosité au niveau de ces parcelles (**Yachi et al., 2021**). Comparativement au TC, dans la technique de SD, le sol n'est pas travaillé, ce qui entraine une résistance élevée au pénétromètre, limitant ainsi l'allongement des racines de blé (**Echcherki et al., 2022**).

La longueur du système racinaire de la culture de triticales a été significativement affectée par l'année ($P < 0,05$) et n'a pas été influencée par le système de travail du sol ni par l'interaction entre le système de travail du sol et l'année (**Tableau 06**). La culture de triticales présente un système racinaire plus long lors de la deuxième campagne (17,30 cm), suivie par la troisième et la première campagne avec des moyennes respectives de 16,08 cm et 12,75 cm. Pour la première et la deuxième campagne, le système racinaire de triticales conduite en TC est très long (13,63 cm en 2016/17 et 17,60 cm en 2017/18) par rapport à celui conduite en SD (11,87 cm en 2016/17 et 17,00 cm en 2017/18) (**Figure 20**), cependant, lors de la troisième campagne, un système racinaire plus long a été observé en technique de SD, avec une moyenne de 16,27 cm contre 15,89 cm pour le TC. D'après **Fiorini et al. (2018)**, la longueur et la densité des racines de blé sous non-labour avaient tendance à être plus élevées que sous TC, ce qui suggère une amélioration des caractéristiques du sol après six ans d'adoption du système de SD. Dans l'ensemble, la culture de triticales présente un système racinaire plus long sous la technique de labour (15,71 cm) que sous la technique de travail de conservation (15,04 cm).

L'année a un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) sur la longueur du système racinaire de la culture de lentille (**Tableau 07**). Le système racinaire de la lentille est très long lors de la deuxième année, avec une valeur de 22,23 cm, suivi par la troisième année avec une moyenne de 16,45 cm et enfin la première année avec une valeur de 12,98 cm. Le système de travail du sol et son interaction avec l'année n'ont aucun effet significatif ($P > 0,05$) sur la longueur du système racinaire de la lentille. Pour la première et la deuxième année, le SD a enregistré une longueur de système racinaire plus élevée comparativement au TC. En revanche, lors de la troisième année, la lentille sous TC a un système racinaire plus long (17,89 cm) que celle conduite en SD (15,00 cm) (**Figure 20**). Dans l'ensemble, le système racinaire de la lentille est plus long sous TC (17,44 cm) que sous SD (16,99 cm). Les opérations de travail conventionnel du sol réduisent la résistance de pénétration du sol, et les opérations de préparation du lit de semence offrent une opportunité unique d'améliorer la croissance des racines de la lentille grâce à l'ameublissement du sol (**Zaman & Islam, 2020**).

Un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) du système de travail du sol, de l'année et de leur interaction a été observé sur la longueur du système racinaire de la culture de pois fourrager (**Tableau 08**). La culture de pois fourrager a enregistré une longueur de système racinaire élevée lors de la deuxième année, avec une moyenne de 18,03 cm, suivie par la troisième et la première année avec des moyennes de 16,12 cm et 9,78 cm respectivement. Lors des trois campagnes d'étude, un système racinaire plus long de pois fourrager a été observé en technique conventionnelle, avec une moyenne de 16,33 cm contre 12,97 cm en

technique de SD (**Figure 20**). **Muñoz-Romero et al. (2012)** ont constaté que la longueur des racines de pois chiche est plus élevée en TC qu'en SD.

Dans notre étude, comparativement au travail conventionnel, la densité apparente et la résistance à la pénétration sont élevées en technique de semis direct, ce qui limite la pénétration et l'élongation des racines pour les cultures de blé, triticales, lentille et pois fourrager. L'année a une grande influence sur la longueur du système racinaire des cultures en rotation, montrant une corrélation positive avec les précipitations.

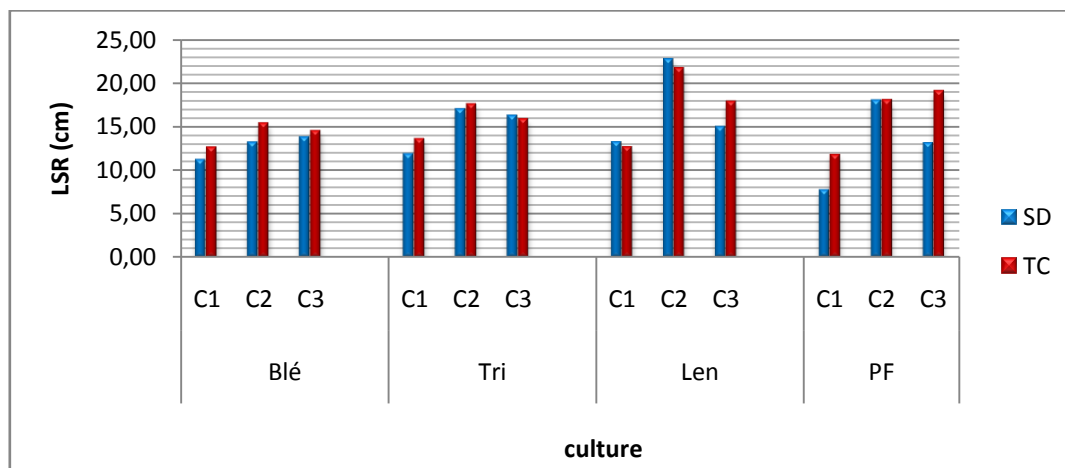


Figure 20 : Longueur de système racinaire par culture en fonction de mode de gestion du sol et de l'année. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, Tri : triticales, Len : lentille, PF : pois fourrager).

c) Longueur d'épi (LE) (en cm) chez les céréales (blé et triticales)

Le système de travail du sol, l'année et leur interaction n'ont pas d'effet significatif sur la longueur de l'épi de blé ($P > 0,05$) (**Tableau 05**). **Shahrinezhad et al. (2015)** ont affirmé que le système de travail du sol n'a aucun effet significatif sur la longueur d'épi de blé. D'une manière générale, le plus long épi a été observé en SD, avec une moyenne de 6,15 cm contre 5,53 cm en TC. De plus, la longueur de l'épi augmente de la première année à la troisième année, avec des moyennes respectives de 5,66 cm, 5,75 cm et 6,11 cm (**Figure 21**).

La longueur de l'épi de triticales varie de manière très hautement significative sous l'effet de l'année, et de manière significative sous l'effet de l'interaction entre le système de travail du sol et l'année. En revanche, le système de travail du sol n'a pas d'effet significatif sur ce paramètre ($P > 0,05$) (**Tableau 06**). Le plus long épi de triticales a été enregistré lors de la deuxième année, avec une moyenne de 9,34 cm, suivi de la troisième (8,79 cm) et la première année (7,29 cm). **La figure 21** montre que la longueur de l'épi de triticales lors de la deuxième et troisième année est plus élevée en technique conventionnelle (10,12 cm et 8,83 cm) qu'en semis direct (8,55 cm et 8,74 cm). En revanche, lors de la première année, la culture de triticales conduite en semis direct a enregistré une longueur d'épi (7,95 cm) supérieure à celle conduite en technique conventionnelle (6,63 cm).

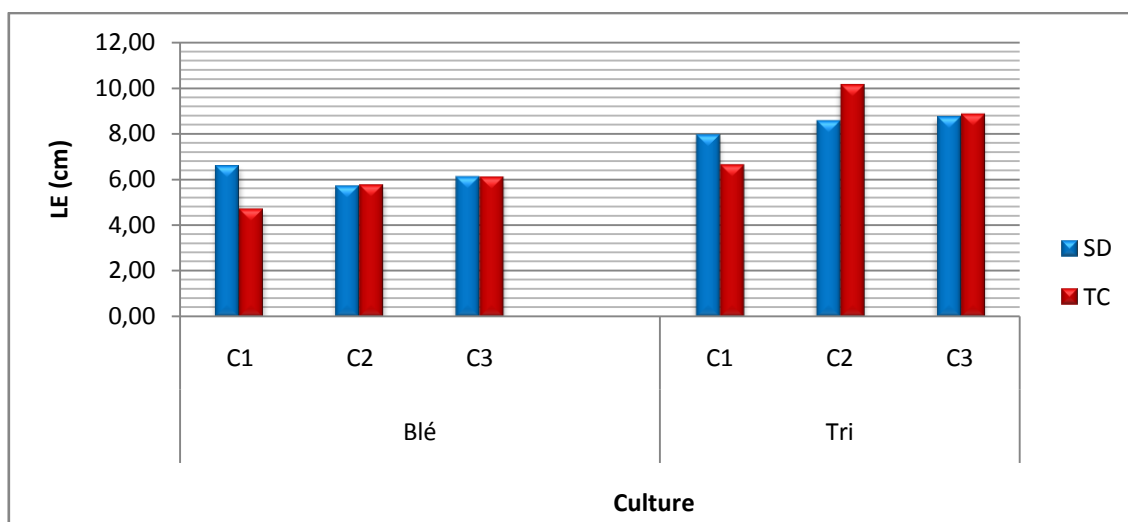


Figure 21 : Longueur d'épi par culture (blé et triticale) en fonction de mode de travail du sol et dans l'année. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, Tri : triticale).

d) Longueur de barbe (LB (en cm) chez les céréales (blé et triticale)

D'après le **tableau 05**, la longueur de la barbe a varié de manière hautement significativement ($P < 0,01$) et très hautement significativement ($P < 0,001$) en fonction du système de travail du sol et de l'année, respectivement. La longueur de la barbe de blé augmente de la première année à la troisième année, avec des valeurs respectives de 9,62 cm ; 10,39 cm et 10,99 cm. La longueur de la barbe du blé cultivé en TC (10,67 cm) est supérieure à celle du blé cultivé en SD (10,00 cm) (**Figure 22**).

L'ANOVA a montré que l'année a un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) sur la longueur de la barbe de la culture de triticale (**Tableau 06**). La longueur de la barbe de la culture de triticale est la plus élevée lors de la deuxième campagne, avec une moyenne de 6,66 cm, tandis que la valeur la plus basse est enregistrée lors de la troisième campagne, avec 5,55 cm. La longueur de la barbe lors de la première campagne est de 6,49 cm. Le système de travail du sol et son interaction avec l'année n'ont aucun effet significatif sur la longueur de la barbe de triticale. En moyenne, la culture de triticale conduite en SD a enregistré une longueur de barbe (6,38 cm) supérieure à celle de la culture de triticale conduite en TC (6,08 cm) (**Figure 22**).

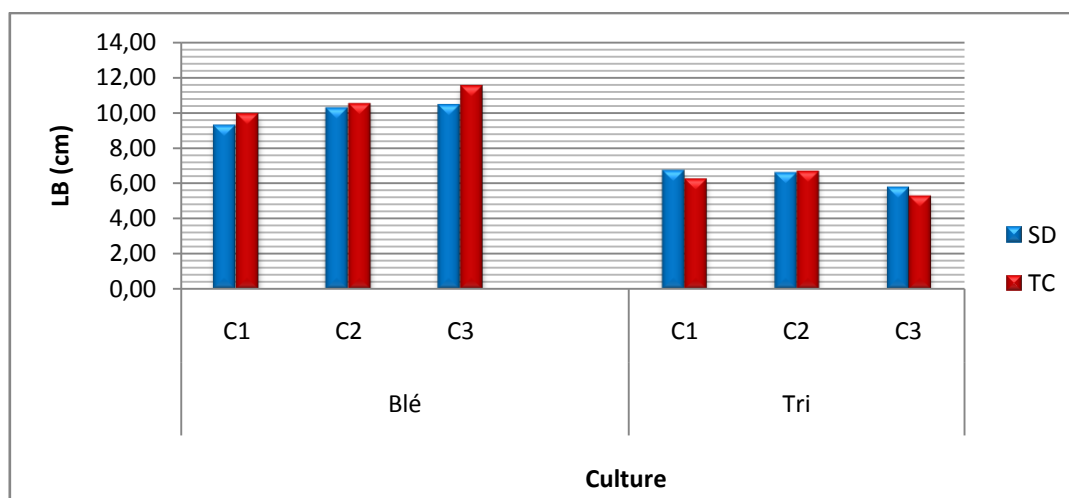


Figure 22 : Longueur de la barbe d'épi pour le blé et le triticale en fonction de mode de travail du sol et de l'année. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, Tri : triticale).

e) Longueur de gousse (LG) (en cm) de lentille et du pois fourrager

La longueur de la gousse de lentille a été très hautement significativement ($P < 0,001$) en fonction de l'année (**Tableau 07**). Lors de la deuxième campagne, la longueur moyenne de la gousse de lentille est élevée (1,27 cm) comparativement à celle de la troisième campagne (1,12 cm). Il n'y a aucun effet significatif du système de travail du sol sur la longueur de gousse de lentille, ce qui est en accord avec les résultats de **Kayan & Sait Adak (2006)**. Selon la **figure 23**, la longueur de gousse de lentille cultivée en travail conventionnel (TC) est supérieure (1,28 cm) à celle cultivée en semis direct (SD) (1,26) durant la campagne pluvieuse. En revanche, pendant la campagne à moyenne pluviométrie, la longueur de la gousse de lentille cultivée en SD (1,13 cm) est supérieure à celle cultivée en TC (1,11 cm).

L'année a un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) sur la longueur de la gousse de pois fourrager (**Tableau 08**). La plus longue gousse de pois fourrager est enregistrée lors de la deuxième campagne, avec une moyenne de 4,90 cm. La longueur de la gousse de pois fourrager a diminué lors de la troisième campagne, atteignant 4,16 cm. L'effet du système de travail du sol sur la longueur de la gousse est non significatif ($P > 0,05$) (**Tableau 08**). Lors de la deuxième campagne, où la pluviométrie dépasse 400 mm, le pois fourrager cultivé en TC a enregistré une longueur de gousse (4,93 cm) supérieure à celle cultivée en SD (4,87 cm) (**Figure 23**). En revanche, lors de la troisième campagne, la culture de pois sous SD a enregistré une longueur de gousse plus élevée (4,24 cm) que celle de pois fourrager cultivés sous TC (4,08 cm) (**Figure 23**).

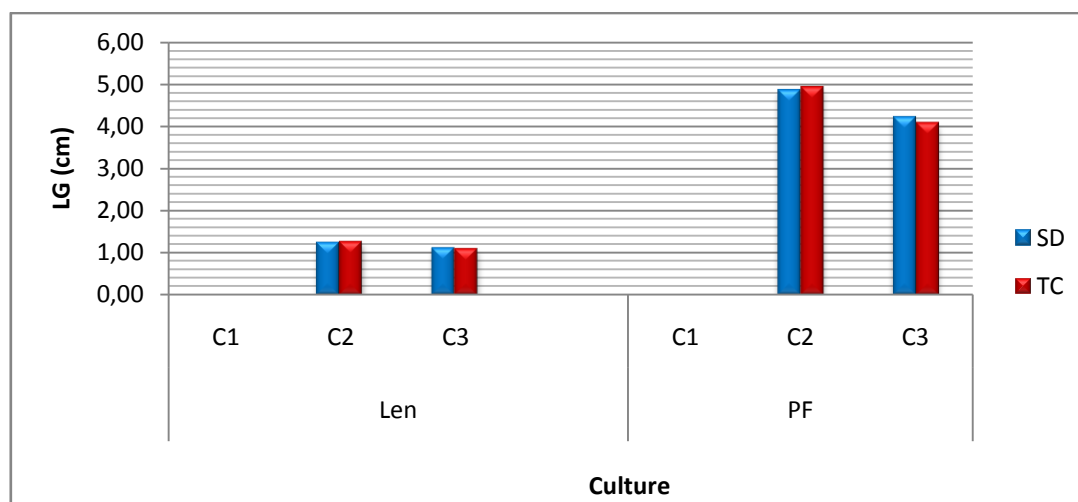


Figure 23 : Longueur de la gousse pour la lentille et le pois fourrager en fonction de mode de travail du sol et de l'année. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, Len : lentille, PF : pois fourrager).

f) Nombre de nodules totaux (Nn_t), actifs (Nn_a) et inactifs (Nn_i) chez la lentille et le pois fourrager

Le nombre total de nodules dans la culture de la lentille a varié de manière très hautement significatif ($P < 0,001$) en fonction de l'année. L'effet du système de travail du sol sur ce paramètre est non significatif ($P > 0,05$) (**Tableau 07**). Le nombre total de nodules (Nn_t) est élevé lors de la deuxième campagne, avec une moyenne de 49,12 nodules par plante. En revanche, Il est plus bas la première année, avec une moyenne de 22,92 nodules par plante. Lors de la troisième campagne, le nombre de Nn_t s'élève à 31,32 nodules par plante. **La figure 24** montre que, durant les trois campagnes, la culture de la lentille conduite en semis direct (SD) a enregistré un nombre de Nn_t plus élevé que celle conduite en travail conventionnel (TC). D'après **Mukherjee et al. (2023)**, le nombre maximum de nodules par plante a été enregistré dans la culture de la lentille conduite en SD.

Le système de travail du sol et l'année ont eu un impact significatif ($P < 0,05$) et très hautement significatif ($P < 0,001$) sur le nombre de nodules actifs (Nn_a) (**Tableau 07**). La culture de lentille de la deuxième année se classe en première position, avec une valeur de 38,35 nodules actifs par plante, suivie de la troisième campagne avec une moyenne de 17,73 Nn_a par plante. La première année se trouve en dernière position avec une moyenne de 16,38 Nn_a par plante. Sur l'ensemble des trois campagnes d'étude, la culture de lentille en technique de non-labour a enregistré des valeurs de nombre de nodules actifs (Nn_a) plus élevées que celle sous labour (**Figure 24**). La différence entre les deux techniques est particulièrement marquée lors de l'année sèche (campagne 2016/17), avec des valeurs de 20,03 Nn_a par plante pour le SD et 12,73 Nn_a par plante pour le TC. En générale, la technique de semis direct a enregistré une plus grande valeur de nodules actifs (26,93 Nn_a /plante) que la technique conventionnelle (21,38 Nn_a /plante).

L'interaction entre le système de travail de sol et l'année a un effet hautement significatif ($P < 0,01$) sur le nombre de nodules inactifs (Nn_i), tandis que l'effet du système de travail du sol et de l'année est non significatif ($P > 0,05$) (**Tableau 07**). Le nombre de nodules

inactifs (Nn_i) augmente de la première à la troisième année, avec des valeurs respectives de 6,53 Nn_i /plante, 10,77 Nn_i /plante et 11,81 Nn_i /plante. Lors de la première campagne, la culture de lentille conduite en TC a enregistré un nombre de nodules inactifs élevé (9,03 Nn_i /plante) par rapport à celle conduite en SD (4,03 Nn_i /plante). Lors des deuxième et troisième campagnes, le nombre de Nn_i est plus élevé pour la culture de lentille conduite en SD que pour celle sous labour conventionnelle (**Figure 24**).

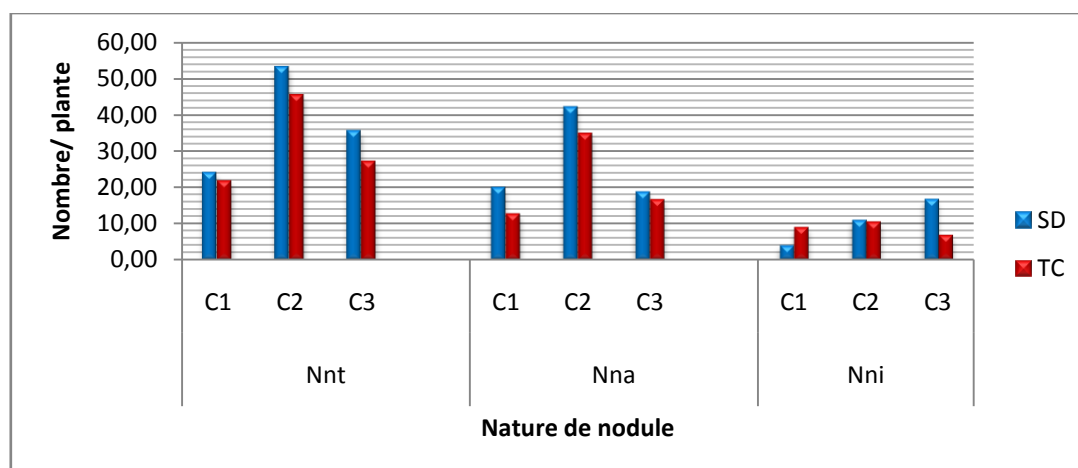


Figure 24 : Nombre des nodules (Nn_t , Nn_a , Nn_i) pour la culture de lentille en fonction de mode de travail du sol et de l'année. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19).

Le nombre total de nodules de la culture de pois fourrager a été significativement ($P < 0,05$) influencé par le système de travail du sol et hautement significativement ($P < 0,01$) affecté par l'année (**Tableau 08**). La culture de pois fourrager lors de la deuxième campagne a enregistré un nombre élevé de Nn_t (34,43 nodules par plante) comparativement à la première et à la troisième campagne, qui ont des moyennes respectives de 24,53 nodules/par plante et 22,46 nodules par plante. Pour les trois campagnes agricoles, la culture de pois fourrager conduite en non-labour a enregistré des valeurs élevées du nombre de nodules totaux, avec des moyennes respectives de 29,43 nodules par plante en 2016/17, 36,87 nodules par plante en 2017/18 et 25,13 nodules par plante en 2018/19 contre 19,63 nodules par plante en 2016/17, 32,00 nodules par plante en 2017/18 et 19,78 nodules par plante en 2018/19 pour la culture de pois fourrager sous labour (**Figure 25**).

Le **tableau 08** montre que l'effet année est très hautement significatif ($P < 0,001$) sur le nombre des nodules actifs (Nn_a), tandis que l'effet du système de travail du sol est non significatif ($P > 0,05$). Lors de la deuxième campagne, le nombre de nodules actifs est plus élevé (28,38 nodules/plante) que celui observé lors de la première (12,88 nodules/plante) et de la troisième campagne (11,74 nodules/plante). La **figure 25** montre que durant les trois campagnes, le nombre de nodules actifs de la culture de pois fourrager conduite en SD (13,63 nodules/plante en 2016/17, 29,87 nodules/plante en 2017/18 et 12,93 nodules/plante en 2018/19) est supérieur à celui des pois cultivés sous labour (12,13 nodules/plante en 2017/18 ; 26,90 nodules/plante en 2017/18 et 10,55 nodules/plante en 2018/19).

Le système de travail du sol, l'année et leur interaction n'ont aucun effet significatif ($P > 0,05$) sur le nombre de nodules inactifs (**Tableau 08**). Le nombre de nodules inactifs de la culture de pois fourrager est plus bas lors de la deuxième année, avec une moyenne de 6,05 nodules/ plante, et plus élevé lors de la première campagne, avec une moyenne de 11,65 nodules/ plante. En générale, la culture de pois fourrager conduite en SD a enregistré un nombre de nodules inactif plus élevé que celui des nodules inactif de la culture de pois cultivée conventionnellement (**Figure 25**).

Les deux espèces de légumineuses, la lentille et le pois fourrager, ont enregistré un nombre élevé de nodules totaux et actifs avec la technique de semis direct comparativement au travail conventionnel. Selon Torabian et al. (2019), le semis direct a amélioré la nodulation et la fixation de l'azote dans les légumineuses en conservant l'humidité et la température du sol, et a également augmenté la biomasse microbienne du sol.

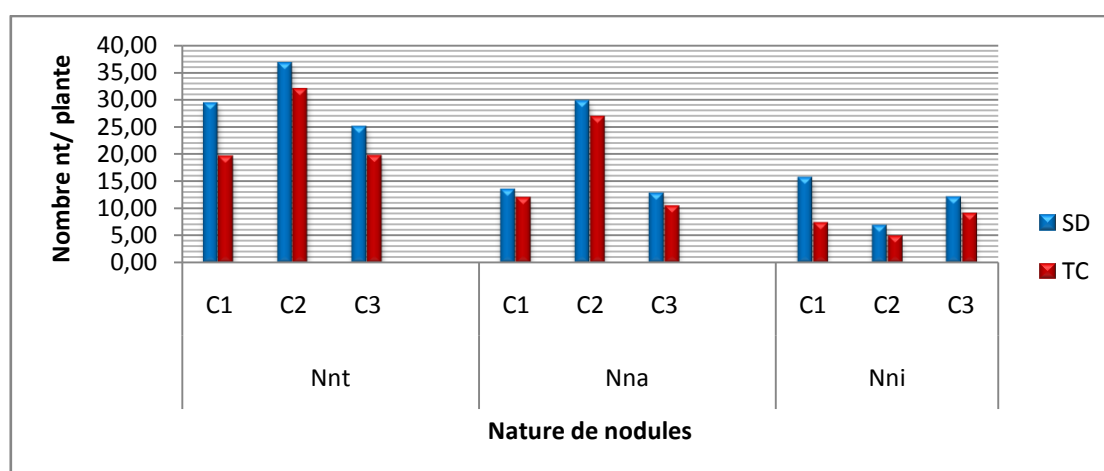


Figure 25 : Nombre de nodules (Nn_t , Nn_a , Nn_i) pour la culture de pois fourrager en fonction de mode de travail du sol et de l'année. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19).

III. 3. Paramètres physiologiques

a. Teneur relative en eau (TRE) (%) pour les céréales (blé et triticale)

La teneur relative en eau (TRE) de la culture de blé a été très hautement significativement affectée ($P < 0,001$) par l'année. L'effet du système de travail du sol sur ce paramètre est non significatif ($P > 0,05$) (**Tableau 05**). Les valeurs de la TRE augmentent de la première année à la troisième année, avec les moyennes suivantes : 50,21 % en 2016/17 ; 63,81 % en 2017/18 et 80,77 % en 2018/19. La teneur relative en eau du blé est faible en 2016/17 par rapport aux autres campagnes en raison du stress hydrique. En effet, en présence de stress hydrique, la plante perd beaucoup plus d'eau que dans des conditions non stressantes (**Larbi & Mekliche, 2004**). Lors de l'année à faible précipitations (2016/17), la culture de blé sous un travail de conservation du sol a enregistré une valeur élevée de TRE (52,24 %) par rapport à celle de la culture de blé sous TC (48,19 %) (**Figure 26**). Pour les années humides (2017/18 et 2018/19), la culture de blé conduite de manière conventionnellement présente des valeurs de TRE élevées (64,99 % et 80,97 % respectivement) comparativement à la culture de blé cultivée en système de conservation (SD) ; 62,63 % et 80,57 % respectivement (**Figure 26**). Dans l'ensemble, la culture de blé sous SD a enregistré une TRE supérieure (65,14 %) à

celle de blé cultivé en TC (64,71 %). D'après **Mekhlouf et al. (2019)**, la culture de blé soumise en semis direct a enregistré une valeur de TRE élevée (79,84 %) contre 76,43 % pour le travail conventionnel.

La teneur relative en eau (TRE) de la culture de triticales a été significativement, très hautement significativement et hautement significativement influencée par le système de travail du sol, l'année et l'interaction entre le système de travail du sol et l'année (**Tableau 06**). La TRE augmente de la première campagne à la troisième campagne, passant de 56,58 % en 2016/17 à 69,48 % en 2017/18 et 77,76 % en 2018/19. Les conditions climatiques ont significativement affecté la TRE de la culture de triticales, cette dernière étant réduite en cas de stress hydrique (**Akbarian et al., 2011 ; Barati et al., 2021**). Au cours des deux premières campagnes (2016/17 et 2017/18), la culture de triticales conduite en SD a enregistré des valeurs élevées de TRE (62,73 % et 70,94 % respectivement) comparativement à celle conduite en TC (50,43 % et 68,02 % respectivement) (**Figure 26**). En revanche, lors de la troisième campagne, la culture de triticales sous TC a enregistré une TRE supérieure (80,01 %) à celle de la culture de triticales conduite en SD (75,52 %). En résumé, la gestion de conservation du sol pour la culture de triticales a enregistré une TRE élevée (69,73 %) comparativement à la gestion conventionnelle (66,15 %).

Selon **Song et al. (2021)**, la teneur en eau des feuilles est étroitement liée à l'activité de photosynthèse, car elle peut fournir des avertissements précoces de sécheresse. La longue période de sécheresse printanière durant la campagne 2016/17 a eu un impact significatif sur la TRE. Dans cette campagne, les valeurs moyennes de TRE de blé et le triticales sont plus élevées dans les parcelles soumises au SD que sous TC. Cette meilleure hydratation des plantes sous la technique de SD indique un moindre impact de la sécheresse sur les cultures de blé et de triticales, qui est l'un des principaux avantages de ce système. À l'inverse, lors de l'année pluvieuse, on a observé que la TRE était plus élevée pour les cultures de blé et de triticales sous la gestion conventionnelle que pour celles conduites en système de conservation (SD).

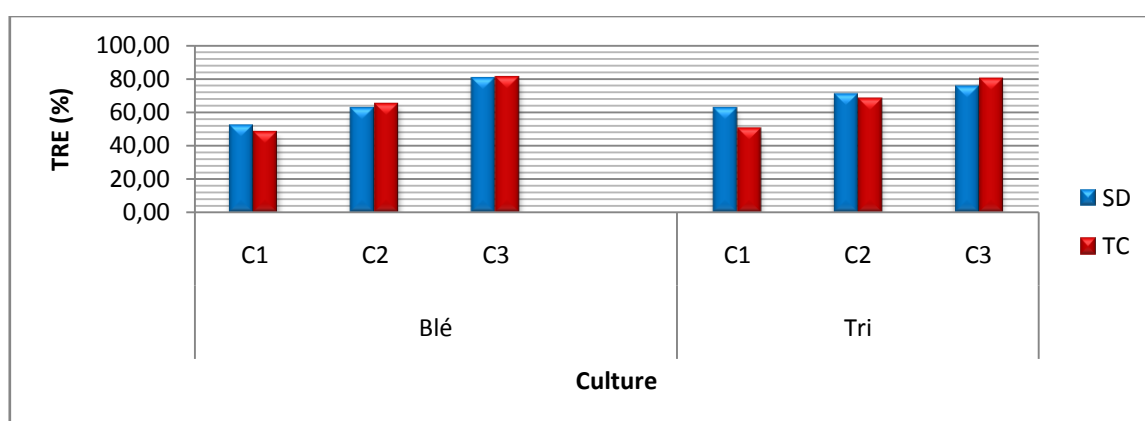


Figure 26 : Teneur relative en eau des cultures de blé et de triticales en fonction de mode de travail du sol et de l'année. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, Tri : triticales).

b. Teneur en chlorophylle (TCH)

Un effet très hautement significatif de l'année a été détecté sur la teneur en chlorophylle de la culture de blé (**Tableau 05**). La teneur en chlorophylle de la culture de blé diminue de la première campagne à la troisième campagne, avec des moyennes respectives de 28,13 SPAD en 2016/17, 27,30 SPAD en 2017/18 et 21,53 SPAD en 2018/19. Le système de travail du sol n'a aucun effet significatif sur la teneur en chlorophylle, ce qui corrobore les résultats de **Wafae et al. (2023)**, tandis que l'effet de l'interaction entre le système de travail du sol et l'année est hautement significatif ($P < 0,01$). Lors de la première et de la troisième campagne, la culture de blé a enregistré des valeurs de TCH plus élevées en technique conventionnelle qu'en semis direct (SD). En revanche, lors de la deuxième, la culture de blé en technique de SD a enregistré une valeur de TCH plus élevée que celle sous travail conventionnel (TC) (**Figure 27**). En résumé, la gestion conservatrice du sol a permis d'obtenir une valeur de TCH plus élevée (25,76 SPAD) que la gestion conventionnelle (25,55 SPAD). D'après **Wafae et al. (2023)**, la teneur en chlorophylle de blé est plus élevée en semis direct qu'en travail conventionnel.

Le **tableau 06** montre qu'il y a un effet hautement significatif du système de travail du sol ($P < 0,01$). L'effet de l'année et de l'interaction entre le système de travail du sol et l'année est très hautement significatif. La teneur en chlorophylle de la culture de triticales est la plus élevée lors de la deuxième campagne, avec une moyenne de 37,03 SPAD, suivie de la troisième campagne avec une valeur de 28,57 SPAD, et enfin la première campagne avec une moyenne de 24,29 SPAD. La **figure 27** illustre que lors de la première et de la deuxième campagne, la culture de triticales cultivée en SD a enregistré des valeurs de TCH élevées que celle conduite en TC (22,31 SPAD et 25,89 SPAD respectivement). En revanche, lors de la troisième campagne, la gestion conventionnelle du sol a permis à la culture de triticales d'enregistrer une valeur de TCH supérieure (31,15 SPAD) à celle sous SD (25,98 SPAD). Dans l'ensemble, la gestion conservatrice du sol a favorisé la culture de triticales, qui a enregistré une concentration de TCH plus élevée (33,47 SPAD) que la gestion conventionnelle basée sur le labour (26,45 SPAD).

La teneur élevée en chlorophylle maintient le rendement en grains de la culture de blé, en particulier dans les conditions de sécheresse et de hautes températures de fin de cycle, qui coïncide avec la phase critique de remplissage des grains (Shirvani et al., 2021). Au cours de la campagne 2016/17, les valeurs moyennes de la TCH pour la culture de blé et de triticales sont plus élevées dans les parcelles sous la gestion de SD que dans celles soumises à la TC, Cela indique l'effet positif du semis direct sur le rendement en grains de blé et de triticales, notamment dans les conditions de sécheresse de fin du cycle des céréales, qui sont très fréquentes dans la zone semi-aride.

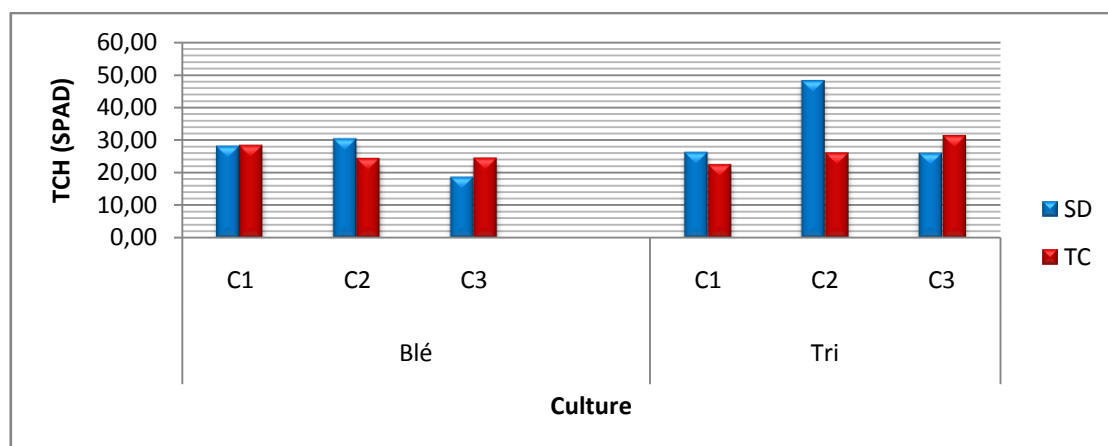


Figure 27 : Teneur en chlorophylle des cultures de blé et de triticales en fonction de mode de gestion du sol et de l'année. (SD : semis direct, TC : travail conventionnel, C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, Tri : triticales).

Tableau 05 : Carrés moyens de l'analyse de la variance du rendement et ces composantes pour la culture de blé

Sour ce de varia tion	D D L	NPM	NTM	NEM	N GE	PMG	RR	RP	BM	IR	TRE	TC H	HT	LE	LB	LS R
STS	1	10153, 60***	392247, 01***	7565,2 4*	0,0 05 ns	12,84 ns	56,36 **	4,08 ns	90,77	0,02 ***	0,83 ns	0,20 ns	110,3 6***	1, 76 ns	2,03 **	9,6 8 ns
Cam.	2	222,97 ***	493050, 85***	26351, 90***	77, 40*	417,4 1***	385,5 1***	38159, 78***	46009, 18***	0,06 ***	1406,0 8***	77,6 6***	691,7 7***	0, 35 ns	2,82 ***	10, 69*
STS* Cam.	2	16,88* **	232791, 74***	1793,5 7 ns	87, 85*	11,08 ns	3,90 ns	186,58 ns	171,26 ns	0,01 *	16,21 ns	52,3 4**	20,00 *	1, 81 ns	0,26 ns	0,8 2 ns
CV (%)	//	0,34	0,64	0,28	0,2 4	0,17	0,44	0,89	0,8	0,42	0,2	0,18	0,19	0, 2	0,08	0,1 4
Ecart- type	//	72,70	336	68,60	5,9 4	7,34	7,25	68,56	75,12	0,10	13,18	4,50	9,66	1, 15	0,81	1,8 4

* : effet significatif ; ** : effet hautement significatif ; *** : effet très hautement significatif ; ns : effet non significatif, Cam. : Campagne, STS : système de travail du sol.

Tableau 06 : Carrés moyens de l'analyse de la variance du rendement et ces composantes pour la culture de triticales

Sour ce de varia tion	D D L	NPM	NTM	NEM	NGE	PMG	RR	RP	BM	IR	TRE	TCH	HT	LE	LB	LS R
STS	1	3119,9 7*	106194 ,43*	1653,2 0 ns	83,21 ns	7,53 ns	39,77 ns	6181,9 8**	5244,9 3**	0,02 *	57,67 *	221,6 9**	157,2 4*	0,06 ns	0,40 ns	1,9 7 ns
Cam.	2	28393, 22***	391600 ,83***	15640, 14***	342,1 4***	152,5 6***	467,0 1***	33490, 82***	41655, 67***	0,03 ***	683,6 7***	251,9 0***	1343, 58***	6,71 ***	2,16 ***	33, 27*
STS* Cam.	2	898,55 ns	123038 ,83**	921,28 ns	112,4 5*	37,33 *	152,3 8***	3333,6 5*	2373,3 3*	0,02 *	106,2 8**	292,9 5***	64,41 ns	3,11 *	0,17 ns	1,7 3 ns
CV (%)	//	0,3	0,56	0,23	0,26	0,15	0,5	0,9	0,78	0,38	0,16	0,32	0,21	0,15	0,11	0,1 8
Ecart- type	//	64,07	275,03	52,77	8,57	5,30	9,49	71,10	76,48	0,09	10,68	9,56	13,81	1,24	0,66	2,7 9

* : effet significatif ; ** : effet hautement significatif ; *** : effet très hautement significatif ; ns : effet non significatif, Cam. : Campagne, STS : système de travail du sol.

Tableau 07 : Carrés moyens de l'analyse de la variance du rendement et ces composantes pour la culture de la lentille

Sourc e de variati on	D D L	NPM	NFP	N R _p	Nn _o /P	Nn _i /P	Nn _i /P	RR	Bio	IR	NG/P	NG G	HP	LG	PMG	LSR
STS	1	2702,3 5***	681,79 **	0,1 2 ns	138,9 4*	13,7 3 ns	168,48 ns	16,47 **	14,54 ns	0,03 ***	95,22 ***	0,01 ns	0,28 ns	0,00 ns	5,12 ns	0,90 ns
Cam.	2	8541,3 4***	2553,4 4***	0,2 9*	909,4 7***	46,9 0 ns	1073,7 5***	30,63 ***	1421,8 3***	0,07 ***	218,0 6***	4,47 ***	157,7 0***	2,90 ***	3370,1 4***	131,2 6***
STS* Cam.	2	1274,0 5**	430,55 **	0,3 2*	13,16 ns	84,6 2**	16,64 ns	13,07 ***	37,62 ns	0,02 ***	28,14 **	0,01 ns	50,31 ***	0,00 1 ns	6,89 ns	6,79 ns
CV (%)	//	0,18	0,62	0,1 4	0,47	0,51	0,38	1,13	0,79	1,17	0,88	0,77	0,20	0,73	0,74	0,25
Ecart- type	//	37,46	21,01	0,3 4	11,37	4,9	13,01	2,68	13,47	0,12	6,07	0,75	5,12	0,59	20,11	4,27

* : effet significatif ; ** : effet hautement significatif ; *** : effet très hautement significatif ; ns : effet non significatif, Cam. : Campagne, STS : système de travail du sol.

Tableau 08 : Carrés moyens de l'analyse de la variance du rendement et ces composantes pour la culture de pois fourrager

Sourc e de variati on	D D L	NPM	NFP	N R _p	Nn _o /P	Nn _i /P	Nn _i /P	RR	Bio	IR	NG/ P	NG G	HP	LG	PMG	LSR
STS	1	70,10 ns	0,69 ns	0,0 04 NS	23,44 ns	86,8 1ns	200, 47*	39,31 ns	2,35 ns	0,01 ns	0,59 ns	0,87 *	345,85 ns	0,01 ns	296,06 ns	50,77 ***
Cam.	2	19449, 49***	24,7 4***	0,3 1 ns	518,4 4***	53,9 7 ns	245, 81**	582,5 8***	4819,5 1***	0,28 ***	43,9 9***	86,7 6***	2120,1 8***	41,8 5***	17830, 07***	111,8 9***
STS* Cam.	2	1357,0 7*	0,04 ns	0,1 3 ns	0,82 ns	17,6 1 ns	11,0 8 ns	16,93 ns	144,26 ns	0,00 2 ns	0,64 ns	0,47 ns	28,46 ns	0,02 ns	205,62 ns	13,61 ***
CV (%)	//	0,29	0,5	0,2 8	0,47	0,6	0,31	1,07	0,77	1,06	0,81	0,74	0,39	0,74	0,75	0,3
Ecart- type	//	51,82	1,90	0,5 6	8,30	5,71	8,36	9,08	25,02	0,19	2,39	3,23	18,28	2,22	46,81	4,36

* : effet significatif ; ** : effet hautement significatif ; *** : effet très hautement significatif ; ns : effet non significatif, Cam. : Campagne, STS : système de travail du sol.

III.4. Rentabilité économique (fondée sur le ratio coût-Bénéfices) (RCB)

D'après le **tableau 09**, le RCB a été très hautement significativement ($P < 0,001$) affecté par le système de travail du sol, la campagne agricole et les cultures.

En raison de l'absence d'opérations de préparation du sol (labour, préparation du lit de semence, roulage) dans la technique de semis direct, le coût de production en semis direct (SD) était faible qu'en travail conventionnel (TC). Pour cette raison, le RCB était faible en TC (0,62) et élevé en SD (1,93). Selon **Husnain et al. (2011)**, le ratio coût-bénéfices est plus élevé dans la pratique du semis direct que dans la technique de travail conventionnel. **Ercoli et al. (2016)** ont souligné que les coûts de production totaux, comprenant les coûts des opérations agricoles ; labour, et les façons superficielles sont plus élevées principalement dans le travail conventionnel que dans la technique de semis direct.

La comparaison des moyennes de RCB entre les campagnes agricoles (2016/17, 2017/18 et 2018/19) a montré que la rentabilité des cultures est plus élevée dans les années pluvieuses que dans les années sèches. Nous avons observé que le RCB était élevé lors de la

deuxième campagne (pluvieuse) avec une moyenne de 2,38, suivi de la troisième campagne avec une valeur égale à 1. La première campagne a enregistré le RCB le plus faible (0,45) en raison d'une période de sécheresse sévère qui a eu un impact négatif sur le rendement des cultures, entraînant un coût de production total plus élevé que le revenu.

Lors de la première campagne (2016/2017), bien que les RCBs de lentille et des pois fourrager soient nuls, le RCB global pour 2016/2017 est supérieur à 0 en raison d'une compensation entre les RCBs des différentes cultures, notamment grâce aux RCBs du blé et du triticale. Selon **Helmerts et al. (2001)**, la rotation des cultures peut réduire les risques économiques grâce à la diversification, où les faibles rendements d'une culture sont compensés par des rendements relativement élevés d'une autre culture.

L'interaction entre le système de travail du sol et la campagne agricole a un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) sur le RCB (**Tableau 09**). Les deux systèmes de gestion du sol ont enregistré des valeurs de RCA élevées lors de la deuxième campagne ($RCB_{SD} = 3,66$ et $RCB_{TC} = 1,09$). Dans les années où la pluviométrie était moyenne (2018/19) ou faible (2016/17), le SD s'est révélé plus rentable ($RCB_{18/19SD} = 1,43$ et $RCB_{16/17SD} = 0,70$) que la technique de labour ($RCB_{18/19TC} = 0,57$ et $RCB_{16/17TC} = 0,20$) (**Figure 28**). Le système de semis direct améliore le ratio coût-avantages par rapport au système conventionnel (**Singh et al., 2021**).

Il a été observé qu'en année sèche (2016/17), les avantages économiques de la technique de SD sont supérieurs à ceux de TC, ce qui se traduit par un $RCB_{16/17SD}$ (0,70) plus élevé que le $RCB_{16/17TC}$ (0,20). Selon **Cociu (2019)**, les avantages économiques du système de semis direct peuvent découler d'une sensibilité moindre à la sécheresse grâce à la conservation de l'eau dans le sol et à sa disponibilité pour les plantes, ce qui se traduit par des rendements plus stables.

Les résultats de notre essai montrent que la culture de pois fourrager est plus rentable en zone semi-aride avec un RCB égal à 1,88 suivie par les céréales blé et triticale, qui affichent des valeurs de 1,59 et 1,10 respectivement. D'après nos résultats, la culture de lentilles est moins rentable ($RCB = 0,52$) en zone semi-aride, car les revenus sont inférieurs aux coûts de production (**Figure 28**).

Le ratio coûts-avantage a été très hautement significativement influencé par l'interaction entre cultures et campagnes agricoles (**Tableau 09**). Les quatre cultures ont enregistré des valeurs de RCB élevées lors de la deuxième campagne (**Figure 28**), en raison des rendements élevés des quatre cultures durant cette campagne, ce qui a entraîné des revenus totaux supérieurs aux coûts de production totaux et donc un RCB élevé. *On peut conclure que la rentabilité des cultures est directement liée au rendement : lorsque le rendement augmente et la rentabilité augmente également.*

L'interaction entre le système de travail du sol et la culture a un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) sur le RCB (**Tableau 09**). **La figure 28** montre que durant les trois campagnes agricoles, les quatre cultures sont économiquement rentables en technique de SD qu'en TC, notamment dans les saisons à faible pluviométrie, où les rendements des cultures sont très faibles. **Pooniya et al. (2022)** ont montré que les rendements élevés combinés à des

coûts de production faibles en technique de semis direct se traduisent par une rentabilité économique élevée.

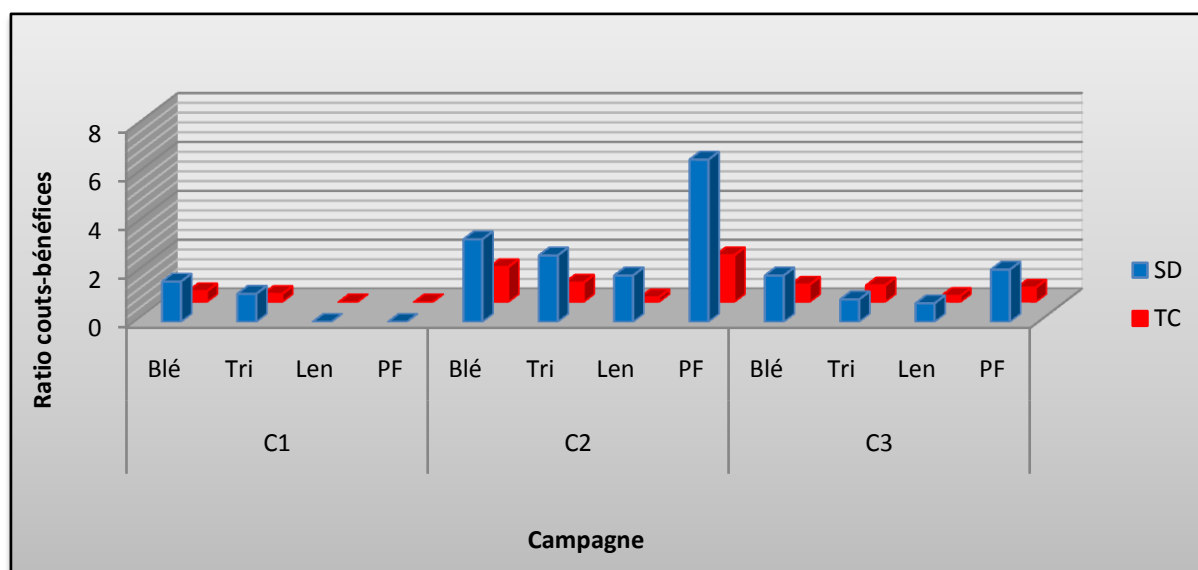


Figure 28 : Ratio coûts-bénéfices des cultures de rotation en fonction des techniques de gestion du sol. (C1 : campagne 2016/17, C2 : campagne 2017/18, C3 : campagne 2018/19, SD : semis direct, TC : travail conventionnel, Tri : triticales, Len : lentille, PF : pois fourrager).

Tableau 09 : Analyse de la variance du ratio coûts-bénéfices

Source de variation	DDL	Moyennes des carrés	F
Systèmes de travail du sol	1	30,82	152,35***
Campagnes agricoles (années)	2	23,62	116,77***
Cultures	3	6,41	31,68***
Systèmes de travail du sol x Campagnes agricoles	2	7,31	36,12***
Systèmes de travail du sol x Cultures	3	1,58	7,82***
Campagnes agricoles x Cultures	6	3,92	19,38***
Système de travail du sol x Campagnes x Cultures	6	1,30	6,41***

*** : Variation très hautement significative ($P < 0,001$)

III.5. Etude d'analyse en composante principale (ACP)

Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée pour vérifier la localisation des traitements de chaque culture conduite (blé, triticales, lentille et pois fourrager) dans les deux modes de gestion du sol (semis direct et travail conventionnel) au cours des trois campagnes agricoles.

Pour la culture de blé (**Figure 29**), les deux premiers axes de l'ACP expliquent **81,75 %** de la variation totale.

L'axe 1 explique **46,72 %** de la variance totale et est principalement constitué des variables suivantes : **NTM (13,57 %)**, **NEM (11,64 %)**, **RP (11,79 %)**, **RR (8,39 %)** et **RCA (6,87 %)** dans la direction positive. En revanche, dans le sens négatif, on trouve les variables **NGE (7,39 %)**, **IR (10,85 %)** et **TRE (4,92 %)** (**Figure 29**). On peut conclure que lorsque le

rendement en grains (RR) augmente, le nombre de grains par épi (NG/E) diminue, en raison d'augmentation du poids de grains par épi.

L'axe 2, qui représente 35,03 % de l'information totale, illustre la variation des variables **PMG (18,25 %)**, **RR (9,13 %)**, **TRE (12,39 %)**, **HT (17,24 %)** et **LSR (18,33 %)** dans la direction positive. Dans le sens négatif, on observe les variations de **NPM (8,68 %)**, **TCH (4,70 %)** et **NEM (1,46 %)** (**Figure 29**). L'opposition entre la TRE et TCH montre que lorsque la teneur en eau augmente (TRE), la teneur en chlorophylle (TCH) diminue, ce qui indique qu'il existe une corrélation négative entre la teneur relative en eau et la teneur en chlorophylle.

La projection des systèmes de travail du sol sur le plan (1-2) (**Figure 29**) révèle une nette opposition entre la campagne 2016/17, qui a été une année défavorable (pluviométrie faible), et les campagnes 2017/18 et 2018/19, caractérisées par une pluviométrie élevée et mieux répartie. En 2016/17 (année sèche), des niveaux élevés de teneur en chlorophylle (TCH), de nombre d'épis par mètre carré (NE/M²) et de nombre de talles par mètre carré (NT/M²) ont été enregistrés en semis direct, associés à un PMG et un rendement en grains (RR) faibles, en raison de la rareté de l'eau et des températures élevées pendant la période de remplissage de grains. En semis direct et en travail conventionnel, des PMG, des rendements en grains (RR), des rendements en paille (RP) et des ratios coûts-avantages (RCA) élevés ont été observés durant l'année humide (2017/18), résultants d'une meilleure utilisation de l'eau des pluies pendant cette campagne. En semis direct, la culture de blé montre une longueur de système racinaire élevée lors de la troisième campagne (2018/19), ce qui est due à l'amélioration des propriétés physiques du sol (porosité), essentiellement grâce aux effets des différentes cultures précédentes introduites dans la rotation (blé, triticales, lentille et pois fourrager).

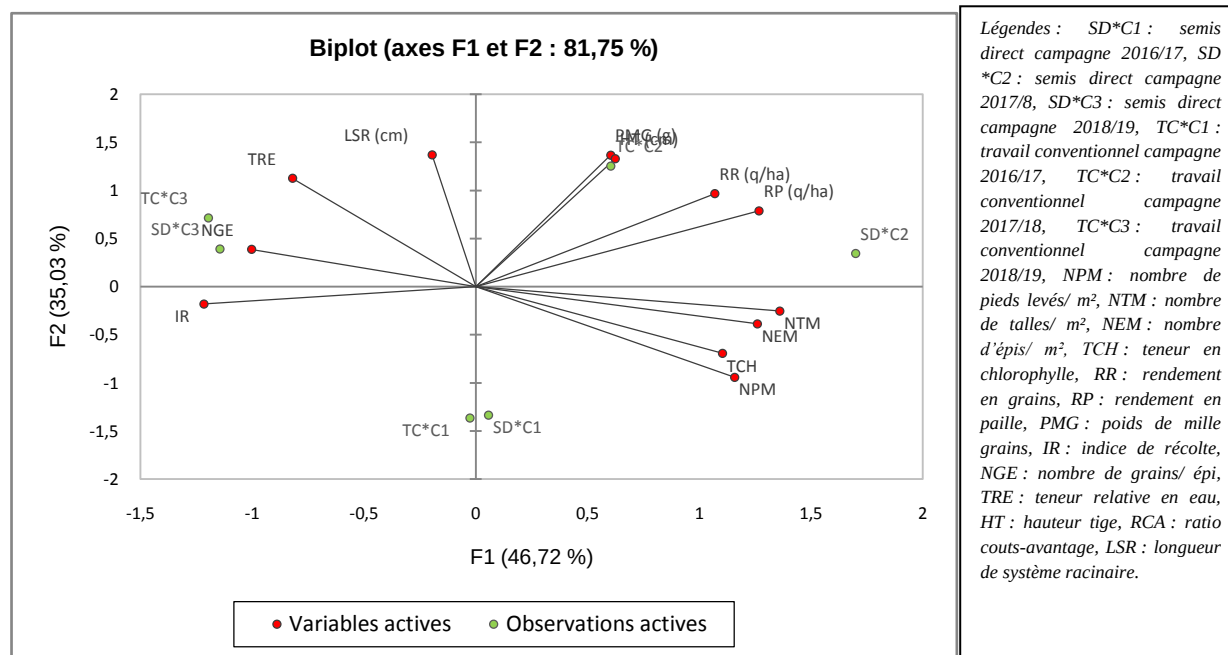


Figure 29 : Projection des systèmes de travail du sol et les variables de la culture de blé sur le plan factoriel (1-2).

Pour la culture de triticales (**Figure 30**), les deux premiers axes de l'ACP expliquent **78,80 %** de la variation totale.

L'axe 1 explique **49,29 %** de la variance totale et est principalement formé par les variables **NGE (11,06 %)**, **PMG (13,85 %)**, **RR (12,73 %)**, **LSR (11,42 %)**, **HT (14,42 %)**, **TCH (8,24 %)** et **RCA (5,94 %)** dans la direction positive. Cependant, dans le sens négatif, on trouve les variables **NEM (0,07 %)** et **NPM (2,95 %)** (**Figure 30**). Le nombre de grains par épi (NG/E), le PMG et le rendement en grains (RR) sont corrélés négativement au nombre d'épis/m², ce qui montre que lorsque le NEM diminue, le rendement augmente en raison de l'augmentation du NGE et de l'amélioration du PMG.

L'axe 2, qui représente **29,51 %** de l'information totale, montre la variation de **NPM (20,60 %)**, **NTM (17,41 %)**, **NEM (25,40 %)**, **RR (2,56 %)**, **TCH (2,15 %)** et **RCA (5,58 %)** dans la position positive, tandis que dans le sens négatif, on trouve la variation de **TRE (13,01 %)**, **LSR (1,04 %)** et **PMG (1,88 %)** (**Figure 30**). Cela montre qu'il existe une corrélation négative entre la TRE et la TCH, lorsque la teneur en eau des feuilles augmente, la teneur en chlorophylle diminue en raison de la dilution de l'azote.

La projection des systèmes de travail du sol sur le plan (1-2) (**Figure 30**) montre une nette opposition entre la campagne 2016/17, qui a été une année défavorable (pluviométrie faible) et les deux campagnes 2017/18 et 2018/19, qui ont été caractérisées par une pluviométrie élevée et mieux répartie. En 2017/18, le rendement en grains (RR), le ratio coûts-avantages (RCA) et le rendement en paille (RP) sont élevés dans les deux techniques de travail du sol (SD et TC), associés au PMG, à la teneur relative en eau (TRE) et à une longueur de système racinaire faible, résultant d'une meilleure disponibilité et utilisation de l'eau du sol par la culture de triticales. En semis direct, le nombre de pieds levés/m² et le nombre d'épis/m² élevés ont été enregistrés durant la campagne 2016/17, associé à un faible rendement en grains et en paille, ainsi qu'à une faible rentabilité économique à cause de la sécheresse sévère qui s'est installée durant la période printanière de mars à mai, coïncidant avec la phase de remplissage des grains de triticales.

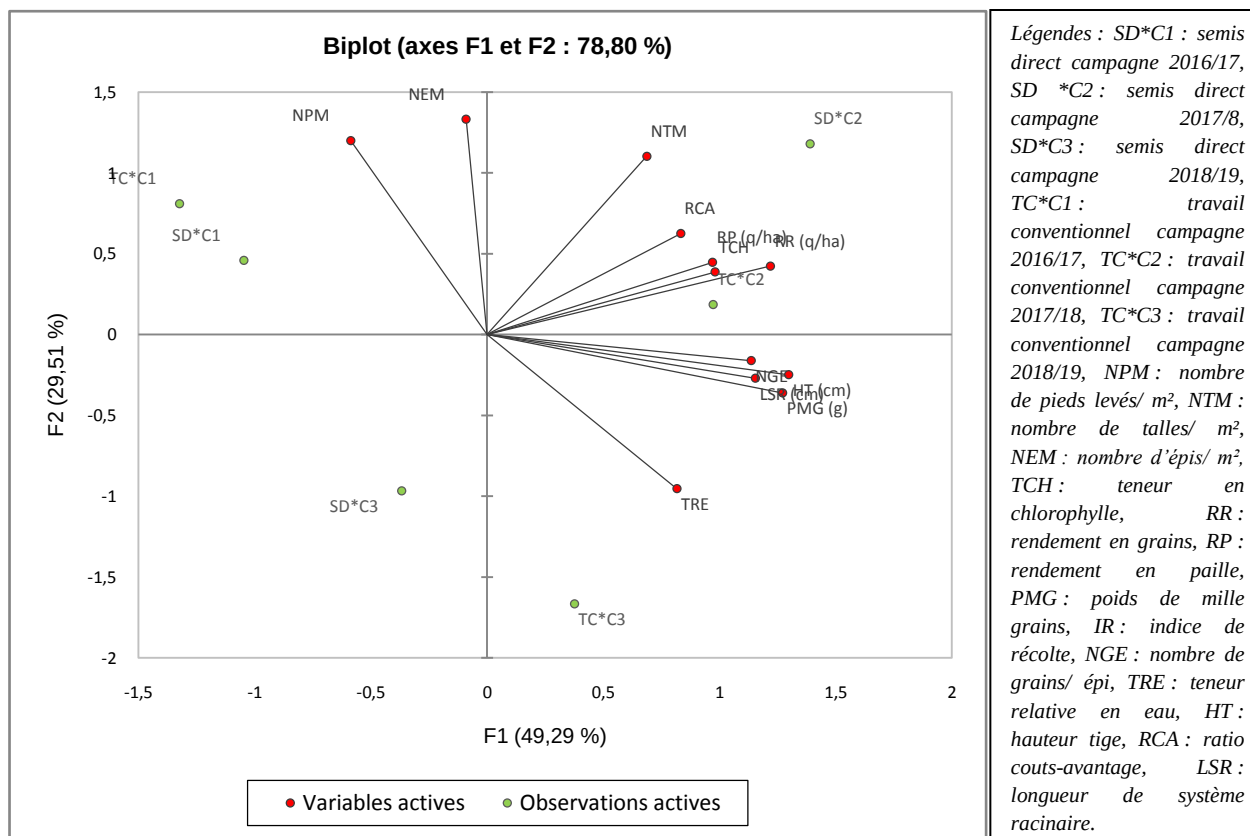


Figure 30 : Projection des systèmes de travail du sol et les variables de la culture de triticale sur le plan factoriel (1-2).

Pour la culture de la lentille (**Figure 31**), les deux premiers axes de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) expliquent **81,91 %** de la variation totale.

L'axe 1, qui explique **60,95 %** de la variance totale, est principalement formé par les variables suivantes dans le sens positif : **Nnt/ P (10,12 %)**, **NGG (10,44 %)**, **PMG (9,27 %)**, **RR (9,47 %)**, **IR (9,29 %)**, **NG/ P (9,21 %)** et **RCA (8,06 %)**. Cependant, on observe un positionnement négatif pour le **NPM (0,45 %)** (**Figure 31**). Ce résultat indique qu'il existe une relation négative entre le NPM et l'indice de récolte ; lorsque le nombre de pieds levés par m² augmente, l'indice de récolte diminue en raison de l'augmentation de la biomasse de la culture de la lentille.

L'axe 2, qui représente **20,96 %** de l'information totale, montre la variation positive de la **NPM (29,18 %)**, **Nna/ P (10,26 %)**. En revanche, dans le sens négatif, on observe la variation de **NFP (24,97 %)**, **Nni/ P (8,29 %)** et le **PMG (5 %)** (**Figure 31**). Ce résultat indique qu'avec l'augmentation du nombre de nodules actifs, le nombre de nodules inactifs diminue, ce qui est dû à la fixation symbiotique élevée de l'azote atmosphérique, favorisée par une activité accrue des bactéries fixatrice d'azote.

La projection des systèmes de travail du sol sur le plan (1-2) (**Figure 31**) montre une nette opposition entre la campagne 2016/17, qui a été une année défavorable (pluviométrie faible), et les deux campagnes 2017/18 et 2018/19, caractérisées par une pluviométrie élevée et mieux répartie. En 2017/18 et 2018/19 (années pluvieuses), le nombre de nodules actifs (Nna), le rendement en grains (RR) et le ratio coûts-avantages élevés sont observé en travail

de conservation, associé à un faible nombre de pieds levés par m², en raison de la meilleure répartition de la pluviométrie durant ces campagnes. En 2016/17, le nombre de pieds levés par m² est enregistré en SD, en raison de l'humidité du sol élevée qui favorise la germination des graines de lentilles, mais cela est associé à un rendement en grains faible, dû principalement à la sensibilité de la culture de la lentille à la sécheresse printanière.

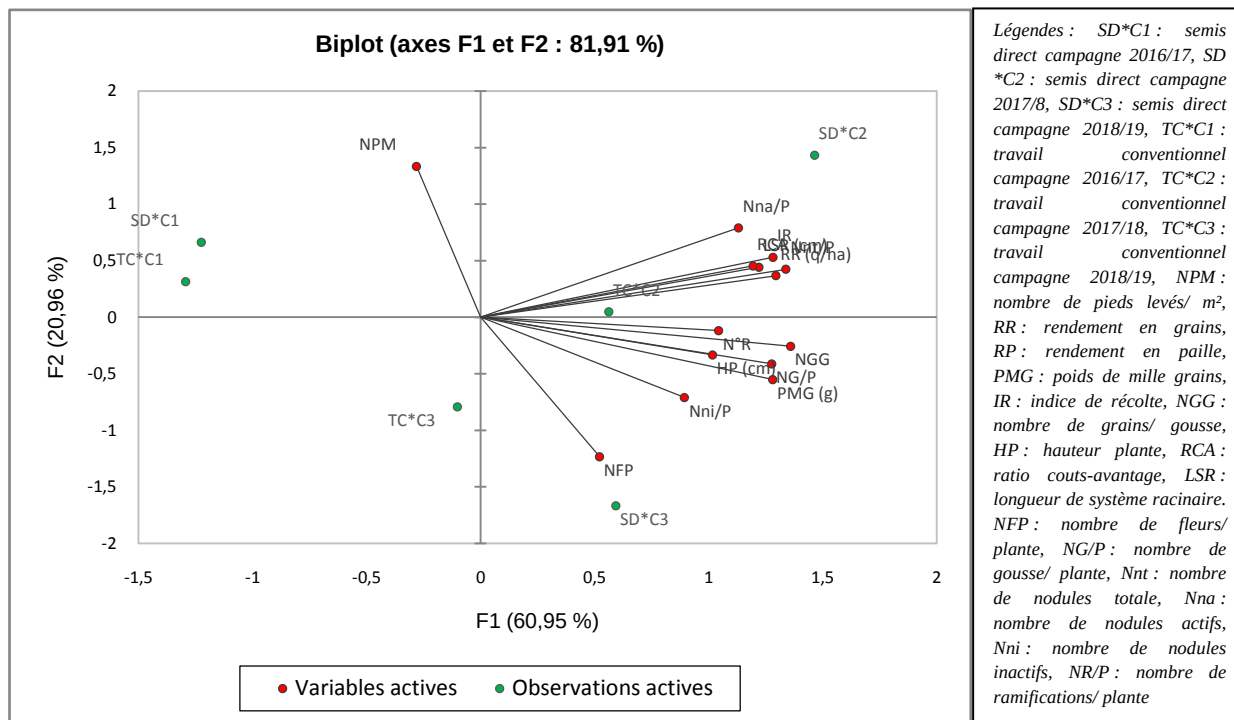


Figure 31 : Projection des systèmes de travail du sol et les variables de la culture de lentille sur le plan factoriel (1-2).

Pour la culture de pois fourrager (**Figure 32**), les deux premiers axes de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) expliquent **87,89 %** de la variation totale.

L'axe 1 explique **67,58 %** de l'information de la variance totale, et est principalement formé par les variables suivantes : **NFP (10,32 %)**, **RR (10,46 %)**, **IR (10,29 %)**, **NGP (9,59 %)**, **HP (10,07 %)**, **PMG (7,86 %)**, **RCA (8,20 %)** et **Nna (8,42 %)** dans le sens positif (**Figure 32**). Ce résultat montre qu'il existe une corrélation positive entre le rendement en grains, le PMG, le nombre de gousse par plante et le ratio coûts-avantages. Lorsque le nombre de gousses par/ plante augmente, le PMG augmente également, ce qui améliore en grains et influe positivement sur la rentabilité économique de la culture de pois fourrager.

L'axe 2, qui représente **20,31 %** de l'information de la variance totale, met en évidence la variation de **NPM (31,72 %)**, **NR/P (21,09 %)** et **Nnt (9,22 %)** dans la direction positive. Dans la direction négative, on observe la variation de **NGG (11,23 %)**, **LSR (6,66 %)**, **PMG (8,67 %)** et **NG/P (3,16 %)** (**Figure 32**). D'après ces résultats, on peut conclure qu'il existe une corrélation négative entre la longueur du système racinaire (LSR) et le nombre total de nodules (Nnt). Un système racinaire long pour le pois fourrager se caractérise par un nombre faible de nodules.

La projection des systèmes de travail du sol sur le plan (1-2) (**Figure 32**) montre une nette opposition entre les campagnes d'études. En 2017/18 (année à forte pluviométrie), des rendements en grains (RR), PMG, nombre de gousse par plante (NGP), nombre de grains par gousse (NGG) et RCA élevés ont été enregistrés avec la technique de semis direct. Cela est dû à une meilleure répartition et utilisation des précipitations durant cette campagne. Le système de labour, quant à lui, est associé à une longueur de système racinaire élevée en raison d'une faible densité apparente et d'une résistance à la pénétration, ainsi que d'une meilleure porosité qui favorise l'élongation des racines. Les rendements en grains et la rentabilité économique sont faibles lors de la première et de la troisième campagne, ce qui montre que la rentabilité de la culture de pois fourrager est liée à son rendement, lequel dépend essentiellement de la quantité et la répartition des pluies durant la saison de croissance.

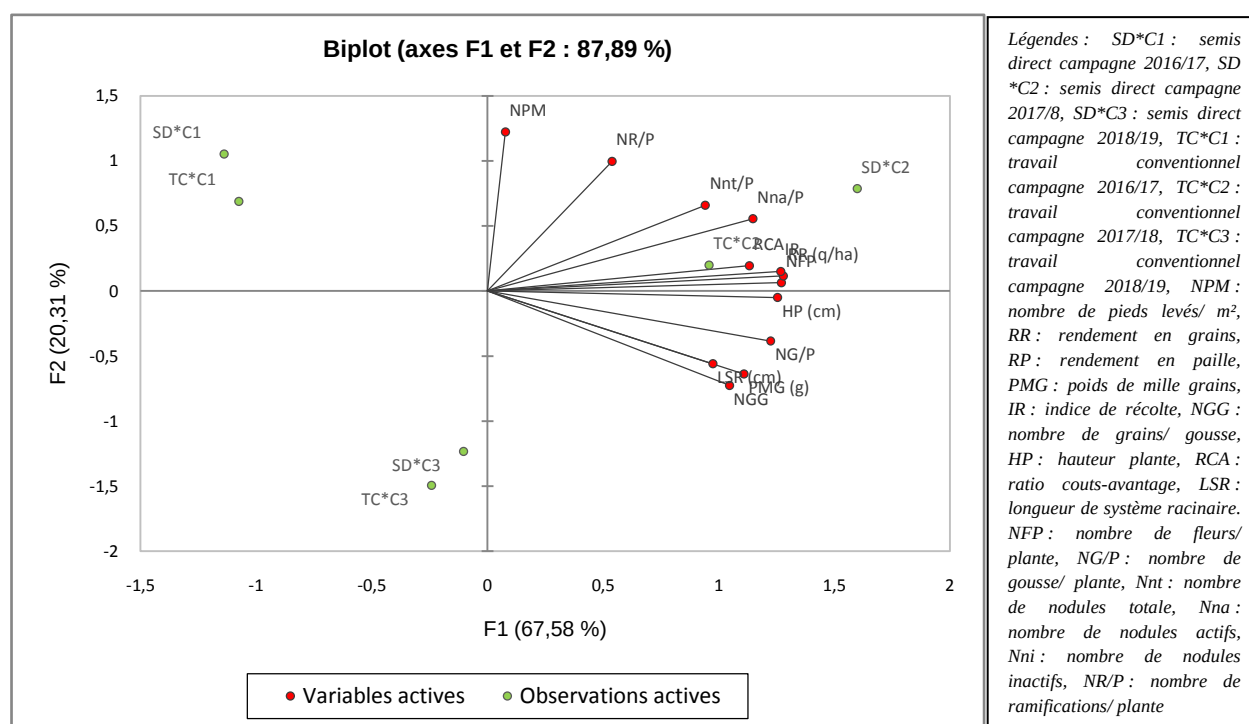


Figure 32 : Projection des systèmes de travail du sol et les variables de la culture de pois fourrager sur le plan factoriel (1-2).

Conclusion

Le travail conventionnel du sol favorise l'élongation des racines des cultures en rotation (blé, triticale, lentille et pois fourrager) mieux que la technique de semis direct, grâce à la création d'une excellente structure de sol par les opérations de labour (faible densité apparente, une résistance pénétrométrique faible et porosité élevée).

Les cultures céréalières (blé et triticale) soumises en travail conventionnel présentent des valeurs moyennes de teneur relative en eau et en chlorophylle plus faibles que celles cultivées en semis direct, ce qui suggère que cette technique augmente la résistance des cultures à la sécheresse.

Les rendements de l'ensemble des cultures (blé, triticale, lentille et pois fourrager) sont plus vulnérables aux fluctuations des précipitations au cours des campagnes agricoles.

Les rendements sont plus élevés lors des années pluvieuses (campagne 2017/18 et 2018/17) et plus faibles durant les années sèches (campagne 2016/17).

Les résultats ont montré que le rendement des quatre cultures est plus important en semis direct qu'en travail conventionnel dans la zone semi-aride de l'est de l'Algérie, en raison de la conservation de l'humidité du sol grâce à cette technique, ce qui est influencé positivement le rendement grainier des cultures en rotation (blé, triticales, lentille et pois fourrager).

La rentabilité économique des cultures est directement liée à leur rendement, et par conséquent lié à la quantité et à la répartition des précipitations durant les saisons de croissance. Ainsi, la rentabilité des cultures est élevée lors de la deuxième campagne (pluvieuse) et faible lors de la première et de la troisième campagne (de moyenne à faible pluviométrie, respectivement).

Des rendements élevés, une rentabilité économique accrue et des coûts de production faibles sont des avantages importants qui militent en faveur de l'application de la technique de semis direct dans la zone semi-aride d'Algérie. Notre étude suggère que l'introduction d'une légumineuse fourragère économiquement rentable, comme le pois fourrager, dans un système de culture basé sur le blé est recommandée dans cette zone, en raison des effets bénéfiques de cette culture sur le sol et l'environnement.

L'association entre la diversification des cultures par la succession culturale et la technique de semis direct a des effets positifs sur les plans environnemental, économique et agronomique. Il est donc nécessaire d'encourager cette technologie dans les zones semi-arides d'Algérie pour promouvoir une agriculture plus durable.

Références bibliographiques

1. Akbarian A., Arzani A., Salehi M., Salehi M., 2011. Evaluation of triticales genotypes for terminal drought tolerance using physiological traits. *Indian Journal of Agriculture Sciences*, 81 (12) : 1110-1115.
2. Almaz M. G., Bizuwork T. D., Abuhay T., Sisay E., 2021. Productivity and land use efficiency of wheat- lentil intercropping under two tillage practices. *Ethiop. J. Agric. Sci.*, 31 (2) : 45-59.
3. Amara R. J., Mabagala F. S., Lantinga E. A., 2023. Effects of reduced tillage on dynamic soil properties and winter triticales performance in organic far mat Wageningen, the Netherlands. *Asian Journal of Research in Crop Science*, 8 (3) : 79- 91.
4. Arshad M. A. & Gill K. S., 1996. Field pea response to liming of an acid soil under two tillage systems. *Can. J. Soil. Sci.*, 76 : 549-555.
5. Barati V., Bijanzadeh E., Emam Y., Pessarakli M., 2021. Nitrogen nutrition effects on triticales photosynthesis and assimilate translocation under late-season water stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 45 (3) : 439- 456.
6. Barrs H. & Weatherley P., 1962. A Re-Examination of the Relative Turgidity Techniqu for Estimating Water Deficits in Leaves. *Australian Journal of Biological Sciences*. 15 (3): 413. <https://doi.org/10.1071/BI9620413>
7. Bayoumi T. Y., Eid M. H., Metwali E. M., 2008. Application of physiological and biochemical indices as a screening technique for drought tolerance in wheat genotypes. *Afr. J. Biotech.* 7: 2341-2352.

8. **Benniou R. & Bahlouli F., 2015.** Climate change and agriculture conservation in semi-arid environment. *Energyprocedia*, 74: 25-31.
9. **Benniou R., 2012.** Agriculture conservation role of moisture and soil organic matter semi-arid. *J. Mater. Environ. Sci.*, 3 (1) : 91- 98.
10. **Bewick L. S., Young F. L., Alldredge J. R., Young D. L., 2008.** Agronomics and economics of no-till facultative wheat in the pacific North est, USA. *Crop Protection*, 27 : 932-942.
11. **Bhandari K., Siddique K. H. M., Turner N. C., Kaur J., Singh S., Agrawal S.K., Nayyar H., 2016.** Heat stress at reproductive stage disrupts leaf carbohydrate metabolism, impairs reproductive function, and severely reduces seed yield in lentil. *J Crop Improv.*, 30: 118 – 51. doi: 10.1080/15427528.2015.1134744
12. **Birla D., Pandey I. B., Gajanand , Singh D., Ranjah P., Solanki K., Sandeep S. N., 2023.** Effect of tillage and weed management practices on dry matter, yield and nutrient uptake by plant and depletion by weed in lentil crop (*Lens culinaris M.*). *International Journal of Environment and Climate Change*, 13 (9) : 288- 298.
13. **Borstlap S. & Entz M. H., 1994.** Zero-tillage influence on canola, field pea and wheat in dry subhumid region : Agronomic and physiological responses. *Can. J. Plant. Sci.*, 74 : 411- 420.
14. **Caldéron F. J., Vigil M. F., Nielsen D. C., Benyamin J. G., Poss D. J., 2012.** Water use and yields of no-till managed dryland grass pea and yellow pea under different planting configurations. *Field crop research*, 125 : 179-185.
15. **Carr P.M., Martin G. B., Horsley R. D., 2009.** Impact of tillage on field pea following spring wheat. *Can. J. Plant Sci.*, 89 : 281-288.
16. **Chennafi H., Hannachi A., Touahria O., Fellahi Z. A., Makhlouf M., Bouzerzour H., 2011.** Tillage and residue management effect on durum wheat (*Triticum turgidum*) growth and yield under semi arid climate. *Advances in Environmental Biology*, 5 (10) : 3231- 3240.
17. **Choukri H., Hejjaoui K., El-Baouchi A., El haddad N., Smouni A., Maalouf F., Thavarajah D., Kumar S., 2020.** Heat and drought stress impact on phenology, grain yield and nutritional quality of lentil (*Lens culinaris Medikus*). *Front. Nutr.*, 7 : 596307. doi:10.3389/fnut.2020.596307
18. **Cociu A. I., 2019.** Long-term tillage and crop sequence effects on winter wheat and triticale grain yield under Eastern Romanian danube plain climate conditions. *Romanian Agricultural Research*, 36 : 119- 124.
19. **Dayananda B., Fernandez M. R., Lokuruge P., Zentner R. R., Schellenberg M. P., 2021.** Economic analysis of organic cropping systems under different tillage intensities and crop rotations. *Renewable Agriculture & Food Systems*, 36 (5) : 509- 516.
20. **De Vita P., Di Paolo E., Fecondo G., Di Fonzo N., Pisante M., 2007.** No-tillage and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in Southern Italy. *Soil & Tillage Research*, 92 : 69- 78.
21. **DeCárce P.S., Sinaj S., Santonia M., Fossati D., Jeangros, B., 2019.** Long-term effects of crop succession, soil tillage and climat on wheat yield and soil properties. *Soil & Tillage Research*, 190: 209-219.
22. **Djouadi K., Mekliche A., Dahmani S., Ladjiar N. I., Abid Y., Silabri Z., Hamadache A., Pisante M., 2021.** Durum wheat yield and grain quality in early transition from conventional to conservation tillage in semi arid mediterranean conditions. *Agriculture*, 11 (8) : 711.
23. **Echcherki S., Feddal M. A., Labad R., Bendib Y., 2021.** Comparison of the effect of three tillage techniques on soil structure and consequences on the root development of durum wheat. *J. Soils & Crops*, 31 (2) : 170- 179.
24. **Echcherki S., Feddal M. A., Labad R., Yachi A., 2022.** Effects of various cultivation methods on clay loam soil properties and wheat root in mediterranean climate. *Algerian Journal of Environmental Science and Technology*, 8 (2) : 2469- 2476.

25. Elabbadi O.E., Benniou R., Louahdi N., Guendouz A., 2024. Effect of Different Tillage Operations on Soil Water Storage, Water Use Efficiency and Productivity of Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) in Semi-arid Region. *Indian Journal of Agricultural Research*. doi: 10.18805/IJARE.AF-843
26. Ercoli L., Masoni A., Mariotti M., Pampana S., Pellegrino E., Arduini I., 2016. Effect of preceding crop on the agronomic and economic performance of durum wheat in the transition from conventional to reduced tillage. *Europ. J. Agronomy*, 82 : 125- 133.
27. Erenstein O., Sayre K., Wall P., Hellin J., Dixon J., 2012. Conservation Agriculture in maize- and wheat-based systems in the sub-tropics: lessons from adaptation initiatives in South Asia, Mexico, and Southern Africa. *Journal of Sustainable Agriculture*. <https://doi.org/10.1080/10440046.2011.620230>.
28. Falcone G., Stillitano T., Montemurro F., De Luca A. I., Gulisano G., Strano A., 2019. Environmental and economic assessment of sustainability in Mediterranean wheat product. *Agronomy Research*, 17 (1) : 60-76.
29. Fiorini A., Boselli R., Amaducci S., Tabaglio V., 2018. Effects of no-till on root architecture and root-soil interactions in a three- year crop rotation. *European Journal of Agronomy*, 99 : 156- 166.
30. Halvorson A. D., Peterson G. A., Reule C. A., 2002. Tillage system and crop rotation effects on dryland crop yields and soil carbon in the central Great Plains. *Agron. J.*, 94 : 1429-1436.
31. Helmers G. A., Yamoah C. F., Varvel G. E., 2001. Separating the impacts of crop diversification and rotations on risk. *Agron. J.*, 93 (6) : 1337–1340.
32. Husnain M., Bukhsh M. A. H. A., Iqbal J., Khaliq T., Ibne Zamir S., 2011. Agro-economic response of two wheat varieties under different tillage practices. *Crop & Environment*, 2 (2) : 1- 7.
33. Islam Md. A., De R. K., Hossain Md. A., Haque Md. S., Uddin Md. N., Fakir Md. S. A., Kader Md. A., Dessoky E. S., Attia A. O., El-Hallous E., Hossai, A., 2021. Evaluation of the tolerance ability of wheat genotypes to drought stress : Dissection through culm-reserves contribution and grain filling physiology. *Agronomy*, 11 (6) : 1252.
34. Jalli M., Huusela E., Jalli H., Kauppi K., Niemi M., Himanen S., Jauhiainen L., 2021. Effects of crop rotation on spring wheat yield and pest occurrence in different tillage systems : A multi-year experiment in finnish growing conditions. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5 : 214.
35. Jaskiewicz B., Grabinski J., Ochmian I., 2018. Productivity of winter triticale depending on type of tillage in crop rotation. In proceedings of 17th international scientific conference engineering for rural development, Jelgava, Latvia (accessed 23-24-05-2018), pp : 491- 496.
36. Jat R. K., Sapkota T. B., Singh R. G., Jat M. L., Kumar M., Gupta R. K., 2014. Seven years of conservation agriculture in a rice-wheat rotation of eastern Gangetic Plains of South Asia: yield trends and economic profitability. *Field Crops Research*, 164 : 199-210.
37. Kayan N. & Sait Adak M., 2006. Effect of soil tillage and weed control methods on weed biomass and yield of lentil (*Lens culinaris* Medic.). *Archives of Agronomy and Soil Science*, 52 (6) : 697- 704.
38. Khodadoost F., Pasari B., Abdulahi A., Rokhzadi A., Mohammadi K., 2022. Evaluation of two promising rainfed wheat cultivars affected by seeding rates in conventional and conservation tillage systems. *Agricultural Engineering International- CIGR*, 24 (2) : 1-14.
39. Küçüközdemir Ü., Dumlu B., Karagöz H., Yilmaz O., 2021. Determination of yield, and cold hardiness of some triticale (*X Triticosecale wittmack*) genotype en eastern Anatolia region. *Journal of Agricultural Production*, 2 (1) : 26- 31.
40. Kumar S., Singh R. G., Piggin C., Haddad A., Ahmed S., Kumar R., 2011. No-till lentil : An option for profitable harvest in dry areas. *Grain Legumes*, 57 : 39- 42.

41. Labad R., Louahdi N., Zouaoui S., Harrad F., Mohammedi Z., Feddal M. A., 2022. Analysis of the mechanical performance of no-till seed drills in Algeria : Impact on crop yield. *Algerian Journal of Environmental Science and Technology*, 8 (3) : 2584- 2589.
42. Lafond G. P., Loepky H., Derksen D. A., 1992. The effects of tillage systems and crop rotations on soil water conservation, seeding establishment and crop yield. *Can. J. Plant. Sci.*, 72 : 103- 115.
43. Larbi A. & Mekliche A., 2004. Relative water content (RWC) and leaf senescence as screening tools for drought tolerance in wheat. *Options Méditerranéennes, Série A, Séminaires Méditerranées*, 60 : 193- 196.
44. Lensen A. W., Sainju U. M., Allen B. L., Stevens W. B., Jabro J.-D., 2020. Diversified crop rotation and management system influence durum yield and quality. *Agronomy Journal*, 112 (5) : 4407- 4419.
45. Lensen A.W., Sainju U.M., Jabro J. D., Allen B. L., Stevens W. B., 2018. Dryland pea production and water use responses to tillage, crop rotation, and weed management practice. *Agronomy Journal*, 110 (5) : 1-11.
46. Lithourgidis A. S., Damalas C. A., Gagianas A. A., 2006. Long-term yield patterns for continuous winter wheat cropping in Northern Greece. *Europ. J. Agronomy*, 26 (3) : 208- 214.
47. López-Bellido L., Fuentes M., Castillo J.E., López-Garrido F.J., Fernández E.J., 1996. Long-term tillage, crop rotation and nitrogen fertilizer effects on wheat yield under rainfed mediterranean conditions. *Agron. J.*, 88: 783- 791.
48. Martínez E., Fuentes J-P., Silva P., Valle S., Acevedo E., 2008. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in mediterranean environment of Chile. *Soil & tillage research*, 99 : 232- 244.
49. Mebarki M. N., Feddal M. A., Feddal Taibi S., 2022. Analysis of the physical and mechanical behaviour of uncompacted soils under the action of cultivation techniques and consequences on cereal development : case of durum wheat. *Algerian Journal of Environmental Science and Tehnology*, 8 (4) : 2692- 2702.
50. Mekhlouf A., Djaidjaa Z., Rouag N., Boutakrabet A., Rouabhi A., Fortas B., 2019. Influence of systems cultures and rotation on the soil's and the durum wheat culture in high plains of Algeria. *J. A. H.*, 1 (1) : 5- 10.
51. Mohr R. M., Derksen D. A., Grant C. A., Mc Laren D. L., Monreal M. A., Moulin A. M., Khakbaan M., Irvine R. B., 2007. Effect of nitrogen fertilizer rate, herbicide rate and soil disturbance at seeding on the productivity of a wheat- pea rotation. *Can. J. Plant. Sci.*, 87 : 241- 253.
52. Mukherjee B., Kumar Naskar M., Nath R., Atta K. Visha Kumari V., Banerjee P., Alamri S., Patra K., Laing A. M., Skalicky M., Hossain A., 2023. Growth, Nodulation, Yield, nitrogen uptake, and economics of lentil as influenced by sowing time, tillage and management practices. *Front. Sustain. Food Syst.*, 7 : 1151111.
53. Muñoz-Romero V., López-Bellido L., López-Bellido R. J., 2012. The effect of the tillage system on chickpea root growth. *Field Crops Research*, 128 : 76- 81.
54. Nleya T. & Rickertsen J., 2011. Seeding rate and variety effects on yield, yield components, and economic return of field pea in the northern Great plains. *Crops management*, 10 (1): 0. <https://doi.org/10.1094/CM-2011-0221-01-RS>
55. Pask A. J. D., Pietragalla J., Mullan D. M., Reynolds M. P., 2012. Physiological Breeding II: A field guide to wheat phenotyping. Mexico, D.F.: CIMMYT. 120 P.
56. Payne W. A., Rasmussen P. E., Chen C., Goller R., Ramig R. E., 2000. Precipitation, temperature and tillage effects upon productivity of a winter wheat–dry pea rotation. *Agronomy journal*, 92(5) : 933-937.

57. Pooniya V., Zhiipao R. R., Biswakarma N., Kumar D., Schivay Y. S., Babu S., Das K., Choudhary A. K., Swarnalakshmi K., Jat R. D., Choudhary R. L., Ram H., Khokhar M., Mukri G., Lakshena K. K., Puniya M. M., Jat R., Muralikrishnan L., Singh A. K., Lama A., 2022. Conservation agriculture based integrated crop management sustains productivity and economic profitability along with soil properties of the maize-wheat rotation. *Scientific Reports*, 12 (1) : 1962.
58. Rouabhi A., Kebiche M., M Hafsi., 2018. Climate Change during the last century in Sétif Province. *Agriculture*. 8(2): 61-75.
59. Rouabhi A., Adouane C., Felloussia A. L., 2019b. Assessment of climate change and its effects on cereal production by 2070 in north Algeria. *Revue Agriculture*, 10 (2) : 27-39.
60. Rouabhi A., Laouar A., Mekhlouf A., Dhehibi B., 2019a. Socioeconomic assessment of no-till in wheat cropping system : a case study in Algeria. *New Medit.*, 18 (1) : 53- 63.
61. Ruisi P., Giambalvo D., Di Miceli G., Frenda A. S., Saia S., Amato G., 2012. Tillage effects on yield and nitrogen fixation of legumes in mediterranean conditions. *Agronomy Journal*, 104 (5) : 1459- 1466.
62. Saak A. E., Wang T., Xu Z., Kolady D., Ulrich-Schad J. D., Elay D., 2021. Duration of usage and farmer reported benefits of conservation tillage. *Journal of Soil & Water Conservation*, 76 (1) : 65- 75.
63. Saha M., Bandyopadhyay P. K., Sarkar A., Nandi R., Singh K. C., Sanyal D., 2020. Understanding the impacts of sowing time and tillage in optimizing the micro-environment for rainfed lentil (*Lens Culinaris Medik*) production in the lower Indo-Gangetic Plain. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20 : 2536- 2551.
64. Schlegel A. J., Assefa Y., Haag L. A., Thompson C. R., Stone L. R., 2018. Long-term tillage on yield and water use of grain sorghum and winter wheat. *Agronomy Journal*, 110 (1) : 269- 280.
65. Shahrinezhad S., Asadi M. E., Tohidloo G., 2015. Effect of various tillage systems on viability, germination establishment and yield of wheat. *Res. J. Appl. Sci.*, 2 (4) : 108- 118.
66. Shirvani F., Mohammadi R., Daneshvar M., Ismaili A., 2021. Agro-physiological traits for enhancing grain yield in rainfed durum wheat. *Indian J. Genet.*, 81(2): 208-220.
67. Shrestha R., Siddique K., Turner N., Turner D., Berger J., 2005. Growth and seed yield of lentil (*Lens culinaris Medikus*) genotypes of West Asian and South Asian origin and crossbreds between the two under rainfed conditions in Nepal. *Aust J Agric Res.*, 56: 971 – 81. doi: 10.1071/AR05050
68. Singh J., Wang T., Kumar S., Xu Z., Sexton P., Davis J., Bly A., 2021. Crop yield and economics of cropping systems involving different rotations, tillage and cover crops. *Journal of Soil & Water Conservation*, 76 (4) : 340- 348.
69. Sivakumar M. V., Lal R., Selvaraju R., Hamdan I., 2013. Climate change and food security in West Asia and North Africa. *Springer*, 423 p.
70. Song X., Zhou G., He Q., 2021. Critical leaf water content for maize photosynthesis under drought stress and its reponse to rewatering. *Sustainability*, 13: 7218. <https://doi.org/10.3390/su13137218>
71. Souissi A., Bahri H., Cheikh M'hamed H., Chakroun M., Benyoussef S., Frija A., Annabi M., 2020. Effect of tillage, previous crops and N fertilization on agronomic and economic performances of durum wheat (*Triticum durum* desf.) under rainfed semi-arid environment. *Agronomy*, 10: 1161-1176.
72. Su Y., Gabrielle B., Makowski D., 2021. A global dataset for crop production under conventional tillage and no tillage systems. *Scientific Data*, 8 (1) : 1- 17.
73. Torabian S., Farhangi-Abroz S., Denton M. D., 2019. Do tillage systems influence nitrogen fixation in legumes ? A review. *Soil Tillage Res.*, 185: 113– 121. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.09.006>

74. **Touitou M. & Abul Quasem A., 2018.** Climate change and water resources in Algeria: vulnerability, impact and adaptation strategy. *Economic and Environmental Studies*, 18 (01): 411-429
75. **Wafae S., Bendidi A., Daoui K., Abdelghani N., Bouichou E. H., Khalfi C. D., Ibriz M., 2023.** Tillage systems effect on wheat yield in the Saïs region of Morocco. *Universal Journal of Agricultural Research*, 11 (1) : 22- 31.
76. **Woźniak A. & Soroka M., 2014.** Effect of 3-year reduced tillage on the yield and quality of grain and weed infestation of spring triticale (Triticosecale witt mack). *International Journal of Plant Production*, 8 (2) : 231- 242.
77. **Woźniak A., 2016.** Yield and chemical composition of spring triticale grain depending on cropping and tillage systems. *International Journal of Plant Production*, 10 (1) : 45- 52.
78. **Woźniak A., 2022.** The influence of agricultural practices on yield and weed infestation of winter triticale. *Agronomy Science*, 73 (3) : 159- 171.
79. **Yachi A., Feddal M. A., Amara M., Badouna B. E., Bentahar D., Mebarki M. N., Echcherki S., Bensabti H. A., Zibani M. N., 2021.** Reflection of the development of durum wheat (Triticum durum) in Algeria. *Res. On Crops*, 22 (1) : 32- 39.
80. **Zaman R. U. & Islam M. R., 2020.** Performance of lentil as affected by reduced-tillage and mechanical seeding. *SAARC J. Agric.*, 18 (1) : 51- 60.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les essais expérimentaux menés pour la réalisation cette étude visent à enrichir les connaissances scientifiques et techniques sur l'importance de l'agriculture de conservation, notamment à travers le semis direct et la rotation des cultures en zone semi-aride d'Algérie.

L'objectif de cette étude repose sur l'analyse des effets des rotations culturales conduites en semis direct et en travail conventionnel sur le comportement physico-chimique du sol, ainsi que sur la diversité des adventices, des champignons mycorhiziens et des lombrics. Nous examinerons également le comportement et la rentabilité économique des cultures de blé, triticales, lentille et pois fourrager en région semi-aride, notamment à Sétif.

La première partie de cette étude concerne l'effet de la rotation culturale, appliquée en semis direct et en travail conventionnel, sur la dynamique des mauvaises herbes. Les résultats obtenus montrent que le travail conventionnel favorise l'apparition des espèces annuelles, tandis que le semis direct favorise l'apparition des espèces vivaces, comme *Bromus ssp.* De plus, les résultats indiquent que le non-labour favorise l'émergence des plantes monocotylédones, alors que le labour favorise l'émergence des espèces dicotylédones. La densité totale des adventices (monocotylédones et dicotylédones) diminue significativement de la première à la troisième année en raison de la diversification de la rotation culturale. Le travail conventionnel se caractérise par une densité totale des mauvaises herbes élevée par rapport au semis direct. Les cultures de légumineuses présentent une densité élevée d'adventices en raison de la difficulté de désherbage. La densité des adventices dans les rotations en système de semis direct est inférieure à celle du système de labour, car le mouvement de labour régénère le stock semencier des adventices.

Quant à l'indice de Shannon-Wiener (H') et à la richesse en espèces des mauvaises herbes (R), ils montrent des valeurs élevées dans la technique conventionnelle et dans la rotation des cultures avec les légumineuses. Ainsi, les opérations de labour conventionnel associées à la succession des cultures, augmentent la diversité des mauvaises herbes. En revanche, l'indice de Simpson (C) et l'indice de l'uniformité (J) présentent les valeurs les plus élevées en technique de semis direct.

La deuxième partie de notre étude porte sur l'effet de la succession des cultures conduites en deux techniques de travail du sol, à savoir le semis direct et le travail conventionnel, sur la diversité des champignons mycorhiziens et les vers de terre en zone semi aride. Les résultats révèlent que les racines des céréales (blé et triticales) enregistrent un taux de colonisation arbusculaire et un taux de colonisation total élevés dans les parcelles soumises en semis direct, tandis que les racines des légumineuses (lentille et pois fourrager) affichent un taux de colonisation vésiculaire et un taux de colonisation total élevés en travail conventionnel.

Les résultats montrent également que l'abondance relative des genres *Glomus* et *Septoglomus* est plus élevée dans les parcelles en semis direct que dans celles labourées. En revanche, l'espèce *Claroideoglomus etunicatum* est détectée uniquement dans les parcelles soumises en travail conventionnel. Nos résultats indiquent que la densité des spores des champignons mycorhiziens à arbuscules est plus élevée dans les parcelles gérées par semis

direct que dans celles labourées. Les parcelles des céréales (triticale et blé) précédées par des légumineuses (lentille et pois fourrager) affichent une densité de spores des champignons mycorhiziens arbusculaires par gramme de sol plus élevée que celles des cultures de légumineuses précédées par les céréales, confirmant ainsi que l'introduction de légumineuses, qu'elles soient alimentaires ou fourragères, dans la rotation des cultures à base de céréales améliore la vie microbienne du sol.

Dans cette étude, nous avons constaté une absence totale de vers de terre lors des deux campagnes (2017/18 et 2018/19) dans les deux techniques de travail du sol : semis direct et travail conventionnel, probablement en raison des températures élevées et de la sécheresse durant la période d'échantillonnage (mois de mars).

La troisième partie de notre étude concerne l'effet de la succession des cultures conduite en semis direct et en travail conventionnel sur les paramètres physico-chimiques du sol, tels que l'humidité, la densité apparente, la porosité, la résistance à la pénétration, l'évolution du taux de matière organique, ainsi que les teneurs en azote, en potassium et en phosphore.

Nos résultats montrent que l'humidité du sol était plus élevée en semis direct qu'en travail conventionnel. L'importance de la conservation de l'humidité en semis direct se manifeste lors des stades critiques de croissance des cultures (épiaison-floraison et la formations des graines), ainsi qu'en post-récolte, où le système semis direct maintient le sol relativement plus humide par rapport au travail conventionnel. De plus, l'inclusion de légumineuses dans la rotation des cultures favorise la rétention de l'humidité du sol, surtout lorsqu'elles sont combinées à la technique du semis direct.

La densité apparente et la résistance à la pénétration lors de la troisième campagne (2018/19) sont inférieures à celles observées lors de la première campagne (2016/17) en semis direct ; à l'inverse, un phénomène contraire est constaté en travail conventionnel. Cela suggère que la technique de semis direct à long terme améliore les propriétés physiques du sol. La rotation des cultures utilisant la technique de non-labour entraîne une diminution des valeurs de densité apparente et de résistance à la pénétration par rapport au travail conventionnel. Cela indique que l'utilisation du semis direct, associée à la rotation des cultures dans le cadre d'une agriculture de conservation, peut contribuer à améliorer la structure du sol et à réduire la compaction, ce qui est bénéfique pour la croissance des cultures et les rendements agricoles.

Le travail du sol conventionnel se caractérise par une porosité élevée, due à la présence de pores plus grands et plus nombreux créés par la perturbation du sol, ce qui augmente la porosité totale. En revanche, le semis direct tend à maintenir une porosité plus faible, probablement en raison de l'absence de la perturbation du sol. Il convient de noter qu'une augmentation de la porosité du sol a été observée dans les parcelles soumises à un semis direct par rapport à celles en travail conventionnel après trois ans de pratique de cette technique. De plus, la rotation des cultures et l'introduction de légumineuses, comme le pois fourrager et la lentille, dans les systèmes de culture contribuent à améliorer la porosité du sol, favorisent la santé du sol et optimisent la disponibilité des nutriments pour les cultures suivantes. Ainsi, la combinaison d'une diversification des cultures par la rotation et de la

pratique du semis direct peut constituer une approche prometteuse pour améliorer la porosité du sol.

D'après les résultats de notre étude, la perturbation du sol par le labour conduit une diminution de la matière organique en raison de l'oxydation et de la minéralisation accélérée. En revanche, la technique de semis direct permet de conserver les résidus de culture à la surface du sol, protégeant ainsi la matière organique de l'oxydation et favorisant une augmentation significative du carbone organique du sol. De plus, la différence dans l'augmentation du carbone organique entre le semis direct et le travail conventionnel est plus marquée après la troisième année de gestion du sol. Cela suggère que ce sont les effets cumulatifs de la conservation des résidus de culture et de la diminution de la perturbation du sol à long terme qui conduisent à une augmentation plus importante de la matière organique en semis direct. Il convient également de noter que la technique de semis direct enregistre un taux élevé de matière organique dans les premiers centimètres du sol (0-20 cm), tandis que le travail conventionnel présente un taux élevé de matière organique à une profondeur intermédiaire (20-40 cm). La rotation des cultures permet de maintenir et d'augmenter la teneur en matière organique dans les sols agricoles. Dans notre étude, l'introduction de légumineuses (lentille et pois fourrager) dans un système de culture basé sur les céréales a permis d'augmenter les pourcentages de matière organique et de diminuer le pH du sol. En revanche, la technique de semis direct combinée à la rotation des cultures, dans le cadre d'agriculture de conservation, améliore le taux de matière organique dans les sols de la zone semi-aride.

Le semis direct favorise l'accumulation d'azote dans le sol par rapport au travail conventionnel. Les parcelles cultivées avec les quatre cultures (blé, triticales, lentille et pois fourrager) présentent une teneur en azote plus élevée en semis direct comparativement au travail conventionnel, les parcelles de légumineuses (lentille et pois fourrager) ayant une teneur en azote dans les deux systèmes de travail du sol (semis direct et travail conventionnel) supérieure à celle des parcelles de blé et de triticales. Dans notre étude, les parcelles en travail conventionnel tendent à présenter une teneur plus élevée en phosphore et en potassium par rapport aux parcelles en semis direct. L'inclusion des légumineuses dans un système de culture améliore la disponibilité de phosphore et de potassium dans le sol, ce qui influence positivement la durabilité des systèmes agricoles.

La quatrième partie de notre étude est porte sur la variabilité des rendements et la rentabilité économique des cultures de blé, triticales, lentille et pois fourrager, en fonction du précédent cultural et du système de travail du sol, à savoir le semis direct et le travail conventionnel. D'après nos résultats, le travail conventionnel du sol favorise l'élongation des racines des cultures incluses dans la rotation (blé, triticales, lentille et pois fourrager) mieux que la technique de semis direct, car le travail conventionnel offre de meilleures conditions pour la croissance des racines (faible densité apparente, résistance à la pénétration faible et porosité élevée).

Les résultats de notre étude montrent que le rendement des cultures est plus vulnérable aux fluctuations des précipitations au cours des campagnes agricoles. Les rendements sont plus élevés lors des années pluvieuses et plus faibles durant les années sèches. Dans les zones

semi-arides d'Algérie, où le climat est défavorable, l'adoption du système de non-labour permet de conserver l'humidité du sol, ce qui augmente le rendement en grains par rapport au travail traditionnel du sol.

La rentabilité économique des cultures est directement liée au rendement : lorsque le rendement augmente, la rentabilité augmente également. Nos résultats montrent que l'ensemble des cultures est économiquement rentable en semis direct par rapport au travail conventionnel, notamment dans les saisons à faible pluviométrie, où les rendements des cultures sont très faibles. En effet, des coûts de production réduits en semis direct se traduisent par une rentabilité économique élevée. De plus, la diversification des cultures dans la succession culturale améliore la rentabilité économique, car dans une rotation diversifiée, le risque de perte peut être minimisé, les rendements faibles d'une culture étant compensés par les rendements élevés d'une autre (comme cela a été le cas lors de la campagne 2016/2017).

Ainsi, l'inclusion de légumineuses peut constituer une option potentielle pour améliorer les attributs de rendement des céréales, la productivité et la rentabilité, tout en favorisant la durabilité des ressources naturelles dans la région semi-aride et en réduisant l'empreinte environnementale. Nos résultats suggèrent que l'introduction d'une légumineuse fourragère économiquement rentable, comme le pois fourrager, dans un système de culture basé sur le blé est recommandée dans cette zone, en raison des effets bénéfiques de cette culture sur le sol et l'environnement.

Par conséquent, la technique de semis direct associée à la rotation culturale incluant des légumineuses est considérée comme une pratique durable, permettant d'optimiser les rendements des cultures tout en améliorant la multifonctionnalité du sol, ainsi que le maintien des stocks de carbone organique, de leur teneur en eau et de leur diversité biologique dans la zone semi-aride.

Recommandations

Les changements climatiques actuels dans la zone semi-aride d'Algérie obligent à mener des recherches continues sur l'optimisation de la productivité des cultures devant être intégrées dans la rotation culturale. Les expériences devraient être axées sur le développement de technologies à la fois respectueuses de l'environnement et économiquement rentables. Une attention particulière doit être accordée aux pratiques de travail du sol qui favorisent l'accumulation d'eau et permettent d'obtenir des rendements satisfaisants durant une saison de croissance caractérisée par un déficit pluviométrique.

Il est nécessaire de réaliser des expérimentations sur l'identité des espèces de légumineuses en tant que pré-culture (comme la vesce, la gesse, le pois chiche,...) et d'évaluer leur effet sur la qualité chimique et biologique du sol, ainsi que sur la productivité et la stabilité de rendement des cultures subséquentes dans les conditions pluviales de la zone semi-aride. Cela permettra d'identifier la rotation appropriée pour cette zone.

De plus, il est important de mener des études sur l'effet de l'agriculture de conservation et de l'agriculture conventionnelle sur la durabilité environnementale en zone semi-aride d'Algérie (notamment en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre, l'érosion du sol, et la pollution des sols et de l'eau). Dans ce but, il convient de réaliser des

expérimentations de rotation culturale, avec et sans utilisation de pesticides et d'engrais chimiques, en fonction des différentes modalités de gestion du sol.

Il est également essentiel de réaliser des séances de vulgarisation pour sensibiliser les agriculteurs à l'importance de pratiquer l'agriculture de conservation, basée sur le semis direct et la diversification des cultures par la rotation, afin d'assurer la durabilité agricole à long terme dans les zones semi-arides.

En conclusion, nous recommandons de mener des études supplémentaires pour confirmer les résultats de cette recherche et les appliquer à d'autres régions, en introduisant des cultures variées dans la rotation et en explorant différentes modalités de travail du sol, dans le but de produire un guide technique répondant aux problématiques des agriculteurs algériens.

Malgré les efforts fournis et les résultats obtenus, l'étude de l'effet de la rotation culturale sur agro-biodiversité et la durabilité agricole, en semis direct et en technique conventionnelle, dans la zone semi-aride nécessite un suivi sur plusieurs années. Cela permettra d'obtenir des résultats représentatifs, d'effectuer une analyse globale, et de suivre l'évolution des propriétés physico-chimiques du sol, ainsi que la biodiversité des bactéries, des champignons et des macrofaunes du sol, et des mauvaises herbes, ainsi que la rentabilité économique des systèmes agricoles, qu'ils soient sous l'agriculture conventionnelle ou de conservation.

Les annexes

➤ **Protocole de mesure de la colonisation des racines par les CMA (Méthode Vierheilig et al., 1998)**

Principe

Le taux de mycorhization est un indicateur de la présence de champignons mycorhiziens à arbuscules dans les racines de plantes. Les vésicules et les arbuscules constituent le siège des échanges symbiotiques et sont les meilleurs indicateurs de la fonctionnalité du mycorhize observé.

Cette technique de coloration permettant d'observer au microscope des structures fongiques (arbuscules, hyphes, vésicules) dans des racines de plante. Après observation histologique des CMA dans les racines colorées, il est de plus possible d'estimer le taux de mycorhization de la plante en tant que paramètre biologique du sol.

Matériel :

Ciseaux, pince, étuve, tubes à essai, bain-marie, les lamelles, les lames, microscope optique,

Produits chimiques

Solution d'hydroxyde de potassium (KOH), acide acétique, éthanol, eau distillée, glycérol

Mode opératoire

1. **Prélèvement des racines :** le prélèvement de sol a été réalisé à 15 cm de profondeur, avec l'intégralité du plant et son système racinaire (directement sous la culture, dans le sol rhizosphérique).

2. **Lavage et séparation des racines :** Les racines échantillonnées sont soigneusement rincées à grande eau afin d'éliminer les particules de sol. Elles doivent être maintenues en permanence dans l'eau afin de séparer les plus fines des plus grosses à l'aide de ciseaux ou de pinces. Les racines fines peuvent être coupées en morceaux de 2 à 3 cm de longueur (afin de faciliter leur manipulation ultérieure).

3. **Stabilisation et coloration :**

- **Stabilisation et décoloration avec une solution de KOH :** les racines sont mises dans une solution d'hydroxyde de potassium. Les tubes contenant les racines et le KOH sont portés à ébullition pour éclaircir les tissus de la racine de manière à être transparents.

- **Coloration avec l'encre Scheffer noir pour stylo à plume :** les racines sont abondamment rincées pour éliminer le KOH puis placées dans une solution d'encre Scheffer noir pour stylo à plume pour coloration. Le pigment de ce type d'encre a en effet la propriété de se fixer préférentiellement sur les parois fongiques mais cette fixation ne peut se faire qu'en milieu acide, d'où l'utilisation de vinaigre (acide acétique) pour neutraliser le KOH. Les tubes contenant les racines trempées dans la solution d'encre bleue sont mis au bain-marie.

- **Observation microscopique :** Après la coloration, les racines peuvent être conservées dans l'éthanol, du glycérol ou dans de l'eau déminéralisée jusqu'à leur observation. Pour chaque échantillon, des fragments fins de racines d'environ 1 cm sont montés entre lame et lamelle, écrasés dans du glycérol et observés au microscope. La présence des structures de CMA telles que les hyphes, les vésicules et les arbuscules dans la racine permet d'estimer le niveau de colonisation de l'échantillon de racine.

4. **Le calcul :** d'après McGonigle et al. (1990) ;

-Taux de colonisation total (TCT %) = $(G-P)/G \times 100$

-Taux de colonisation arbusculaire (TCA %) = $(q+s)/G \times 100$,

-Taux de colonisation vésiculaire (TCV %) = $(r+s)/G \times 100$.

Avec **G** : nombre total des fragments ; **p** : aucune structure mycorhizienne ; **q** : présence d'arbuscules ; **r** : présence de vésicules ; **s** : présence d'arbuscules et de vésicules

➤ **Protocole d'extraction des spores des champignons mycorhiziennes à arbuscule (CMA) (la méthode d'Ianson et Allen (1986).)**

Principes

Cette technique adoptée aux CMA est basée sur l'utilisation d'une solution saccharose-calgon à 2M pour l'extraction des spores des CMA.

Matériel

Tubes à centrifuger, centrifugeuse, balance de précision, entonnoirs, papier filtre, spatule, les boîtes de Pétri, agitateur, une bouteille en plastique, plaque chauffante, réfrigérateur.

Produits chimiques

L'eau distillée, saccharose, sels de bain de Calgon, éthanol.

Mode opératoire

- 1) dans un tube à centrifuger de 15 ml, placez 3 g de terre (en veillant à ne pas dépasser la marque de 7 ml du tube à centrifuger). la terre peut être soit de la terre séchée passée au tamis de 2 mm, soit de la terre humide (voir le protocole) avant d'utiliser cette méthode. cette dernière méthode fonctionne mieux pour les sols de type désertique et méditerranéen ;
- 2) remplissez le tube d'eau distillée jusqu'au repère de 14 ml. Agiter soigneusement le tube et placez-le sur le côté pendant 15 minutes. vérifiez que l'eau s'infiltre dans le sol si elle n'est pas entièrement humidifiée, il est probable que des bulles d'air empêchent l'infiltration de l'eau. utilisez une spatule (si nécessaire) pour briser doucement les bulles d'air. l'eau devrait s'infiltrer dans le sol au fond du tube ;
- 3) centrifuger pendant 10 minutes à 2500 tours/minute ;
- 4) pauvre de l'eau avec des débris organiques flottants ;
- 5) remplir les tubes avec une solution de saccharose-calgon 2M jusqu'à la marque de 4 ml. agiter de nouveau vigoureusement et les poser sur le côté pendant 10 minutes (le saccharose crée un gradient de densité tandis que le calgon donne une charge aux spores) PEUT ATTENDRE DANS LE RÉFRIGÉRATEUR SI NÉCESSAIRE ;
- 6) tubes à centrifuger pendant 20 minutes à 2500 tours/minute ;
- 7) placez un papier filtre dans l'entonnoir filtrant. mettez une membrane (membrane à grille) par-dessus. humidifiez avec de l'eau, et mettez en marche la ligne de vide ;
- 8) verser délicatement la solution de sucre-calgon contenant les spores sur la membrane
- 9) une fois la solution filtrée, rincer doucement la membrane à l'eau pour éliminer l'excès de sucre ;
- 10) une fois filtré, retirer le papier filtre/ membrane et le placer dans une petite boîte de pétri ;
- 11) conserver l'échantillon au réfrigérateur (pour un stockage à long terme, mettre un peu d'éthanol dans la boîte de pétri avec les spores. lorsque vous voulez observer les spores, il suffit de filtrer l'éthanol) ;

Préparation d'une solution de saccharose et de calgon (2M de saccharose, 10% de Calgon)

- 1) pour 1 L de solution, peser 685,0 g de saccharose ;
- 2) mesurer 450 ml d'eau dans un grand flacon et chauffer ;
- 3) Mettre le flacon d'eau dans l'agitateur (mais pas à la vitesse maximale), puis ajoutez lentement le saccharose. note : surveillez attentivement la solution, elle aura tendance à bouillir et à brûler sur la plaque chauffante ;
- 4) continuer à chauffer et à remuer jusqu'à ce que la solution devienne claire. tour de chauffe ;
- 5) ajouter 100 g de sels de bain de Calgon à la solution de saccharose et continuer à remuer jusqu'à ce que le Calgon soit juste dissous ;
- 6) ajouter 550 ml d'eau à la solution et continuer à remuer jusqu'à ce qu'elle soit bien mélangée ;
- 7) Refroidir le mélange et le réfrigérer dans une bouteille en plastique bien fermée, étiqueter la bouteille.

➤ **Protocole de détermination de la diversité des lombrics (vers de terre) (Méthode de Vigot & Cluzeau, 2014)**

Principe :

Réactifs et matériel :

- 1 arrosoir de 10 L et rampe d'arrosage ;
- 70 L d'eau ;
- 1 cadre rigide d'1 m² ;
- 12 pots de 150 g de moutarde fine et forte ;
- 1 shaker pour diluer la moutarde avant de la mettre dans l'arrosoir ;
- 2 ou 3 bâtons plastiques pour remuer la solution dans l'arrosoir ;
- Gants et Pincettes ;
- 3 boîtes plastiques de 10 cm de haut pour stocker les vers pendant le prélèvement ;
- 8 autres boîtes et 1 bâche plastique claire pour le tri ;
- Feuille de terrain et clé d'identification.

Mode opératoire :

- Marcher délicatement pour faire le moins possible de vibrations qui pourraient faire fuir les vers en profondeur et ne pas marcher sur la zone de prélèvement.
- Délimiter une placette d'1 m² dans une zone représentative de la parcelle, couper délicatement la végétation et l'exporter, sans gratter la surface du sol.
- Dans un arrosoir de 10 L, diluer 300 g de moutarde Fine et Forte (*pré dilution à l'aide d'un shaker*).
- Brasser et verser les 10 L sur la placette, puis chronométrer 15 minutes.
- Pendant ce temps, préparer un 2^{ème} arrosoir puis, avec des pincettes, ramasser les vers qui sortent et les mettre dans une boîte de 10 cm de haut minimum contenant de l'eau.
- Répéter les opérations 4 et 5 au même endroit 15 minutes après avoir vidé le premier arrosoir.
- Une fois les 2 arrosages réalisés, recommencer les opérations 1 à 6 sur une 2^{ème} placette (*à 6 m minimum de la 1^{ère}*), puis sur une 3^{ème}. Si la parcelle est très hétérogène, il est possible de faire plus de placettes. A chaque fois, les vers des différentes placettes sont placés dans un récipient différent.
- Pour chaque récipient, trier les vers par catégories écologiques (*épigés, anéciques tête rouge, anéciques tête noire et endogés*), en faisant la distinction entre adultes et juvéniles. Les compter et remplir la fiche de terrain. Les prendre en photo, puis les relâcher ou les envoyer en laboratoire.
- Période de prélèvement : le mois de Mars-Avril.

Présentation des résultats : « Classification des vers de terre »

3 catégories écologiques :

- Epigés : Espèces de petite taille (*1 à 5 cm*), de couleur rouge sombre. Ils vivent dans l'horizon superficiel organique du sol ou dans les amas organiques (*fumier, compost, litières de feuilles, écorces, bouses...*) et sont donc peu présents en grandes cultures ;
- Endogés : Espèces de taille moyenne à grande (*1 à 20 cm*) et faiblement pigmentées (*rose, vert ou gris clair*) ;
- Anéciques : Ce sont les plus grosses espèces (*10 à 110 cm*). Leur couleur, plus intense du côté de la tête, varie du rouge-brun au gris-noir.

Protocole de détermination de la texture du sol (méthode pipette de ROBINSON)

Principe

Sur un échantillon de terre séchée à l'air libre et tamisée à 2 mm, on détruit la matière organique qui joue un rôle de ciment entre les particules argileuses. La terre est ensuite agitée avec une solution alcaline qui provoque la dispersion et laissée au repos pour permettre la sédimentation des particules qui tombent avec des vitesses d'autant plus grandes qu'elles sont plus lourdes (lois de Stokes).

Matériels et réactifs

Eau oxygénée (H_2O_2) à 30 % ; Eau distillée H_2O ; Ammoniaque (NH_3) ; Déhydrogenophosphate de sodium ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ; Becher de 600 ou 800 ml ; Verre de montre ; Bain de sable ; Pissette ; Pipette ; Eprouvette de 50 ml et 10 ml ; Flacon d'agitation ; Agitateur rotatif ; Allonge de 1 L ; Capsules ; Pipette de ROBINSON ; Tamis de 2 mm et de 0,2 mm.

Mode opératoire

Destruction de la matière organique

Faire verser 50 ml de peroxyde d'hydrogène à 6% sur la prise d'essai de 20g de terre séchée à l'air, passée sur tamis à mailles de 2 mm et placée dans un bécher de 500 ml, une mousse apparaît et sera d'autant plus abondante qu'elle contient une quantité importante de matière organique surveille la pour qu'elle ne provoque pas de débordement. Agiter fréquemment le bécher pour descendre la mousse en y ajoutant au besoin quelques gouttes d'alcool éthylique pour faciliter la destruction et laisser reposer une nuit pour l'attaque au froid. Porter au bain de sable (Chauffer doucement), une réaction parfois importante peut se produire avec production de CO_2 (attaque à chaud), répéter le traitement en ajoutant successivement de petites quantités de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) à 6% (0.5 ml) jusqu'à ce que le chauffage ne produise plus de réaction, accélérer éventuellement l'attaque à chaud par ajout de H_2O_2 à 30%, faire bouillir la solution pour éliminer l'excès de peroxyde d'hydrogène (Si la mousse monte, il faut l'éliminer par de petites additions d'environ 5ml d'éthanol). C'est la décoloration de la suspension (virage vers le marron clair) et l'absence de dégagement de mousse qui indiquent la fin de l'opération (attaque à chaud). Le traitement peut demander plusieurs heures et nécessite de nouvelles additions d'eau oxygénée si la terre est très humifère et l'échantillon doit rester toujours mouillé.

Dispersion

Faire passer la terre dans un flacon de 500ml et bien récupérer les particules restantes sur la paroi en rinçant avec l'eau déminéralisée, compléter le volume à 500ml environ avec de l'eau déminéralisée, agité en milieu alcalin (50 ml déhydrogenophosphate de sodium) pendant 2h à l'agitateur mécanique, transvaser dans une allonge de sédimentation de 1000 ml et bien rincer le flacon d'agitation pour entraîner la totalité des particules dans l'allonge et couvrir l'allonge avec un film alimentaire.

Prélèvement par sédimentation : Utilisation de la pipette Robinson :

Cette analyse est basée sur la loi de Stokes dans des conditions bien déterminées de temps et de température. Le prélèvement est effectué comme suit :

On prélève à une profondeur donnée (10 cm) après un temps de chute donné à une température donnée des particules de diamètre supérieur connu. Pour une même allonge et dans l'ordre, on prélève après agitation (agiter la dispersion énergiquement de manière que tout le dépôt qui ait pu se faire au fond de l'allonge soit entièrement en suspension)

1/ Prélèvement d'Argile+ Limon

Au bout d'une température, on prélève à une profondeur une partie aliquote (10-20 ml) de la fraction Argile +Limon. Il est nécessaire de toujours commencer par le prélèvement de cette fraction pour que le deuxième prélèvement, celui de l'argile, corresponde à 1/50 de l'argile totale. Fermer le

robinet à trois voies, Environ 30 secondes avant le prélèvement proprement dit, on amène la pointe de la pipette en contact avec la surface libre de la suspension, en évitant toute turbulence, on descend la pointe de la pipette à la profondeur désirée, le robinet à 3 voies restant fermé pour empêcher le liquide de monter avant le temps exact. Ouvrir lentement le robinet et quand le liquide arrive à son niveau et trop plein par l'ajutage latéral. Vider lentement son contenu dans une capsule tarée de 50 ml à 100 ml, placer celle-ci à l'étuve à 105 °C pendant une nuit, après séchage, la capsule avec le résidu sec est mise à refroidir dans un dessiccateur puis pesée.

2/ *prélèvement d'Argile :*

Après une nouvelle agitation vigoureuse, opérer exactement de la même façon. Suivant la température moyenne de la suspension, modifier à l'aide du tableau le temps de sédimentation, où si celui-ci ne convient pas, adopter la profondeur correspondant au temps choisie.

3/ *Prélèvement du sable :*

Après le prélèvement à la pipette pour limon et l'argile, superposer les 2 tamis de 2 et de 0,2 mm l'un sur l'autre dont le tamis de 2 mm soit en haut

- Faire passer tout le contenu de l'allonge à travers des 2 tamis ;
- Rincer bien l'allonge ou on peut récupérer tout l'échantillon ;
- Récupérer le contenu de chaque tamis dans une capsule tarée à l'aide de jet de pissette et faire sécher à l'étuve à 105 °C pendant une nuit, laisse refroidir puis peser.

Le calcul

Pour chaque échantillon, Nous avons 3 récipients avec les tares suivantes : P1, P2, en grammes pour les prélèvements 1, 2, S en gramme pour le sable. Après séchage et refroidissement, on trouve les poids suivants, aussi en grammes :

M1, M2, (récipients + prélèvement à la pipette), R (récipient + sable), on a également prélevé X grammes d'hexamétophosphate.

Fractions fines recueillies à la pipette :

- 1^{er} prélèvement = (M1 – P1 – X) pour la fraction (Argile+Lavons),
- 2^{ème} prélèvement = (M2 – P2 – X) pour la fraction (Argile),
- Pour la fraction sableuse 50 à 2 mm = (R – S).

Exemple pour le 1er prélèvement: **(M1 – P1 – X) gr. 1000/v. 100/P**

Où :

v : étant le volume prélevé;

P : le poids de sol dans le cylindre.

Traitement des données par le triangle

La composition granulométrique est représentée par ses trois principales fractions (Argile, Limon et Sable).

Mode d'emploi : porter sur chacun des 3 axes les pourcentages argiles, de limons et de sables. Par chacun des points ainsi, trouvés, mener une parallèle à l'axe précédent. L'interaction de ces trois parallèles désigne la classe du sol.

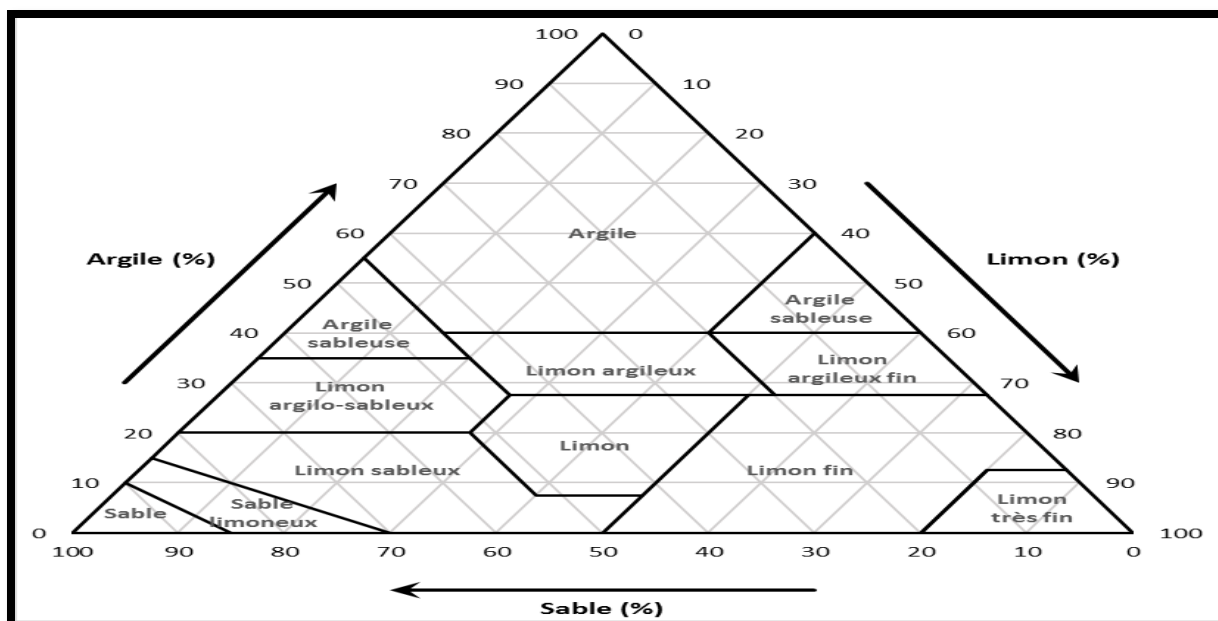


Figure 01 : Triangle des textures

➤ **Protocole détermination du taux de calcaire total dans le sol (méthode de Calcimètre de BERNARD)**

Réactifs et appareillage :

HCL (1/2 C), CaCO_3 pur et sec (CaCO_3 en poudre), eau distillée saturée en NaCl (300g / l), Calcimètre de Bernard, balance de précision, capsule, éprouvette graduée de 10 ml, pissette, pince.

Mode opératoire :

Avant de doser le calcaire présent dans l'échantillon de sol, on procède d'abord à l'étalonnage du calcimètre en faisant réagir une quantité connue de CaCO_3 avec HCl.

1. Etalonnage de l'appareil ou essai témoin :

- Introduire 0,3 g de CaCO_3 pur et sec au fond de l'erlenmeyer et mouiller par quelques gouttes d'eau distillée ;
- Mettre 5 ml d'HCl 1/2 C à l'intérieur de l'embout ;
- Boucher hermétiquement l'erlenmeyer et ajuster la position de l'ampoule mobile jusqu'à ce que le niveau du liquide coloré soit au niveau O dans la colonne graduée ;
- Vider l'acide chlorhydrique sur le calcaire pur et sec en inclinant légèrement l'erlenmeyer ;
- Agiter pour favoriser la réaction ;
- Suivre la corise du liquide coloré dans la colonne graduée en abaissant l'ampoule ;
- Ajuster les deux niveaux (ampoule-colonne) ;
- A la fin de l'effervescence, noter le volume de CO_2 dégagé en ml = V.

2. Dosage du CaCO_3 dans l'échantillon de sol :

- Remplacer le CaCO_3 pur et sec par 1 ; 2 ; 5 ou 10 g de sol (la prise d'essai **P** est variable suivant la richesse de l'échantillon en CaCO_3 et on détermine de telle sorte que le volume de CO_2 qui s'en dégage, se rapproche du volume obtenu dans l'essai témoin) ;
- Puis opérer de la même façon que pour le témoin ;
- A la fin du bouillonnement, abaisser l'ampoule mobile pour ajuster deux niveaux du liquide coloré dans celle-ci et dans la colonne graduée ;
- Noter le volume de CO_2 dégagé en ml = v

Le calcul :

La teneur en CaCO_3 d'un sol est exprimée généralement en % :

Si **V** est le volume de CO₂ dégagé par 0,3 g de CaCO₃, **v** est le volume de CO₂ dégagé par une prise d'essai **P**.

La quantité de CaCO₃ contenue dans cette prise d'essai de sol sera donc :

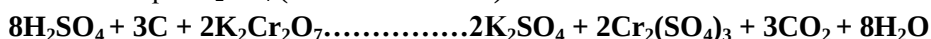
$0,3 * v / V$; soit $0,3 * v/V * P$ dans 1 g de sol

Et dans 100 g de sol : **CaCO₃ (%) = $(0,3 * v/V * P) * X100$**

➤ **Protocole de détermination de la matière organique dans le sol (méthode d'ANNE)**

Principe

Le carbone organique est oxydé à chaud avec une solution de bichromate de potassium (K₂Cr₂O₇) en présence d'acide sulfurique H₂SO₄ (source de chaleur) selon la réaction



Le volume de la solution de (K₂Cr₂O₇) doit être en excès par rapport à la quantité nécessaire à l'oxydation du carbone organique « l'excès du Bichromate de potassium est ensuite titré par une solution de sulfate ferreux (sel de Mohr) en présence de diphénylamine dont la couleur passe successivement par le bleu foncé, brun noirâtre, violet puis vert.

Matériel

Balance de précision, ballons de 250 ml à fond plat, verres de montre, fioles jaugées de 100 ml, entonnoirs, pissettes de 500 ml, erlenmeyers de 250 ml, éprouvettes graduées de 25 ml et de 250 ml, burette graduée.

Réactifs

Eau distillée, solution de bichromate de potassium (K₂Cr₂O₇) 0,2 N à 8%, acide sulfurique H₂SO₄ concentré, solution de sulfate ferreux (Sulfate d'ammonium-fer II hexahydraté) ou sel de Mohr à 0,2N, fluorure de sodium NaF, solution de diphénylamine.

Mode opératoire

- Peser 1 g de terre séchée à l'air libre et tamisée à 2 mm ;
- Introduire la prise d'essai dans un ballon de 250 ml ;
- Ajouter 10 ml de solution de bichromate de potassium et 15 ml d'acide sulfurique concentré ;
- Couvrir le ballon d'un verre de montre ;
- Porter le ballon sur un chauffe ballon ;
- Après la chute de la première goutte d'eau, compté 5 mn puis retirer le ballon ;
- Laisser refroidir ;
- Transvaser le contenu du ballon dans une fiole jaugée de 100 ml et ajuster au trait de jauge avec de l'eau distillée ;
- Homogénéiser le contenu de la fiole puis prélever à l'aide de l'éprouvette graduée 20 ml de cette solution et les mettre dans un erlenmeyer ;
- Ajouter 200 ml d'eau distillée, une pincée de NaF et 3 à 4 gouttes de diphénylamine ;
- Titrer l'excès du bichromate de potassium contenu dans l'erlenmeyer avec la solution de sel de Mohr goutte par goutte jusqu'à apparition d'une coloration bleu verte ;
- Lire à partir de la burette le volume de solution de Mohr utilisé ;
- Refaire les mêmes étapes pour un témoin (échantillon sans terre)

Le calcul

La teneur du sol en carbone organique est donnée par la formule

$$CO \% = [(Y-X) * 0.615 * (100/V) * (100/P)] / 1000$$

Tel que :

CO : carbone organique (%)

X : le volume de la solution de sel de Mohr utilisé pour doser l'échantillon de sol (ml)

Y : le volume de la solution de sel de Mohr utilisé pour doser le témoin (ml)

V : le volume de l'aliquote (20 ml)

P : le poids de la prise d'essai (g)

La matière organique contient en moyenne 58 % de carbone organique. Le passage de la teneur en carbone organique à celle de la matière nécessite une multiplication par un coefficient égale à $100/58$ soit 1,72 d'où

$$\text{MO \%} = \text{CO (\%)} * 1,724$$

➤ **Protocole de détermination de l'azote total dans le sol (méthode de KJELDHAL)**

Principe

Dans un sol, l'azote peut se trouver sous forme minérale et organique (protéines, phospho-amino-lipides) ; pour le doser dans sa totalité, il faut détruire les composés organiques de manière à obtenir tout l'azote sous une même forme minérale. On effectue pour cela une minéralisation. L'azote est ensuite dosé par dosage acide-base.

1^{ère} étape : la minéralisation

La minéralisation est effectuée à l'aide d'un excès d'acide sulfurique concentré et chaud, en présence d'un mélange de catalyseurs.

- Introduire 1 g de terre fine tamisée à 0,2 mm dans un matras de **kjeldahl** ;
- Ajouter environs 1 ml d'eau distillée ;
- Ajouter 10 ml d' H_2SO_4 concentré, homogénéisé ;
- Ajouter une pincée du catalyseur et porter à la rampe d'attaque.

L'azote est donc obtenu sous la forme minérale NH_4^+ (ion ammonium).

2^{ème} étape : distillation et dosage de l'azote total

- **Déplacement du NH_4^+ en NH_3 et isolement de l'ammoniac (NH_3)**

Pour transformer les ions ammonium de la minéralisation en ammoniac, on doit alcaliniser le minéralisé ; pour cela on utilise un large excès de base forte : la lessive de soude NaOH. Le minéralisé est ainsi tout d'abord neutralisé puis alcalinisé. On a alors :



Recueillir dans une fiole jaugée de 250 ml le contenu du matras, ajuster avec les eaux de rinçage.

Dans un matras à distiller :

- Prélever 25 ml de la solution et l'introduire ;
- Ajouter 25 ml de lessive de soude NaOH.

La lessive de soude étant en excès, tous les ions ammonium sont transformés en ammoniac et donc tout l'azote se retrouve sous forme de NH_3 .

- **Distillation** : on chauffe le minéralisé alcalinisé, le NH_3 se dégage sous forme de vapeur que l'on capte, que l'on condense et que l'on recueille pour le dosage.

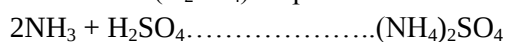
- **Dosage de l'ammoniac :**

L'ammoniac est recueilli dans une solution d'acide borique (H_3BO_3). L'acide borique est un acide faible qui ne réagit pas avec l'ammoniac, il sert simplement de piège à ammoniac. (Il doit être en excès par rapport à l'ammoniac).

- Dans un erlen-mayer, introduire 10 ml d'acide borique ;
- Ajouter quelques gouttes de l'indicateur coloré (rouge de méthyle)

3^{ème} étape : le titrage de l'ammoniacque par l'acide sulfurique

L'ammoniac ainsi piégé est neutralisé au fur et à mesure de son arrivée par une solution étalonée d'acide fort (H_2SO_4) en présence d'un indicateur coloré : rouge de méthyle. On a :



(Lorsque l'ammoniac arrive dans l'acide borique il alcalinise le milieu dont la couleur change, on verse alors la solution étalonée d'acide fort pour ramener l'indicateur à sa teinte sensible)

Le calcul

$$\text{N \%} = (\text{A-B}) * \text{N} * 14,007 * 100 / \text{P}$$

A : volume de l'acide sulfurique nécessaire pour le titrage de l'échantillon (ml)

B : volume de l'acide sulfurique nécessaire pour le titrage du témoin (ml)

N : normalité de l'acide sulfurique

P : prise d'essai (mg)

➤ **Protocole de détermination du phosphore totale dans le sol (méthode d'OLSEN)**

Principe :

L'extraction d'acide phosphorique est faite avec une solution 0,5 N de bicarbonate de sodium ajustée à pH 8,5. Le dosage est basé sur la formation et la réduction d'un complexe formé par l'acide phosphorique et l'acide molybdique.

Le complexe phospho-molybdique, sous l'effet de la chaleur et en présence d'acide ascorbique développe une coloration bleue dont l'intensité est proportionnelle à la concentration de la solution en orthophosphates.

La formation du complexe se fait selon la réaction suivante :



Mode opératoire :

1^{ère} partie : l'extraction

- Peser 5 g de terre fine, ajouter 100 ml de Na HCO₃ (0,5 N) ;
- Ajouter une pincée de charbon actif jusqu'à l'obtention d'une solution claire ;
- Agiter puis filtrer

2^{ème} partie : la complexation et réduction

- Prélever 5 ml du filtrat ;
- Ajouter 3 ml du réactif chloro-sulfo-molybdique et laisser le CO₂ se dégager ;
- Ajouter 15 ml d'eau distillée ;
- Ajouter 2 ml d'acide ascorbique, puis chauffer au bain marie à 80°C pendant 5 mn, jusqu'au développement d'une couleur bleue.

3^{ème} partie : le dosage par colorimétrie

- Passer au colorimètre pour effectuer une lecture de densité optique ;
- Passer également la gamme étalon pour le calcul du coefficient de lecture (C)

Le calcul

Le phosphore assimilable dosé est exprimé sous la forme de P₂O₅ en ppm. La formule de calcul est la suivante :

$$\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ppm} = X / 1000 * U/v * V/P * 1000$$

X : concentration obtenue en fonction du coefficient de lecture (X = Lx/C)

U : volume colorimétrique (25 ml)

v : volume de la prise d'essai (5 ml)

V : volume de la solution d'extraction (100 ml)

P : poids de la prise d'essai de terre (5 g)

➤ **Protocole de détermination du potassium échangeable dans le sol (méthode d'extraction par l'acétate d'ammonium)**

Principe

Il s'agit d'extraire le K échangeable avec une solution d'acétate d'ammonium (CH₃COONH₄) 1N à pH neutre. Le potassium échangeable est déplacé par l'ion ammonium et est dosé au spectrophotomètre à flamme.

Mode opératoire :

Il faut respecter le rapport sol / solution (1/20)

- Peser 5 g de sol (séché et tamisé à 2 mm) et les placer dans un erlenmeyer de 200 ml ;
- Ajouter 100 ml de la solution d'acétate d'ammonium ;
- Agiter pendant une heure ;

- Filtrer la suspension dans une fiole jaugée de 100 ml, compléter au trait de jauge avec la solution d'acétate d'ammonium ;
- Préparer une dilution de 1/10 en mettant 5 ml de la solution mère dans une fiole de 100 ml compléter au trait de jauge avec la solution d'acétate d'ammonium ;
- Après le passage de la gamme étalon, passer l'échantillon au spectrophotomètre à flamme.

Le dosage de K dans le spectrophotomètre à flamme nécessite d'étalonner l'appareil de mesure : il s'agit de préparer une solution mère à 1000 ppm (1,907 g de KCl dans une fiole de 1000 ml), à partir de la solution mère, on prépare la solution fille à une concentration de 100 ppm, on prend 10 ml de la solution mère, on les introduit dans une fiole jaugée de 100 ml, on complète ensuite au trait de jauge avec la solution d'acétate d'ammonium.

Les solutions d'étalonnage sont préparés à partir de la solution fille et on introduit les volumes suivants :

Solution obtenu (ppm)	Nbr de ml à prendre de la solution fille	Concentration
1	0,5	0,5
2	1	1
3	2	2
4	4	4
5	8	8
6	12	12
7	20	20

On complète au trait de jauge avec la solution d'acétate d'ammonium.

Avant le passage des échantillons en spectrophotomètre à flamme, on fait passer d'abord la gamme étalon, le zéro de l'appareil est obtenu sur la solution d'acétate d'ammonium.

Le calcul

A partir des résultats obtenus par le passage de la gamme étalon en spectrophotomètre à flamme, on calcule le coefficient C (lecture moyenne correspondant à 1 ppm). Ce coefficient nous permettra de calculer la valeur du potassium échangeable.

$$K \text{ (meq/100 g sol)} = L \times D \times 1 \times v \times 100 / C \times 39 \times 1000 \times P$$

Où :

L : lecture de l'échantillon considéré

C : coefficient de lecture

On a :

$$C = \text{somme des lectures} / \text{sommes des concentrations.}$$

D : inverse de la dilution

V : volume d'extraction (100 ml)

P : prise d'essai

➤ Protocole de détermination du pH de sol (pH mètre)

Matériel et réactifs

pH-mètre, balance de précision, agitateur magnétique, bécher, petites bouteilles, pipette, eau distillée, solution tampon à pH 7,00 et solution tampon à pH 4,00

Étalonnage du pH-mètre

Calibrer le pH-mètre en l'ajustant à pH 7,00 avec la solution tampon à pH 7,00. Vérifier si l'instrument donne une lecture de 4,00 pour la solution tampon à pH 4,00. S'il est impossible d'obtenir une lecture correcte du pH des deux tampons, un problème d'électrode ou de pH-mètre est fortement probable.

Mode opératoire :

- Peser 20 g de terre séchée et tamisée à 0,2 mm ;
- Ajouter 50 ml d'eau distillée dans bicher de 100 ml (respecter un rapport de 2/5) ;

- Agiter pendant 2 heures avec un agitateur magnétique ;
- Laisser reposer 30 mn ;
- Mesure de pH à l'aide d'un pH-mètre (Plonger l'électrode dans la solution et prendre la lecture après stabilisation du pH-mètre.)

➤ **Protocole de mesure de la conductivité électrique CE (Conductimètre)**

Matériel et réactifs

Conductimètre, agitateur magnétique, bécher, balance de précision, petite bouteilles, eau distillée.

Étalonnage

L'étalonnage sert à déterminer la constante de cellule, qui est nécessaire pour convertir la valeur de conductance d'un échantillon en conductivité.

Étalon de conductimètre

Une solution de conductivité connue est utilisée pour étalonner la chaîne de mesure de conductivité.

Mode opératoire

- Peser 10 g de terre séchée et tamisée à 0,2 mm ;
- Ajouter 50 ml d'eau distillée dans un bécher de 100 ml (respecter un rapport 1/5) ;
- Agiter pendant 2 heures avec un agitateur magnétique ;
- Laisser reposer pendant 30 mn ;
- Mesurer la CE à l'aide d'un conductimètre (Plonger l'électrode dans la solution et prendre la lecture après stabilisation du conductimètre).

➤ **Protocole de mesure de l'humidité du sol**

Principe

Cette technique consiste à prélever un échantillon du sol par la tarière à deux profondeurs 0-20 cm et 20-40 cm, puis pesé à l'état frais et après passage à l'étuve et donc mesure de l'humidité.

Matériel

Tarière, boîtes métalliques, sachets en plastique, étiquettes, étuve, balance de précision

Mode opératoire

- Prélevez à l'aide de la tarière le sol à deux profondeurs 0-20 et 20-40 cm ;
- Mettez la terre prélever par la tarière en sachet en plastique étiquetée ;
- Au laboratoire, pesez la boîtes métallique vide puis tarez la balance ;
- Remplir la boîte métallique de terre puis peser à nouveau pour obtenir le poids frais ;
- Introduire les boîtes métalliques remplis de terre à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures ;
- Ensuite, après séchage, on va mesurer les boîtes à nouveau pour obtenir le poids sec.

Le calcul :

$$H (\%) = (PH - PS / PS) * 100$$

Avec :

H : Humidité (%)

PH : poids du sol humide

PS : poids du sol sec

➤ **Protocole de la densité apparente (Bulk Density)**

Principe :

Cette technique consiste à prélever un échantillon du sol de volume connu dont on déterminera la masse humide puis la masse sèche et donc la densité

Matériel

Cylindre, poussoir, un couteau, règle métallique, l'étuve, Balance de précision

Mode opératoire :

- Aplanir la surface du sol en dégageant les débris végétaux ;

- Places les cylindres et le poussoir ;
- Enfoncer le cylindre avec précaution jusqu'à ce que la surface de la couche mesurée dépasse la section supérieure du cylindre ;
- Retire le poussoir ;
- Extraire le cylindre avec un couteau à lame résistante, en passant sous le cylindre à distance suffisante pour éviter tout arrachement de la terre de la partie inférieure du cylindre ;
- Raser progressivement les deux cotés du cylindre, d'abord avec le couteau puis avec une règle métallique taillée en biseau pour la finition ;
- Refermer hermétiquement le cylindre ;
- En arrivant au laboratoire, peser à l'état humide, sécher à l'étuve à 105°C pendant 24 heures, puis peser à l'état sec.

Le calcul

$$D_a \left(\frac{g}{cm^3} \right) = P / V_a$$

Avec :

D_a est la masse volumique du sol

P : masse totale du sol sec

V_a : Volume de cylindre

Protocole de la mesure de teneur relative en eau (Leaf Relative Water Content « LRWC » or « relative turgidity »)

Principe :

La teneur relative en eau d'une feuille est une mesure de son état hydrique (teneur réelle en eau) par rapport à sa capacité maximale de rétention d'eau à pleine turgidité. La TRE mesure le « déficit hydrique » de la feuille et peut indiquer un degré de stress exprimé par la sécheresse et le stress thermique.

La TRE est facilement et simplement mesuré, sans avoir besoin d'instruments spécialisés coûteux. Les échantillons de feuilles fraîches de cultures sont d'abord pesés, puis placés dans de l'eau, réfrigérés pendant la nuit et pesés de nouveau avant d'être séchés à l'étuve et pesés à nouveau.

Matériel :

Ciseaux, Tubes à essai étiquetés (un par tracé), Boîte froide, Balance de précision, Eau distillé, Papier absorbant, Sachets en papier (Enveloppes), Etuve.

Mode opératoire :

Sélectionner la feuille la plus développée recevant la lumière du soleil, généralement la feuille étendard. L'échantillonnage foliaire doit être réalisé le plus rapidement et le plus efficacement possible, et utiliser l'ombre du corps de l'échantillonneur lors de la découpe et de la conservation des échantillons.

1. Numéroté et peser les tubes à essai vides ;
2. Sélectionner et couper cinq feuilles étendard entièrement déployées de plantes choisies au hasard dans chaque parcelle élémentaire ;
3. Couper le dessus et le fond de toutes les feuilles ensemble, pour laisser une section centrale de 5 cm, les placer immédiatement dans les tubes pré-pesés et sceller le couvercle (de sorte qu'il n'y ait pas de perte/gain d'humidité du système) ;
4. Placer immédiatement le tube dans un contenant isotherme refroidi (à environ 10 °C à 15 °C, mais non congelé) ;
5. Apportez les tubes au laboratoire dès que possible ;
6. Peser tous les tubes à essai (tube W+PF) ;
7. Ajouter 1 ml d'eau distillée à chaque tube à essai ;
8. Placer les tubes à essai dans un réfrigérateur (à 4 °C dans l'obscurité) pendant 24 heures (pour que les feuilles atteignent la pleine tourelle) ;
9. Retirer les échantillons de feuilles du tube et les sécher rapidement et soigneusement avec du papier absorbant ;
10. Peser l'échantillon de feuilles (PT; poids turgide) ;
11. Placer les échantillons de feuilles dans une enveloppe étiquetée et les sécher à 70 °C pendant 48 heures, ou jusqu'à une masse constante ;
12. Peser à nouveau les échantillons de feuilles (poids sec « PS »).

Le calcul

Tout d'abord, obtenir le poids frais (PF) des échantillons de feuilles:

PF = poids de tube total (W+ PF) – poids de tube (W)

Calculer ensuite la TRE de la feuille :

$$\text{TRE (\%)} = (\text{PF-PS}) / (\text{PT-PS}) * 100$$

Où : PF = poids frais; PT = poids turgide; PS = poids sec ; W : poids de tube à essai vide.