



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
المدرسة الوطنية العليا للفلاحة الحراش-الجزائر
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE
EI-HARRACH –ALGER

Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat 3ème cycle LMD

Spécialité : Amélioration des productions végétales et agriculture durable

Thème

Nutrition phosphatée d'une culture de blé dur en zones semi-arides : effet des systèmes de culture.

Présentée par : Mlle. DJOUADI Karima

Membres de jury

Président : M. MEFTI Mohammed

Professeur, ENSA, Alger

Directeur de thèse : M. MEKLIICHE Arezki

Professeur, ENSA, Alger

Examineurs : M. FEDDAL Mohammed Amine

MCA, ENSA, Alger

M. BENNIOU Ramdane

Professeur, Université Mohamed Boudiaf,

M'sila

M^{me} DERAOUI Naima

MCA, Université Kasdi Merbah, Ouargla.

Année universitaire : 2021-2022

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents,

À toute ma famille et tous mes amis,

Et à toute personne qui m'a soutenu pendant mes longues années d'étude.

KARIMA

Remerciements

Tout d'abord je remercie dieu qui m'a donné la chance, puis le courage de mener le chemin de la recherche scientifique qui, malgré difficile, m'a toujours passionné.

Ce travail qui m'a pris cinq longues années, passant de la candeur étudiante à la maturité d'une jeune chercheuse scientifique n'aurait pas pu voir le jour, sans l'aide inconditionnelle de nombreuses personnes. Ce sont certaines de ces personnes que j'aimerais mettre en avant dans ces remerciements.

Je ne saurais jamais suffisamment exprimer ma gratitude et mon profond remerciement à mon directeur de thèse, monsieur MEKLCHE Arezki de m'avoir dirigé, soutenu et encouragé pendant toute la durée de l'élaboration de cette thèse, sa disponibilité permanente et ses qualités humaines et scientifiques vont me servir à jamais comme référence.

Mes vifs remerciements vont aussi à madame HANIFI-MEKLCHE Leila, pour ses précieux conseils et pour sa contribution à la correction et à la finalisation et de cette thèse.

Je remercie chaleureusement le professeur MEFTI Mohammed de m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de ma soutenance. Au même titre, j'adresse mes vifs remerciements au Dr FEDDAL Mohammed Amine, le Professeur BENNIUOU Ramdane et Dr DERAOUI Naima qui m'ont fait l'honneur d'assurer l'examen de ce travail.

Je n'oublierais pas de remercier monsieur OULD HOCINE Abdelaziz de nous avoir autorisé de réaliser notre expérimentation au sein de sa propriété, ainsi que de nous avoir aidé avec tous ses moyens humains et matériels durant toute la durée de notre expérimentation. Je remercie aussi très particulièrement tout le personnel de la ferme, à leur tête le gérant « Djamel » de n'avoir épargné aucun effort pour nous aider à chaque fois que nous le demandons.

Mes profonds remerciements vont également à ma collègue et ma très chère amie RIDA Soumeya pour sa présence quotidienne et son soutien moral, physique et scientifique du début jusqu'à la fin de ce trajet commun. Je remercie également mes camarades et guides de détresse : KHERRIF Omar et HEBBACHE Hamza pour leurs conseils, leur soutien et leurs encouragements sans limites.

Mes remerciements s'adressent aussi, à monsieur HAMADACHE Abdelmadjid, Mme DAHMANI Sonia et son époux AID Hakim pour leur contribution à la mise en place de l'expérimentation et aux étudiants : MOUSSI Sonia, ABID Yasmine, LADJIAR Nadia, GHENIMI Manel, MHANA Nawel, SILARBI Zakaria et BOUMAZA Abderraouf, pour leur contribution à la réalisation de ce travail, et pour leur aimable compagnie sur le terrain.

Je tiens à remercier très particulièrement, monsieur AMICHE Abderrahmane (cadre à l'INSID) pour son accueil chaleureux et sa réponse toujours favorable pour toute aide ou accompagnement.

A toute personne qui a participé de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail, qu'elle trouve ici l'expression de ma reconnaissance la plus sincère.

Résumé

L'objectif de la première partie de cette étude menée durant les trois campagnes 2017-2018, 2018-2019 et 2019-2020, dans la région semi-aride d'El hachimia (Bouira) est de comparer trois types de travail du sol : travail conventionnel (TC), travail minimum (TM) et semis direct (SD), ainsi que de quatre types de rotations culturales : monoculture de blé (B-B), jachère-blé (J-B), lentille-blé (L-B) et avoine fourrage-blé (A-B) sur la production et la nutrition phosphatée de la culture de blé dur. La seconde partie a pour objectif d'étudier la réponse de cette même culture à trois doses d'engrais P (0 kg P₂O₅ ha⁻¹, 30 kg P₂O₅ ha⁻¹ et 60 kg P₂O₅ ha⁻¹) appliquées en bandes localisées sous la ligne de semis ou superficiellement dans différents systèmes de culture (monoculture et rotation lentille-blé) en conditions pluviales dans la même région. Les résultats qui ressortent de cette étude montrent que le type de travail du sol n'a aucun effet sur le rendement et ses composantes sur l'ensemble des trois années de l'étude. L'analyse de la variance individuelle au niveau de chaque année montre que le SD a donné le meilleur rendement en grain (P<0,01) durant l'année 2020 caractérisée par une pluviométrie très faible, et ce grâce à une densité d'épis plus importante (P<0,05) par rapport aux deux autres systèmes. Cela confirme l'hypothèse suggérant que le SD, grâce à sa meilleure capacité de rétention de l'eau, garantit une stabilisation des rendements dans les conditions méditerranéennes variables. Nos résultats affirment aussi que les précédents jachère et lentille donnent les meilleurs rendements (P<0,001) et les meilleurs poids de mille grains (P<0,05) par rapport à une rotation céréales-céréales (B-B et A-B). La qualité du grain de blé dur s'est montrée plus sensible aux rotations culturales qu'aux systèmes de travail du sol, le labour conventionnel ayant un effet négatif uniquement sur le taux de vitrosité (P<0,01), par contre les rotations de cultures ont significativement affecté la teneur en protéines (P<0,05) et le taux de vitrosité (P<0,05). La rotation L-B ayant la teneur en protéines du grain la plus élevée, alors que la monoculture de blé (B-B) a obtenu le taux de vitrosité le plus faible par rapport aux autres types de rotations. Concernant la nutrition phosphatée de la culture de blé dur, nos résultats montrent que les systèmes de travail du sol n'ont pas eu d'effet sur la disponibilité du P dans le sol, ni sur sa concentration dans le grain et la paille du blé dur durant toutes les années de l'expérimentation. Cependant la rotation J-B, a significativement et négativement affecté les concentrations du grain et de la paille en P, ceci démontre l'effet négatif de la jachère sur l'érosion du sol et la perte des éléments nutritifs. D'autre part, le deuxième essai nous a permis d'avoir les résultats suivants : dans le système lentille-blé, l'apport de 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ augmente le nombre de grains produits par plant et au mètre carré (p<0.05) et le rendement en grain (P<0,01) de la culture de lentille, la teneur en phosphore assimilable dans le sol et la biomasse sèche produite par la culture de blé dur suivante (p<0.01). En revanche, dans le système de monoculture les apports de P n'affectent ni la productivité ni la nutrition en phosphore de la culture de blé pendant les deux années de l'expérience (2018-2019 et 2019-2020). Les méthodes d'application de P n'ont affecté aucun paramètre mesuré sur les deux cultures durant les deux années, sauf lorsque le blé dur a suivi la culture de lentille en 2020, où l'application localisée de l'engrais phosphaté a augmenté de manière significative la teneur en P dans le grain et la paille.

Mots clés : Phosphore, semis direct, rotation, labour, zones semi-arides, qualité du grain, fertilisation.

ملخص

الهدف من الجزء الأول من هذه الدراسة التي دامت ثلاث مواسم (2017-2018)، (2018-2019) و (2019-2020) في المنطقة شبه الجافة الهاشمية (البويرة) هو مقارنة ثلاثة أنواع من الحرت: الحرت التقليدي (TC) ، والحرت الأدنى (TM) ، والبذر المباشر (SD) ، بالإضافة إلى أربعة أنواع من الدورات الزراعية : الزراعة الأحادية للقمح (BB) ، القمح و البور (JB) ، القمح و العدس (LB) ، والقمح مع الشوفان العلفي (AB) على الإنتاج والتغذية الفوسفاتية لمحصول القمح الصلب. يهدف الجزء الثاني إلى دراسة استجابة نفس المحصول لثلاث جرعات من سماد الفوسفور (0 كغ P_2O_5 هكتار⁻¹ ، 30 كغ P_2O_5 هكتار⁻¹ و 60 كغ P_2O_5 هكتار⁻¹) المطبقة موضعياً تحت خط البذر أو سطحياً ، على المحصول والتغذية الفوسفاتية للقمح الصلب المزروع في أنظمة محاصيل مختلفة (الزراعة الأحادية وتناوب القمح و العدس) في ظل ظروف ممطرة من نفس المنطقة. أظهرت نتائج هذه الدراسة أن نوع الحرت ليس له أي تأثير على المحصول ومكوناته طوال سنوات الدراسة الثلاث. غير أن التحليل الفردي لكل عام قد أظهر أن SD أعطى أفضل محصول حبوب ($P < 0.01$) خلال عام 2020 الذي تميز بهطول منخفض جداً للأمطار، وذلك بفضل كثافة السنابل العالية ($P < 0.05$) مقارنة بالنظامين الآخرين ، مما يؤكد الفرضية التي تشير إلى أن SD بفضل قدرته الكبيرة على الاحتفاظ بالمياه يضمن استقرار الإنتاج في ظروف البحر الأبيض المتوسط المتغيرة. تؤكد نتائجنا أيضاً أن القمح المزروع وفق نظامي التناوب قمح بور و قمح عدس يعطي محصول ($P < 0.001$) ووزن ألف حبة ($P < 0.05$) أفضل مقارنةً بنظام تناوب أحادي الحبوب (B-B و A-B). خلال هذه الدراسة كانت جودة حبوب القمح الصلب أكثر حساسية لتناوب المحاصيل مقارنة بنظم الحراثة، وكان للحراثة التقليدية تأثير سلبي على معدل المظهر الزجاجي لحبات القمح ($P < 0.01$)، ومن ناحية أخرى أثرت دورات المحاصيل بشكل كبير على محتوى البروتين ($P < 0.05$) وكذا معدل المظهر الزجاجي ($P < 0.05$) حيث احتوت الدورة (L-B) على أعلى محتوى من البروتين الحبيبي، بينما كان معدل المظهر الزجاجي في نظام القمح الأحادي (B-B) أقل مقارنة بأنواع الدورات الأخرى. فيما يتعلق بالتغذية الفوسفاتية لمحصول القمح الصلب، أوضحت نتائجنا أن أنظمة الحرت لم يكن لها تأثير على توفر الفوسفات في التربة، ولا على تركيزه في حبوب وقش القمح الصلب طوال سنوات التجربة. لكن نظم التناوب كان لها أثر فعال بحيث أثر تناوب القمح والبور بشكل كبير وسلبي على تراكيز الحبوب والقش، مما يدل على التأثير السلبي لهذا النظام على تآكل التربة وفقدان المغذيات. من ناحية أخرى، أتاحت لنا التجربة الثانية بالحصول على النتائج التالية : في نظام القمح العدس كانت مساهمة 60 كغ هكتار⁻¹ من P_2O_5 تزيد من عدد الحبوب المنتجة لكل متر مربع ، الإنتاج الكمي للحبوب ($P < 0.05$) في محصول العدس، محتوى الفسفور المتاح في التربة والكتلة الحيوية الجافة الناتجة عن محصول القمح الصلب الموالي. في المقابل، في نظام الزراعة الأحادية، لا تؤثر مدخلات الفسفور على الإنتاجية أو تغذية الفسفور لمحصول القمح خلال عامين من التجربة (2019 و 2020). كما لم تؤثر طرق تطبيق P على أي متغير تم قياسه على المحصولين خلال العامين، ما عدا عندما اتبع القمح الصلب محصول العدس في عام 2020، حيث أدى التطبيق الموضعي للأسمدة الفوسفاتية إلى زيادة كبيرة في محتوى الفوسفور في الحبوب والقش.

الكلمات المفتاحية: الفسفور، البذر المباشر ، تناوب المحاصيل ، الحرت ، المناطق شبه الجافة ، جودة الحبوب ، التسميد.

Abstract

The objective of the first part of this study conducted during the three seasons 2017-2018, 2018-2019 and 2019-2020, in the semi-arid region of El hachimia (Bouira) is to compare three tillage systems: Conventional tillage (CT), minimum tillage (MT), and no tillage (NT), as well as four types of crop rotations: wheat monoculture, fallow-wheat, lentil-wheat, and oat forage-wheat on the production and phosphorus nutrition of the durum wheat crop. The second part aims to study the response of the durum wheat crop to three P fertilizer rates (0 kg P₂O₅ ha⁻¹, 30 kg P₂O₅ ha⁻¹ and 60 kg P₂O₅ ha⁻¹) banded below the seed row or applied superficially in different cropping systems (monoculture and lentil-wheat rotation) under rainfed conditions in the same region. Results from this study show that tillage system had no effect on yield and its components across the three years of the study. The analysis of each year individually shows that NT gave the best grain yield (P<0.01) during the year 2020 characterized by a very low rainfall, thanks to a higher density of ears (P<0.05) compared to the other two systems, confirming the hypothesis suggesting that NT with its greater water retention capacity guarantees a stabilization of yields under variable Mediterranean conditions. Our results also affirm that the fallow and lentil as previous crops give the best yield (P<0.001) and thousand kernel weight (P<0.05) compared to a cereal-cereal rotation (wheat-wheat and oat-wheat). Durum wheat grain quality was more sensitive to crop rotations than to tillage systems, with conventional tillage having a negative effect only on the vitreosity rate (P<0.01), but crop rotations significantly affected both protein content (P<0.05) and vitreosity rate (P<0.05). The lentil-wheat rotation had the highest grain protein content, while the wheat monoculture had the lowest vitreosity rate compared to the other type of rotations. Regarding the phosphorus nutrition of the durum wheat crop, our results show that the tillage systems had no effect on the availability of P in the soil, nor on its concentration in the grain and straw of the durum wheat during all the years of the experiment. However, the fallow-wheat rotation had significantly and negatively affected the P concentrations of grain and straw, demonstrating the negative effect of fallow on soil erosion and nutrient loss. On the other hand, the second trial allowed us to have the following results: in the lentil-wheat system, the application of 60 kg ha⁻¹ of P₂O₅ increases the number of grains produced per square meter (p<0.01) and the grain yield (P<0.01) of the lentil crop, the content of available P in the soil and the dry biomass produced by the following durum wheat crop (p<0.01). Meanwhile, in the monoculture system, P inputs did not affect the productivity and phosphorus nutrition of the wheat crop in both years of the experiment (2019 and 2020). The P application methods did not affect any parameter measured on the two crops in both years, except when durum wheat followed the lentil crop in 2020, where the banded application of phosphorus fertilizer significantly increased the P content in the grain and straw.

Keywords: phosphorus, no-till, crop rotations, tillage, semi-arid areas, grain quality, fertilization.

Liste des abréviations

AC : agriculture de conservation ;

SD : semis direct ;

TM : travail minimum ;

TC : travail conventionnel ;

J-B : rotation biennale jachère-blé dur ;

A-B : rotation biennale avoine-blé dur ;

L-B : rotation biennale lentille-blé dur ;

B-B: monoculture de blé dur ;

TS : travail du sol ;

MADR : ministère de l'agriculture et du développement rural ;

SAU : surface agricole utile ;

FAO : food and agriculture organisation ;

ESDAC : european soil data center ;

CCLS: coopérative des céréales et légumes secs ;

CNCC : centre national de contrôle et de certification des semences et plants ;

ONM : office national de la météorologie ;

ANOVA : analyse de la variance ;

PPDS: plus petite différence significative ;

NPM : nombre de plants par mètre carré ;

PMG : poids de mille grains ;

NGE : nombre de grains par épi ;

PS : poids spécifique ;

MAP : mono-ammonium phosphate ;

CE : conductivité électrique ;

L : apport localisé ;

NL : apport non-localisé ;

D : dose d'apport d'engrais;

M : mode d'apport d'engrais.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques du sol à 30 cm de profondeur avant l'installation de l'essai	23
Tableau 2 : Données climatiques moyennes de la région d'étude durant la période de 1990-2020.	24
Tableau 3 : Conditions climatiques des trois campagnes d'expérimentation (2018-2020).....	24
Tableau 4 : Principales caractéristiques de la variété de blé dur Simeto.	27
Tableau 5 : Liste des herbicides utilisés pour le désherbage des parcelles de l'essai des systèmes de culture durant les trois campagnes de l'étude.....	29
Tableau 6 : Liste des produits phytosanitaires utilisé pour le traitement des parcelles de l'essai des systèmes de culture durant les trois campagnes de l'étude.....	30
Tableau 7 : Moyennes de rendement et ses composantes obtenues par les trois systèmes de travail du sol durant les trois campagnes de l'étude.	36
Tableau 8 : Moyennes de rendement en biomasse sèche, en paille et de l'indice de récolte obtenues par les trois systèmes de travail du sol durant les trois campagnes de l'étude.	40
Tableau 9 : Moyennes des caractères qualitatifs obtenues par les trois systèmes de travail du sol durant trois années de l'étude.	44
Tableau 10 : Moyennes obtenues par les trois systèmes de travail du sol pour les paramètres de rendement en biomasse sèche, la teneur en P dans la plante et le prélèvement total en P au stade floraison durant les années 2017-2018 et 2018-2019.....	48
Tableau 11 : Moyennes obtenues par les trois systèmes de travail du sol pour la teneur en P dans le grain et dans la paille et son exportation totale par la culture de blé dur au stade maturité durant les trois années de l'étude.	51
Tableau 12 : Moyennes de rendement en grain et ses composantes obtenues par les différents systèmes de travail du sol et les différentes rotations de cultures durant l'année 2018-2019.....	55
Tableau 13 : Moyennes de nombre de plants par mètre carré, des rendements en biomasse sèche et en paille et d'indice de récolte obtenues par les différents systèmes de travail du sol et les différentes rotations de cultures durant l'année 2018-2019.....	57
Tableau 14 : Moyennes des paramètres de la qualité de la graine obtenues par les différents systèmes de travail du sol et les différentes rotations de cultures durant l'année 2018-2019.....	60
Tableau 15 : Moyennes des paramètres de rendement en biomasse sèche, la teneur en P dans la plante et le prélèvement total en P au stade floraison obtenues par les différents systèmes de travail du sol et les différentes rotations de cultures durant l'année 2018-2019.	62
Tableau 16 : Moyennes des paramètres de la teneur en P dans le grain et dans la paille et son prélèvement total par la culture au stade maturité obtenues par les différents systèmes de travail du sol et les différentes rotations de cultures durant l'année 2018-2019.	64
Tableau 17 : Moyennes des paramètres de la teneur en P assimilable et du pH du sol obtenues par les différents systèmes de travail du sol et les différentes rotations de cultures durant l'année 2017-2018	65
Tableau 18 : Moyennes des paramètres de la teneur en P assimilable et du pH du sol obtenues par les différents systèmes de travail du sol et les différentes rotations de cultures durant l'année 2018-2019.	66
Tableau 19 : Moyennes des paramètres de la teneur en P assimilable et du pH du sol obtenues par les différents systèmes de travail du sol et les différentes rotations de cultures durant l'année 2019-2020.	67
Tableau 20 : Caractéristiques du sol à 15 cm de profondeur avant l'installation de l'essai	93

Tableau 21 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur la culture de lentille durant l'année 2018-2019.	101
Tableau 22 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur le rendement et les composantes du rendement de la culture de blé dur conduite sur la lentille durant l'année 2019-2020.....	103
Tableau 23 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur la teneur en P dans le grain et la paille et son exportation totale par la culture de blé dur conduite sur la lentille durant l'année 2019-2020.	104
Tableau 24 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur le rendement et les composantes du rendement de la culture de blé dur conduite en monoculture durant l'année 2018-2019.....	109
Tableau 25 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur la teneur en P dans le sol, la teneur en P dans le grain et la paille et son exportation totale par la culture de blé dur conduite en monoculture durant l'année 2018-2019.....	110
Tableau 26 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur le rendement et les composantes du rendement de la culture de blé dur conduite en monoculture durant l'année 2019-2020.....	111
Tableau 27 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur la teneur en P dans le grain et la paille et son exportation totale par la culture de blé dur conduite en monoculture durant l'année 2019-2020.	112

Liste des figures

Figure 1 : Effet des techniques culturales sur la distribution des micro et macropores dans le profil du sol (0-600 mm)	12
Figure 2 : Image satellitaire montrant la localisation géographique du site expérimental.	22
Figure 3 : Schéma représentatif du dispositif expérimental	26
Figure 4 : Effet des systèmes de travail du sol sur le rendement et ses composantes durant les trois années de l'étude.....	37
Figure 5 : Effet des systèmes de travail du sol sur le nombre de plantes par mètre carré, le rendement en matière sèche et en paille et l'indice de récolte durant les trois années de l'étude.	41
Figure 6 : Relation entre le nombre d'épis par mètre carré et le rendement en grain durant l'année 2019-2020.	41
Figure 7 : Relation entre le nombre d'épis par mètre carré et le nombre de grains par épi durant l'année 2017-2018.	42
Figure 8 : Relation entre le nombre de plantes par mètre carré et le nombre de grains par épi durant l'année 2017-2018.	42
Figure 9 : Relation entre le rendement en biomasse sèche et l'exportation totale en P durant l'année 2019-2020.	42
Figure 10 : Relation entre le nombre d'épis par mètre carré et l'exportation totale du P durant l'année 2019-2020.	43
Figure 11 : Relation entre le nombre d'épis par mètre carré et le rendement en biomasse sèche durant l'année 2019-2020.	43
Figure 12 : Effet des systèmes de travail du sol sur le taux de protéines, le taux de vitrosité et le poids spécifique du grain durant les trois années de l'étude.	45
Figure 13 : Relation entre le poids spécifique et la teneur en protéines du grain durant l'année 2018-2019.	46
Figure 14 : Relation entre le poids de mille grains et la teneur en protéines du grain durant l'année 2019-2020.	46
Figure 15 : Effet des systèmes de travail du sol sur le rendement en biomasse sèche, la teneur en P dans la plante et son exportation par la culture de blé dur au stade floraison durant les années 2017-2018 et 2018-2019.	49
Figure 16 : Effet des systèmes de travail du sol sur la teneur en P dans le grain et dans la paille et son exportation totale par la culture de blé dur au stade maturité durant les trois années de l'étude.	52
Figure 17 : Relation entre le rendement en grain et l'exportation totale du P par la culture de blé dur en 2018-2019.	53
Figure 18 : Relation entre le rendement en grain et l'exportation totale du P par la culture de blé dur en 2019-2020.	53
Figure 19 : Effet des systèmes de travail du sol et des rotations culturales sur le rendement et ses composantes durant l'année 2018-2019.	54
Figure 20 : Effet des systèmes de travail du sol et des rotations culturales sur le nombre de plantes par mètre carré, des rendements en biomasse sèche et en paille et de l'indice de récolte durant l'année 2018-2019.	56
Figure 21 : Effet des systèmes de travail du sol et des rotations culturales sur la qualité du grain de blé dur durant l'année 2018-2019.....	59
Figure 22 : Effet des systèmes de travail du sol et des rotations culturales sur la nutrition phosphatée de la culture de blé dur au stade floraison durant l'année 2018-2019.	61

Figure 23 : Effet des systèmes de travail du sol et des rotations culturales sur la teneur en P dans le grain et dans la paille et son prélèvement total par la culture de blé dur au stade maturité durant l'année 2018-2019.	63
Figure 24 : Effet des systèmes de travail du sol et des rotations culturales sur la teneur en P assimilable et le pH du sol durant l'année 2017-2018.	66
Figure 25 : Effet des systèmes de travail du sol et des rotations culturales sur la teneur en P assimilable et le pH du sol durant l'année 2018-2019.	67
Figure 26 : Effet des systèmes de travail du sol et des rotations culturales sur la teneur en P assimilable et le pH du sol durant l'année 2019-2020.	68
Figure 27 : Evolution du pH du sol (à gauche) et du P assimilable (à droite) en fonction du type de travail du sol et de l'année.	68
Figure 28 : Evolution du pH du sol (à gauche) et du P assimilable (à droite) en fonction de la rotation culturale et de l'année.	69
Figure 29 : cycle de P dans le système plante, sol, engrais	86
Figure 30 : Courbe ombrothermique de Gaussen de la région d'étude pendant les deux campagnes 2018-2019 et 2019-2020.	94
Figure 31 : Schéma du dispositif expérimental de l'essai de fertilisation.	95
Figure 32 : Photos illustrant une parcelle de lentille avant le désherbage manuel (à gauche) et après le désherbage manuel (à droite).	97
Figure 33 : Image illustrant la méthode d'échantillonnage du sol.	99
Figure 34 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur la culture de lentille durant l'année 2018-2019.	105
Figure 35 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur les composantes du rendement et les rendement en biomasse sèche et en grain de la culture de blé dur conduite après une culture de lentille durant l'année 2019-2020.	106
Figure 36 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur la nutrition phosphatée de la culture de blé dur conduite après une culture de lentille durant l'année 2019-2020.	107
Figure 37 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur les composantes du rendement et le rendement en grain et en biomasse sèche de la culture de blé dur conduite en monoculture durant l'année 2018-2019.	113
Figure 38 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur la teneur en P dans le sol et la nutrition phosphatée de la culture de blé dur conduite en monoculture durant l'année 2018-2019.	114
Figure 39 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur les composantes du rendement et le rendement en grain et en biomasse sèche de la culture de blé dur conduite en monoculture durant l'année 2019-2020.	115
Figure 40 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur la nutrition phosphatée de la culture de blé dur conduite en monoculture durant l'année 2019-2020.	116

Sommaire

Dédicace

Remerciements

Résumé

Liste des abréviations I

Liste des tableaux II

Liste des figures IV

Sommaire VI

Introduction générale 1

Partie I : Effet des systèmes de culture sur la production et la nutrition phosphatée de la culture de blé dur en zones semi-arides

Introduction 5

Chapitre I : Bibliographie

1. Agriculture conventionnelle 7

1.1. Définition 7

1.2. Limites de l'agriculture conventionnelle 7

2. Agriculture de conservation 8

2.1. Définition 8

1.2. Historique 9

3. Agriculture conventionnelle vs agriculture de conservation 10

3.1. Sur la préservation des sols 10

3.2. Sur la qualité des sols 10

3.2.1. Qualité physique 11

3.2.2. Qualité biologique 12

3.2.3. Qualité chimique 14

3.3. Sur la nutrition minérale des cultures 17

3.4. Sur la production agricole 18

3.4.1. La culture de blé dur 18

3.4.2. Les autres cultures 20

Chapitre II : Matériel et méthodes

1. Localisation de l'essai 22

2. Caractéristiques édapho-climatiques de site expérimental 22

3. Dispositif expérimental 25

4. Conduite de l'essai 26

4.1. Matériel végétal utilisé	26
4.2. Travail du sol	27
4.3. Semis.....	28
4.5. Fertilisation.....	28
4.7. Traitements phytosanitaires	29
4.8. Récolte	30
4.9. Gestion des résidus de culture	30
5. Paramètres mesurés	30
5.1. Paramètres de production	30
5.2. Paramètres de qualité.....	31
5.3. Paramètres liés à la nutrition phosphatée.....	32
6. Analyses statistiques.....	32
Chapitre III : Résultats et discussion	
1. Effet des systèmes de travail du sol sur la production de la culture de blé dur conduite en monoculture durant les trois années de l'étude.....	34
2. Effet des systèmes de travail du sol sur la qualité du grain de la culture de blé dur conduite en monoculture	43
3. Effet des systèmes de travail du sol sur la nutrition phosphatée de la culture de blé dur conduite en monoculture à différents stades	47
4. Effet combiné des systèmes de travail du sol et des rotations de cultures sur la production de blé dur durant l'année 2018-2019	53
5. Effet combiné des systèmes de travail du sol et des rotations de cultures sur la qualité de la graine de blé dur durant l'année 2018-2019.....	58
6. Effet combiné des systèmes de travail du sol et des rotations de culture sur la nutrition phosphatée de la culture de blé dur durant l'année 2018-2019	60
7. Effet des systèmes de travail du sol et des rotations culturales sur la disponibilité du P et le pH dans la couche 0-10 cm du sol	65
Discussion.....	70
Conclusion.....	80
Partie II : Réponse de la culture de blé dur à la fertilisation phosphatée sous différents systèmes de culture	
Introduction.....	81
Chapitre I : Bibliographie	
1. Importance du phosphore	84
2. Effet d'une déficience en P.....	85
3. Effet du travail du sol sur la nutrition phosphatée.....	86

4. Effet des rotations de cultures sur la nutrition phosphatée	87
5. Effet de la fertilisation sur la nutrition phosphatée.....	88
5.1. Forme de l'engrais	88
5.2. Date d'application.....	89
5.3. Dose d'application	90
5.4. Localisation de l'engrais.....	91
Chapitre II : Matériel et méthodes	
1. Localisation de l'essai.....	93
2. Caractéristiques édapho-climatiques de site expérimental	93
3. Dispositif expérimental.....	94
4. Conduite de l'essai.....	95
4.1. Matériel végétal utilisé	95
4.2. Travail du sol	95
4.3. Semis.....	96
4.4. Fertilisation	96
4.5. Désherbage	96
4.6. Traitements phytosanitaires	97
4.7. Récolte	97
5. Paramètres mesurés	98
5.1. Paramètres mesurés sur la culture de lentille.....	98
5.2. Paramètres mesurés sur la culture de blé dur.....	98
5.3. Teneur en P et pH dans la couche 0-15 cm du sol.....	99
6. Analyses statistiques.....	99
Chapitre III : Résultats et discussion	
1. Effet des doses et des méthodes d'application de l'engrais P dans le système lentille-blé dur	100
2. Effet des doses et des méthodes d'application de l'engrais P dans le système de monoculture du blé dur	107
Discussion.....	116
Conclusion	121
Conclusion générale.....	122
Références bibliographiques.....	126
Annexes.....	151

Introduction générale

Introduction générale

Les céréales, en particulier, le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est une culture stratégique dans la région méditerranéenne, notamment en Algérie. La superficie consacrée à cette culture dans le pays est estimée à plus de 2 Mha avec une production annuelle moyenne faible ne dépassant pas 2 Mt (MADR, 2021). La production céréalière est concentrée dans les hautes plaines intérieures caractérisées par un climat méditerranéen avec des précipitations variables, et des sécheresses fréquentes, des sols à faibles niveaux de matière organique, des taux de calcaires élevés, et une faible capacité de rétention en eau, ce qui réduit considérablement le choix des cultures (Lahmar, 2006). Par ailleurs, les systèmes de culture adoptés dans cette région sont basés sur la monoculture des céréales, la jachère et le travail du sol profond et intensif. Selon les dernières statistiques du ministère de l'agriculture et du développement rural, le système céréales-jachère continue à être pratiqué sur près de 70 % de la SAU du pays, et la monoculture des céréales constitue la base des assolements, avec comme principale rotation (blé-orge) (MADR, 2021). Ces pratiques conçues essentiellement pour le stockage de l'eau ont montré leurs limites induisant une perte du sol par érosion hydrique et éolienne et un déclin du taux de carbone et de la fertilité des sols, ce qui met en cause la durabilité de la production dans ces zones semi-arides en majorité (Bouzerzour et Mahnane, 2006, Abdellaoui *et al.*, 2011).

Dans ces conditions, l'adoption du système d'agriculture de conservation, basée sur : i) un travail du sol réduit, ii) un couvert végétal permanent, et iii) une diversification des cultures, se présente comme une alternative plus durable. Ce système a révélé des effets positifs dans des environnements similaires, notamment, dans la région méditerranéenne, en réduisant les frais de production (Santín-Montanyá *et al.*, 2017), essentiellement la réduction de l'énergie utilisée pour le travail du sol (Hernández *et al.*, 1995, Pala *et al.*, 2000 ; Yalcin et Cakir, 2006), en stabilisant les rendements et en améliorant la qualité du grain de blé dur, en particulier dans les conditions de manque d'eau (López-Bellido *et al.*, 2000 ; De vita *et al.*, 2007 ; Mazzoncini *et al.*, 2008, Souissi *et al.*, 2020), en améliorant le stockage de l'eau dans le sol en réduisant, à la fois, son évaporation et en augmentant son infiltration (De vita, 2007 ; Acar *et al.*, 2017), et enfin en préservant les sols de l'érosion, en améliorant leur état structural par l'augmentation des taux de carbone et de matière organique (Bessam et Merabet, 2003 ; Hernández *et al.*, 2009 ; De Sanctis *et al.*, 2012 ; Acar *et al.*, 2018 ; López-Bellido *et al.*, 2020).

D'autre part, la nature calcaire des sols, les prix excessifs et la disponibilité limitée des engrais phosphatés constituent un autre défi pour la production céréalière, en particulier, la production de blé

dur dans les zones semi-arides algériennes. Le phosphore (P) est un élément essentiel à la croissance et au développement des plantes, contribuant à de nombreuses fonctions vitales telles que les divisions cellulaires, la respiration, la photosynthèse et la fixation symbiotique d'azote (Ziadi *et al.*, 2013). Une carence précoce en cet élément entraîne très vite un arrêt irréversible de la croissance de la plante (Grant *et al.*, 2001 ; Veneklaas *et al.*, 2012). Par conséquent le phosphore est considéré comme un facteur limitant de la production de biomasse dans de nombreux types d'environnements, particulièrement, les plus fragiles tels que les zones semi-arides (Rashid *et al.*, 2010).

Une présence précoce de phosphore est un facteur important pour la germination et l'installation des cultures aux premiers stades de leur développement (Nadeem *et al.*, 2011). Pour cela, des apports en P sont généralement effectués au début de chaque campagne agricole. Cependant seul 20 % de ces apports sont utilisés par la culture durant l'année de leur application (Aziz *et al.*, 2005). Le reste se trouve bloqué sous forme de précipités non solubles dans le sol ou perdu dans les eaux de ruissellement (Alessi et Power, 1980 ; McBeath *et al.*, 2012).

Le choix du type d'engrais à appliquer, sa dose, son emplacement et le moment de son application est crucial pour la conduite de la culture et la gestion des ressources en P (Grant et Flaten, 2019). Le choix de ces paramètres doit être adapté aux conditions spécifiques de la région, tels que le type du sol, le climat, les niveaux de production...etc. (Flis, 2018).

Étant donné que la demande d'engrais P continue de croître et que l'offre est limitée par des ressources finies (Ziadi *et al.*, 2013), la modification des pratiques agricoles est l'option la plus directe pour diminuer les pertes en P et maximiser l'efficacité de l'utilisation des engrais phosphatés (Frossard *et al.*, 2004). Le travail du sol et la rotation des cultures affectent les pertes en P des sols en modifiant les quantités du sol érodé et la distribution du P dans les horizons de surface (Frossard *et al.*, 2004). De nombreuses études ont montré que la perturbation minimale du sol permet une stratification du P disponible dans la surface du sol (Tiessen *et al.*, 2010 ; Piegholdt *et al.*, 2013 et Peigné *et al.*, 2018), ce qui rend son utilisation par la plante plus efficace. Grant et Flaten (2019) expliquent que la perturbation minimale du sol associée à une application localisée de l'engrais en bandes près de la graine restreint la zone de contact du phosphore avec les autres éléments tels que le calcium, ce qui réduit efficacement son blocage. Les techniques de travail minimum du sol peuvent fortement diminuer l'érosion des sols de grandes cultures et donc le P perdu par érosion (Quinton *et al.*, 2001). De même, toutes les techniques qui permettent d'améliorer la couverture du sol, notamment le maintien des résidus de culture, l'utilisation des cultures intercalaires ...etc. permettent de limiter

l'érosion et ainsi les pertes de P (Frossard et al., 2004). L'introduction de certaines cultures, telles que les légumineuses, dans la rotation améliore aussi significativement le statut de P dans le sol. Ces cultures agissent soit en modifiant la rhizosphère par la sécrétion des acides organiques (Raghothama, 1999), ou par la minéralisation des résidus de leurs racines (Mat Hassan *et al.*, 2012) et de leurs tiges lorsqu'elles sont maintenues sur place (Rose *et al.*, 2016).

Malgré son introduction en Algérie depuis la fin des années 1990 (Vadon *et al.*, 2006), l'adoption du système d'agriculture de conservation dans le pays reste modeste et n'a atteint que 5 600 ha jusqu'en 2016 (Kassam *et al.*, 2019). Cela est dû à diverses raisons, essentiellement, le manque de vulgarisation de ce système auprès des agriculteurs, où très peu d'essais ont été menés dans les conditions locales montrant les effets de l'agriculture de conservation sur la production agricole et la préservation des ressources naturelles (sol, eau, éléments nutritifs...). De plus, l'effet de ce système sur la nutrition phosphatée des cultures est très peu étudié dans le monde, et à notre connaissance, n'a jamais été étudié en Algérie.

La présente thèse a pour objectifs d'étudier l'efficacité du système d'agriculture de conservation dans les conditions semi-arides algériennes, notamment, sur la production et la nutrition phosphatée de la culture de blé dur, et de fournir aux agriculteurs une information fiable quant au choix d'une stratégie de fertilisation phosphatée adéquate dans les conditions locales. De ce fait, ce travail est divisé en deux parties :

La première partie consiste à comparer l'effet à court terme de différents systèmes de culture (agriculture de conservation vs agriculture conventionnelle) sur la production et la nutrition phosphatée de la culture de blé dur en zones semi-arides. Les objectifs de cette partie sont de :

- Déterminer l'effet du système d'AC par rapport aux systèmes de culture conventionnels sur la production en quantité et en qualité de la culture de blé dur, dans les conditions semi-arides fragiles de la région d'étude,
- Déterminer l'effet des différents systèmes de travail du sol (travail conventionnel, travail minimum et semis direct) sur la disponibilité du P dans le sol et son prélèvement par la culture de blé dur,
- Enfin, de déterminer l'effet des différents précédents culturaux (jachère, blé, lentille et avoine fourrage) sur l'épuisement ou la restitution de cet élément (P) pour la culture de blé dur qui succède.

La deuxième partie consiste à déterminer la réponse de la culture de blé dur à différentes doses d'engrais phosphaté apporté en surface ou incorporé près de la graine au semis, sous différents systèmes de culture (blé en monoculture et blé après une culture de lentille). Les objectifs de cette partie sont de :

- Comparer l'effet de différentes doses de P (0, 30 et 60 kg P₂O₅ ha⁻¹) apporté soit en surface, ou incorporé sur la ligne de semis avec la graine sur la production et la nutrition phosphatée de la culture de blé dur dans les conditions pédoclimatiques de la région d'étude,
- Déterminer l'effet du précédent légumineuse (lentille) sur la disponibilité du P dans le sol et la nutrition phosphatée de la culture de blé dur lui succédant.
- Enfin, de déduire une stratégie de fertilisation phosphatée qui permet à la fois une meilleure nutrition en P de la culture de blé dur, et une économie des dépenses relatives à l'acquisition des engrais phosphatés.

Partie I :

**Effet des systèmes de culture sur la
production et la nutrition phosphatée de
la culture de blé dur en zones semi-arides**

Introduction

Le système d'agriculture de conservation est apparu dès les années 30 comme une alternative durable au système d'agriculture conventionnelle qui a montré ses limites, non seulement en induisant une perte accrue des sols par érosion, mais aussi par son incapacité à faire face aux changements climatiques (Hobbs *et al.*, 2008). Depuis son apparition, le système d'agriculture de conservation a suscité l'intérêt des chercheurs qui ont étudié le comportement de différentes cultures conduites avec ce système (Mozafar *et al.*, 2000 ; Mazzoncini *et al.*, 2008 ; Ruisi *et al.*, 2012 ; Taner *et al.*, 2015) dans différents environnements (Anken *et al.*, 2006 ; Aziz *et al.*, 2013 ; Bai *et al.*, 2018).

L'effet de l'agriculture de conservation sur le rendement de blé dur a gagné un intérêt particulier dans la région méditerranéenne faisant l'objet de plusieurs études : López-Bellido *et al.* (1998), Hernánz *et al.* (2002), De Vita *et al.* (2007), Mazzoncini *et al.* (2008), Colecchia *et al.* (2015), Souissi *et al.* (2020). Les études mentionnées ont rapporté des résultats contradictoires en fonction des conditions climatiques qui sont variables d'une étude à l'autre. La variabilité de ces résultats prouve que l'influence des différents systèmes de culture sur le rendement dépend fortement des conditions climatiques. Les systèmes de non labour produisant de meilleurs rendements durant les années sèches, tandis qu'en conditions humides, le système conventionnel donne de meilleurs résultats. Cependant, la conversion d'une monoculture à une diversification de la rotation augmente le rendement quelles que soient les conditions de l'année (Amato *et al.*, 2013 ; Woźniak *et al.*, 2014, Pagnani *et al.*, 2019).

La production en qualité est de plus en plus recherchée en agriculture. De nos jours, les exigences de l'industrie semoulière en termes de qualité du grain de blé dur sont élevées. Une teneur en protéines $> 12,5 \%$, un poids spécifique $> 80 \text{ kg hl}^{-1}$, et un pourcentage de vitrosité $> 75 \%$ (De Vita *et al.*, 2007 ; Sieber *et al.*, 2015) sont très appréciés. Ces paramètres qui dépendent dans une large mesure des conditions climatiques semblent être aussi fortement affectés par les techniques de travail du sol et les rotations de cultures. Des études menées au sud de l'Italie font état de plus fortes valeurs du poids spécifique, du poids de mille grains et des teneurs en protéines obtenues par le travail conventionnel du sol en conditions humides (Colecchia *et al.*, 2015), alors qu'en conditions sèches, le blé dur cultivé avec le système de semis direct donne de meilleurs indices pour ces paramètres (De vita *et al.*, 2007). Cette interaction entre le climat et le travail du sol sur les paramètres de qualité est principalement due au fait que le système de non labour stocke davantage d'eau dans les conditions de sécheresse par rapport au labour conventionnel. D'autre part, tous les auteurs s'accordent que le

précédent légumineuse a un effet positif sur la teneur en protéines et la vitrosité de la graine qui sont fortement liées (Amato *et al.*, 2013 ; Woźniak *et al.*, 2014, Pagnani *et al.*, 2019).

La nutrition minérale constitue après la nutrition hydrique, le facteur limitant de la production en matière sèche des cultures. Cependant, très peu d'études se sont intéressées à l'effet des systèmes de culture sur la nutrition minérale, particulièrement, la nutrition phosphatée des plantes cultivées. La disponibilité du phosphore, qui est un élément peu mobile et rapidement perdu par blocage et précipitation, constitue un frein majeur à la production agricole dans différents types d'environnement (Malhotra *et al.*, 2018). La disponibilité de cet élément peut être améliorée par les techniques d'agriculture de conservation. De nombreux chercheurs ont remarqué une stratification du P assimilable dans les couches de surface dans les sols non labourés (Piegholdt *et al.*, 2013 et Peigné *et al.*, 2018), ce qui est dû à une perturbation minimale du sol d'une part, et une plus grande activité microbienne grâce au couvert végétal d'autre part. Une concentration plus élevée de P dans les grains de blé dur sous semis direct a été signalée par Mozafar *et al.* (2000), Mazzoncini *et al.* (2008) et Woźniak *et al.* (2014).

L'objectif de cette partie est de déterminer l'effet à court terme des techniques du travail du sol : travail conventionnel (TC), travail minimum (TM) et semis direct (SD), et des rotations de cultures les plus utilisées dans la région d'étude : la monoculture de blé (B-B), jachère-blé (J-B), lentille-blé (L-B), et enfin avoine fourrage-blé (A-B) sur :

- le rendement et la qualité du grain de blé dur en conditions pluviales sous climat semi-aride du Nord de l'Algérie.
- la disponibilité du phosphore dans l'horizon 0-10 cm du sol.
- la concentration du phosphore dans le grain et la paille, ainsi que son prélèvement par la culture de blé dur à différents stades (floraison et maturité).

Chapitre I : Bibliographie

1. Agriculture conventionnelle

1.1. Définition

L'agriculture conventionnelle dite intensive ou productiviste est un système de production paru après la deuxième guerre mondiale comme résultat du développement de la science (nouvelles variétés, arrivée des produits pesticides, développement de la mécanisation...etc.) (Murua et Laajimi, 1995). L'objectif de ce système est d'accroître la production agricole par unité de surface afin de subvenir aux besoins de la population mondiale croissante (Noirfalise *et al.*, 1974). L'intensification est basée sur deux facteurs importants : le travail et/ou le capital. Selon le cas, on a des agricultures intensives en travail ou des agricultures intensives en capital et en intrants (Bonny, 2011). Les systèmes opposés à ces deux systèmes sont respectivement : l'agriculture de conservation basée sur la réduction des opérations culturales et l'agriculture biologique basée sur la réduction des intrants.

L'agriculture conventionnelle repose sur l'exploitation maximale des terres, ce qui a entraîné une simplification des successions culturales (Murua et Laajimi, 1995). Ce processus a abouti à la constitution de vastes surfaces occupées par la même plante ou la même variété donnant naissance au système de culture appelé "monoculture" (Noirfalise *et al.*, 1974). Selon ces auteurs, ce système a pu être développé grâce à l'utilisation excessive des fertilisants, des pesticides et le retournement permanent du sol. Le labour constitue, donc, un des outils majeurs de l'agriculture conventionnelle, grâce à ses objectifs d'ameublissement du sol, de la réduction de la concurrence des mauvaises herbes, de la minéralisation de la matière organique, de la libération des nutriments, de la réduction du compactage du sol et de la lutte contre les maladies transmises par le sol et certains insectes (Hobbs *et al.*, 2008).

1.2 Limites de l'agriculture conventionnelle

La pratique prolongée du système d'agriculture intensive ou conventionnelle a entraîné avec le temps la dégradation de l'environnement comme conséquence de la mauvaise gestion des ressources naturelles. Le labour intensif a entraîné une dégradation des propriétés physiques du sol, ce qui le rend plus sensible au processus de ruissellement et augmente le risque d'érosion (Ouattara *et al.*, 2018). La spécialisation des exploitations agricoles a accéléré l'emploi des systèmes de culture basés sur la jachère et la monoculture (Noirfalise *et al.*, 1974). Selon Touré *et al.* (2017), la pratique à long terme de la jachère réduit la fertilité des sols et les expose à l'érosion, sans aucun gain de rendement. Le système de la monoculture, de sa part, accélère le processus de la dégradation des sols induisant une perte de la matière organique (Woźniak, 2019). Woźniak et Soroka (2018) rajoutent que la

monoculture réduit considérablement les rendements induisant une augmentation de l'incidence de quelques maladies fongiques et de certains ravageurs, ainsi qu'un fort salissement en mauvaises herbes. L'éradication de ces agents pathogènes nécessite une utilisation intensive de pesticides ce qui augmente considérablement les coûts de production (Mal *et al.*, 2015 ; Mehmeti *et al.*, 2018). Ces problèmes ont poussé les scientifiques à penser à des alternatives plus durables, notamment les systèmes d'agriculture biologique et d'agriculture de conservation.

2. Agriculture de conservation

2.1. Définition

La FAO (2021) définit l'agriculture de conservation (AC) comme un système de culture durable qui est basé sur trois principes :

1. Une réduction permanente de la perturbation du sol : par l'utilisation des outils à dents sans retournement ou la suppression complète du travail du sol en réalisant le semis avec des semoirs adaptés directement sur un sol non travaillé ;
2. Un couvert végétal permanent : en utilisant des plantes de couverture comme couvert vivant, ou en maintenant les racines et les résidus des cultures précédentes sur le sol, ou encore, par la distribution de résidus provenant de sources *ex situ* sur la parcelle. La surface couverte doit être supérieure à 30 % ;
3. Une diversification des cultures : avec l'introduction des espèces comme les fourrages et les légumineuses dans des rotations longues et diversifiées.

Ces trois principes doivent être tous réunis afin de pouvoir parler de l'AC. Le semis direct ne peut être considéré sous l'élan de l'agriculture de conservation, que s'il est associé avec un couvert végétal permanent et une rotation de cultures, de même un couvert végétal inférieur à 30 % ou une monoculture des céréales ne peuvent aussi représenter le concept de l'AC (Kassam *et al.*, 2019).

L'agriculture de conservation associée avec d'autres bonnes pratiques agricoles, notamment l'utilisation de semences de qualité et la gestion raisonnée des fertilisants, des mauvaises herbes et de l'eau, constitue une base pour la durabilité de la production agricole (Friedrich *et al.*, 2017). L'adoption de l'agriculture de conservation est devenue de plus en plus répandue dans le monde, et actuellement ce système est présent dans les quatre coins du globe et dans plus de 78 pays, sur une surface de 180 millions d'hectare, ce qui représente 12,5 % des terres cultivées (Kassam *et al.*, 2019).

1.2. Historique

Le travail du sol conçu essentiellement pour ameublir le sol, préparer un bon lit de semences pour une bonne germination, contrôler les mauvaises herbes et emmagasiner l'eau (Hobbs *et al.*, 2008) a commencé à être remis en question depuis les années 1930, lorsque de vastes terres ont été rasées par l'érosion aux USA à cause du travail du sol intensif (Friedrich *et al.*, 2017). Depuis, la réduction du travail du sol a commencé à prendre de l'ampleur, mais le concept de l'agriculture de conservation n'a vu le jour qu'à partir des années 1940, où le semis direct est devenu possible avec le développement de semoirs adaptés et l'avènement des herbicides modernes tels que le 2,4-D et le Paraquat (Derpsch, 1998 ; Derpsch, 2008). Des essais de démonstration ont débuté aux USA au début des années 1960, puis en Amérique latine en 1970 (Derpsch, 2008 ; Farooq et Siddique, 2015), mais il a fallu une vingtaine d'année pour que l'AC atteigne des niveaux d'adoption significatifs aux Amériques et ailleurs. Au cours de cette période, les équipements agricoles et les pratiques agronomiques dans les systèmes sans labour ont été améliorés et développés afin d'optimiser les performances des cultures.

Au début des années 1990, l'adoption de l'AC s'est accélérée et a atteint les cinq continents (Farooq et Siddique, 2015). La superficie totale des terres cultivées sous AC en 2004/05 a été estimée à près de 95 M ha (Hobbs *et al.*, 2008). En 2008/09, elle a dépassé les 100 M ha (Kassam *et al.*, 2009), et dans les deux ans suivants, plus de 40 M ha ont été aménagés selon les principes de l'AC où plus de 145 M ha ont été sous ce système en 2010/11 (Kassam *et al.*, 2014). A l'heure actuelle, la surface occupée par le système d'agriculture de conservation dans le monde est estimée à plus de 180 M ha, ce qui représente 12,5 % de l'ensemble des terres cultivées (Kassam *et al.*, 2019).

Malgré son succès dans plusieurs pays qui présentent un climat sec Méditerranéen notamment les USA, l'Australie, l'Argentine, l'Afrique du sud et d'autres, l'ampleur de l'adoption de l'AC dans les pays méditerranéens reste modeste. L'Espagne étant le leader avec une superficie de 900 000 ha. Dans la rive sud de la méditerranée, notamment au Maghreb, la Tunisie occupe la première place avec 12 000 ha conduits sous AC jusqu'en 2016, le Maroc vient après avec une superficie de 10 000 ha, alors que l'Algérie représente la plus faible vitesse d'adoption, où uniquement 5 600 ha sont sous le système d'AC dans le pays selon les dernières données de la FAO (Kassam *et al.*, 2019).

3. Agriculture conventionnelle vs agriculture de conservation

3.1. Sur la préservation des sols

Le sol est une composante principale des agroécosystèmes, sa dégradation et sa perte par érosion est un danger majeur qui menace la production agricole dans le monde. Les effets négatifs de l'érosion ne sont pas à débattre ; la perte de l'eau et des nutriments, la pollution des eaux souterraines, la contribution aux changements climatiques et à la baisse de la production agricole sont les plus préoccupants (Durán et Pleguezuelo, 2008). ESDAC (2019) estime que le taux de perte des sols par érosion dans le monde arrive jusqu'à 43 G t an⁻¹, l'action de l'homme étant la cause principale. Des pratiques agricoles telles que le travail du sol intensif, la destruction des résidus des cultures, la jachère sont parmi les causes principales de l'aggravation de ce phénomène.

L'agriculture de conservation, notamment les techniques de non-labour (travail minimum et semis direct) et la couverture végétale contribuent efficacement à la préservation de cette ressource naturelle. Plusieurs études ont démontré l'effet positif des techniques de travail réduit du sol (Seitz *et al.*, 2019 ; Klik et Rosner, 2020) et du couvert végétal (Durán *et al.*, 2007) sur l'infiltration de l'eau et la réduction de son ruissellement en surface, ce qui réduit énormément l'érosion hydrique. Selon Durán et Pleguezuelo (2008) et Carlesso *et al.* (2011), le maintien permanent des racines des cultures et la couverture végétale des terres affectent grandement l'infiltration de l'eau, et ont une influence importante sur l'interception des gouttes de pluie réduisant fortement les pertes du sol dues aux fortes précipitations et aux pluies parfois erratiques. Cet effet est beaucoup plus important au début de la campagne lorsque les pluies sont fréquentes et la culture est peu développée (De Almeida *et al.*, 2018). Seitz *et al.* (2019) affirment que le travail minimum du sol associé avec un couvert végétal suffisant réduit jusqu'à 82 % du sol perdu par érosion par rapport à un sol labouré, ce qui représente une baisse du taux de l'érosion d'environ 4,17 t ha⁻¹ h⁻¹.

3.2. Sur la qualité des sols

Les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, sont étroitement liées et déterminent la qualité du sol et sa performance. Le rôle et l'importance de la qualité du sol pour un développement agricole durable dans des conditions de protection de l'environnement suscitent une attention particulière (Bai *et al.*, 2018). La nécessité de réduire l'impact environnemental des activités agricoles et de contrôler la dégradation de la structure du sol est l'un des principaux objectifs des nouveaux systèmes de culture (Pagliai *et al.*, 2004), qui doivent assurer une utilisation rationnelle et une gestion adéquate du sol afin d'améliorer sa qualité et augmenter son potentiel productif (Aziz *et al.*, 2013). Le

système d'agriculture de conservation par ses trois principes affecte d'une manière significative toutes les propriétés du sol (physiques, chimiques et biologiques) (Thomas *et al.*, 2007).

3.2.1. Qualité physique

Les plantes cultivées ont besoin d'un milieu favorable pour leur développement, pour cela le système racinaire doit évoluer dans un sol présentant des propriétés physicomécaniques qui répondent aux exigences agro-techniques de la culture mise en place (Amara *et al.*, 2014). D'après Keller *et al.* (2007), un sol a une " bonne " qualité physique lorsqu'il est friable, ne produit pas de mottes au labour, ne forme pas de croûte de battance, lorsqu'il est facilement pénétrable par les racines des plantes et perméable à l'eau. La qualité structurale d'un sol est mesurée donc par la stabilité des agrégats, la conductivité hydraulique, la taille et la forme des pores et la résistance à la pénétration (Pagliai *et al.*, 2004). Ces paramètres sont généralement liés entre eux, et affectent significativement le développement des cultures.

Le travail conventionnel du sol et le travail de conservation (travail minimum et semis direct) affectent différemment la structure du sol, et présentent chacun des avantages et des inconvénients. La plupart des études menées sur l'effet des types du travail du sol sur sa qualité physique rapportent un effet positif du travail minimum et du semis direct sur la réduction de la dispersion des agrégats grâce à une amélioration des teneurs en matière organique (Pagliai *et al.*, 2004; Aziz *et al.*, 2013; Bai *et al.*, 2018). Par contre, la densité apparente liée à la taille et à la distribution des pores est plus discutée. Certaines études ont rapporté une densité apparente plus faible due à une meilleure porosité dans un sol non labouré (Mazzoncini *et al.*, 2016 ; De Cárcer *et al.*, 2019). Ainsi, Pagliai *et al.*, (2004) qui ont étudié la taille et la distribution des pores dans les différents systèmes de travail du sol ont trouvé que les micropores ($< 50 \mu\text{m}$) dits de stockage et les macropores ($>50 \mu\text{m}$) dits de transport sont plus abondants et mieux répartis avec un travail minimum du sol par rapport à un labour traditionnel (figure 1). Par contre, dans un sol plus lourd, Bescansa *et al.* (2006) et López-Bellido *et al.* (2020) notent une plus grande densité apparente sous semis direct par rapport au TC en raison d'une compaction du sol par le passage répétitif des engins. Dans les horizons de profondeur, les outils utilisés dans le labour favorisent la formation d'une croûte de battance en profondeur limitant l'infiltration de l'eau et engendrant des inondations lors de fortes précipitations (Pagliai *et al.*, 2004).

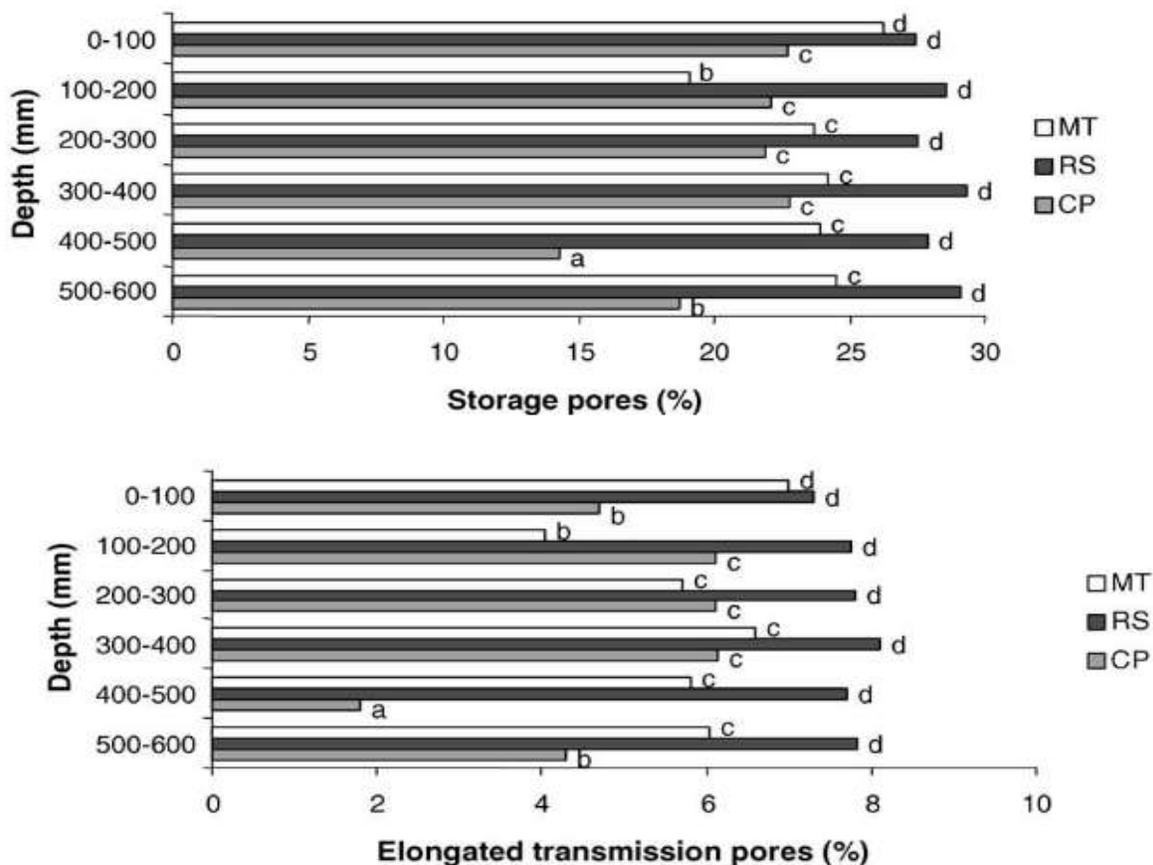


Figure 1 : Effet des techniques culturales sur la distribution des micro et macropores dans le profil du sol (0-600 mm) (Pagliai *et al.*, 2004). MT : Travail minimum, RS : Défencement en sous-sol, CP : Travail conventionnel avec une charue.

La variabilité des résultats cités est due essentiellement à la texture du sol, où il s'est avéré que le compactage des sols sous semis direct est plus observé dans les sols lourds, alors que dans les sols légers une meilleure aération est obtenue par le travail réduit du sol. Le climat et les conditions de préparation du sol affectent la qualité du sol obtenue avec le labour. Keller *et al.* (2007), précise que le labour d'un sol très humide ou très sec provoque la formation de grosses mottes difficiles à détruire, ce qui peut endommager la structure du sol travaillé dans de telles conditions.

3.2.2. Qualité biologique

Les bactéries, les champignons, les protozoaires, ainsi que les vers de terres sont des organismes qui doivent être protégés et favorisés dans les sols agricoles (Verstraete et Mertens, 2005). Ces organismes responsables de la minéralisation des nutriments organiques nécessaires à la croissance

et au développement des plantes sont menacés et non favorisés par les itinéraires techniques pratiqués dans de nombreuses régions dans le monde (Kaurin *et al.*, 2015). Le système d'agriculture de conservation est l'un des outils qui contribuent efficacement à la préservation et au développement des êtres vivants dans les sols agricoles. Peigné *et al.*, (2009) et Bai *et al.* (2018) affirment qu'une augmentation significative des populations de vers de terre est obtenue avec un travail réduit du sol ou avec le semis direct par rapport à un labour conventionnel. Bai *et al.* (2018) rajoutent que les rotations des cultures ont eu, de même, un effet significatif sur le développement des vers de terre dans des essais de longues durées conduits en Europe et en Chine. Woźniak (2019) a constaté qu'une rotation pois-blé dur améliore significativement (31 %) le nombre de vers de terre par rapport à une monoculture des céréales.

L'AC joue un rôle important aussi dans le développement des microorganismes du sol, tels que les champignons et les bactéries. L'abondance et la diversité des champignons et des bactéries sont favorisées par le semis direct par rapport au travail conventionnel et par une rotation maïs-soja par rapport à une monoculture de maïs trouvent Sun *et al.* (2016). La masse microbienne est plus importante lorsque le semis direct est associé avec une bonne gestion des résidus des cultures (Dong *et al.*, 2009). Kaurin *et al.* (2015) ont mesuré la masse microbienne à travers l'ADN contenu dans le sol et affirment qu'un travail minimum du sol a augmenté d'une manière significative la masse des bactéries, des champignons et des archaebactéries dans la surface du sol (0-10 cm), par rapport à un travail conventionnel avec une charrue. Cette abondance des microorganismes dans les premiers centimètres du sol est due essentiellement à une amélioration de l'aération et de l'accumulation de C dans les horizons de surface dans les sols non perturbés (Dong *et al.*, 2009; Shi *et al.*, 2013; Kaurin *et al.*, 2015; Sun *et al.*, 2016).

La non perturbation du sol protège les hyphes des mycorhizes et favorise leur développement (Miller *et al.*, 1995), alors que le labour réduit la densité des spores et la longueur des hyphes de ces champignons bénéfiques (Wright *et al.* 1999). De même, un bon choix des successions culturales dans un système d'AC permet un meilleur développement de ce type de champignons (Mozafar *et al.*, 2000). Les densités des spores et d'hyphes sont généralement plus faibles dans les sols nus ou dans les sols plantés avec des cultures non mycorhiziennes telles que le colza, que dans les sols cultivés avec des espèces mycorhiziennes (Jansa *et al.*, 2006). Un grand groupe de plantes telles que le maïs, le blé, la pomme de terre et certaines légumineuses sont considérées comme des plantes hôtes pour ces champignons (Jansa *et al.*, 2006). Les céréales, en particulier le maïs, forment avec leurs racines des

réseaux très développés avec les hyphes des mycorhizes (Mozafar *et al.*, 2000 ; Jansa *et al.*, 2006). Alvey *et al.* (2001), trouvent que la colonisation des racines de sorgho par les mycorhizes augmente d'environ 15 % lorsqu'il est conduit après une légumineuse (*Vigna*), que lorsqu'il est conduit en monoculture. D'autres champignons bénéfiques dans le sol tel que les basidiomycètes qui sécrètent de nombreuses substances et enzymes qui assurent la dégradation de la matière organique et la disponibilité des éléments aux plantes cultivées sont favorisés par le système d'agriculture de conservation (Caesar-tonthat et Sainju, 2011). Ces auteurs trouvent que le semis direct favorise le développement des basidiomycètes par rapport à un travail conventionnel et que le sol couvert avec des résidus d'une culture de blé permet un meilleur développement de ce type de champignons par rapport aux résidus d'une culture de lentille.

3.2.3. Qualité chimique

3.2.3.1. Matière organique

Dans la région méditerranéenne, les sols sont caractérisés par de faibles taux de carbone et de matière organique, ce qui est dû selon Hernánz *et al.* (2009) à : i) une minéralisation rapide à cause des températures élevées durant la période humide, ii) une production insuffisante de résidus induite par de longues périodes de sécheresse, et iii) un faible taux de restitution à cause des mauvaises pratiques agricoles telles que l'enfouissement des résidus de cultures en profondeur avec le labour, la jachère et le pâturage. Une augmentation du C organique est notée après l'adoption du système d'agriculture de conservation, notamment dans les deux rives de la méditerranée (Bessam et Mrabet, 2003; Hernánz *et al.*, 2009 ; De Sanctis *et al.*, 2012 ; Lopez-Bellido *et al.*, 2017; Acar *et al.*, 2018 ; López-Bellido *et al.*, 2020). Cette accumulation de C par les sols non-travaillés est beaucoup plus marquée dans les horizons de surface (Hernánz *et al.*, 2009 ; Bescansa *et al.* 2006 ; Zikeli *et al.*, 2013 ; De Sanctis *et al.*, 2012 ; Peigné *et al.*, 2018). La stratification du carbone organique en surface est considérée comme étant un indicateur de la fertilité des sols, car elle est essentielle pour la fixation du sol et la réduction de l'érosion.

Les rotations de cultures, à leur tour, jouent un grand rôle dans l'augmentation du taux de carbone dans le sol. Ainsi, une rotation céréales-oléagineuse (tournesol) a donné une meilleure accumulation de C dans un essai de 20 ans au sud de l'Espagne (López-Bellido *et al.*, 2020). De même, Hernánz *et al.* (2009) ont noté des teneurs en C organique plus importantes dans une rotation de blé avec des légumineuses (vesce et pois) par rapport à une monoculture de blé et une rotation blé-jachère. Sun *et al.* (2016) ont eu les mêmes résultats avec une rotation maïs-soja par rapport à une monoculture

de maïs. Dans leur méta-analyse, Bai *et al.* (2018) affirment que les rotations de cultures ont significativement contribué à l'augmentation de la matière organique dans 30 essais de longue durée conduits en Europe et en Chine. Sun *et al.* (2016) et López-Bellido *et al.* (2020) rajoutent que cette accumulation de la matière organique est beaucoup plus importante lorsque la rotation est conduite sous semis direct.

L'AC par son principe de couverture permanente du sol permet une protection plus efficace de la matière organique réduisant les pertes de carbone dans l'air grâce à un refroidissement du sol et par conséquent, un ralentissement du processus de minéralisation. Aziz *et al.* (2013), notent une diminution d'environ 16 % de C perdu sous forme de gaz après 5 ans d'adoption de l'AC aux USA. De plus, Dong *et al.* (2009) ; Lopez-Bellido *et al.* (2017) et Wang *et al.* (2020) affirment que le travail réduit du sol associé avec un couvert végétal suffisant réduit énormément l'émission des gaz à effet de serre, notamment le CO₂ et le N₂O considérés comme un des effets négatifs majeurs de l'agriculture sur l'environnement. La FAO (2001), affirme que l'agriculture est responsable de 30 % des émissions de gaz à effet de serre dans la planète.

Les avantages de l'adoption de l'AC sur le stockage de carbone dans le sol ne peuvent être aperçus qu'après plusieurs années de son adoption. Cependant, à court terme, ces avantages ne sont pas aussi évidents. Des essais ont montré que les taux de C et de matière organique ne varient pas durant les premières années de transition (De vita *et al.*, 2007 ; Ben moussa-Machraoui *et al.*, 2010 ; Colecchia *et al.*, 2015). Cette période diffère selon la qualité du couvert végétal, l'intensité de travail du sol (TM ou SD) ou encore la texture du sol. Hernánz *et al.* (2009) ont commencé à constater une accumulation de C dans le système d'agriculture de conservation après 6 ans de son adoption dans un sol sablo-limoneux en Espagne, alors que De Cárcer *et al.*, (2019) n'ont constaté un début d'évolution de C sous AC qu'après 10 ans d'expérimentation dans un sol plus lourd et froid en Suisse. Dans les régions méditerranéennes, les systèmes de culture associés généralement avec l'élevage et la quantité insuffisante de résidus produits sous climat semi-aride peuvent ralentir encore plus l'accumulation du C organique (Ben moussa-Machraoui *et al.*, 2010).

3.2.3.1. Eléments nutritifs

L'application des engrais chimiques sur un sol labouré permet leur incorporation par les opérations de reprise de labour le long du profil cultural. Cependant, avec le système de semis direct, l'incorporation mécanique des engrais dans la couche du sol travaillée n'est pas possible et les éléments nécessaires pour le développement des cultures sont donc déposés en surface de même que les résidus

de cultures (Dick, 1983). Par conséquent, une stratification des éléments apportés dans les premiers centimètres du sol est notée sur les systèmes de travail du sol de conservation. Par contre, le travail conventionnel du sol permet d'avoir une distribution plus homogène de ces éléments en profondeur (Ben moussa-Machraoui *et al.*, 2010 ; Zikeli *et al.*, 2013; Kaurin *et al.*, 2015; Peigné *et al.*, 2018).

Des études comparant les systèmes de travail de conservation par rapport au travail conventionnel du sol trouvent que la concentration en certains éléments augmente dans les sols non travaillés. Ben Moussa-Machraoui *et al.* (2010) ont trouvé une augmentation significative des éléments majeurs (N, P, K) dans la couche 0-20 cm dans un système de semis direct dans les conditions méditerranéennes quelle que soit la culture pratiquée (blé dur, orge, pois ou avoine). Redel *et al.* (2007) et Piegholdt *et al.* (2013) trouvent que le phosphore sous ses différentes formes (totale, organique et assimilable) augmente avec un travail minimum du sol. Une stratification de cet élément peu mobile est notée dans la couche 0-5 cm du sol ce qui le rend plus accessible aux cultures (Baan *et al.*, 2009, Piegholdt *et al.*, 2013). Cependant, cette stratification dans les couches de surface augmente le risque de sa perte dans les eaux de ruissellement. Par ailleurs, certains auteurs ont trouvé des teneurs en P inférieures dans le système de semis direct par rapport au travail conventionnel dans des conditions humides (Tiessen *et al.*, 2010; De Cárcer *et al.*, 2019). Lopez-Bellido *et al.* (2000) ; Ruisi *et al.* (2016) et Ercoli *et al.* (2017) ont trouvé que les teneurs en azote diminuent aussi avec un travail réduit du sol ou avec un semis direct par rapport à un labour conventionnel. Ces mêmes auteurs affirment que la faible disponibilité en N dans le système de semis direct est due d'une part à son application superficielle et d'autre part à la lenteur du processus de minéralisation suite à la baisse de la température dans les sols non travaillés.

La diversification des cultures affecte positivement la disponibilité des nutriments dans le sol. Une monoculture et une rotation céréales-jachère sur le long terme provoquent un épuisement du sol et nécessitent des doses plus importantes d'engrais pour avoir de bons niveaux de rendement (Selles *et al.*, 1999). Il est connu que les légumineuses sont des plantes fixatrices d'azote et leur incorporation dans la rotation améliore significativement la teneur du sol en N. Dans un système de non-labour, Caesar-tonthat et Sainju (2011) trouvent qu'une rotation de blé avec une culture de lentille augmente significativement la teneur en N par rapport à une monoculture de blé ou une rotation blé-jachère. Les mêmes remarques ont été constatées par Ercoli *et al.* (2017) avec une rotation blé-luzerne. Les cultures dites mycorhizables, notamment, certaines céréales comme le blé, l'avoine et le maïs peuvent améliorer le potentiel d'inoculation des champignons mycorhiziens et l'activité des phosphatases de leurs racines.

Cela favorise l'hydrolyse du P organique et affecte positivement la disponibilité du P par rapport à une jachère ou une rotation avec des plantes non mycorhiziennes telles que le colza ou le lupin blanc (Miller, 2000 ; Borie *et al.*, 2002 ; Grant *et al.*, 2005 ; Jansa *et al.*, 2006 ; Redel *et al.*, 2007).

3.3. Sur la nutrition minérale des cultures

Pour garantir une production maximale de matière sèche, le système d'agriculture conventionnelle s'est basé sur l'apport annuel d'engrais chimiques, dont certains sont issus de l'exploitation des ressources limitées telles que les roches phosphatées (Cordell et White, 2013). Cependant, ces apports sont souvent perdus par lessivage, lixiviation ou par blocage. Les systèmes de cultures alternatifs, notamment, l'agriculture de conservation repose sur la réduction des apports chimiques et l'amélioration biologique de la disponibilité de ces éléments : (i) en favorisant la restitution de la matière organique via le maintien des résidus de cultures ; (ii) en assurant la fixation biologique de certains éléments tels que le N via l'introduction des légumineuses dans les rotations et (iii) en favorisant la solubilisation des éléments bloqués tel que le P via l'amélioration de l'activité biologique suite à la non perturbation du sol.

Miller *et al.* (1995) rapportent que des concentrations en P dans les plantes de blé et de maïs sont plus importantes avec un travail réduit du sol. Les mêmes remarques ont été faites par Mozafar *et al.* (2000) qui trouvent que pour ces deux cultures, le non labour améliore significativement les teneurs en P, K et en oligo-éléments. Cela est attribué, selon ces auteurs, au développement des hyphes des champignons mycorhiziens suite à la non perturbation du sol. Cet effet positif des systèmes de non labour sur le prélèvement du P par les cultures est aussi observé par Mazzoncini *et al.* (2008), qui notent que tout au long de leur essai de longue durée (10 ans), la teneur en P dans les différentes parties des cultures de blé dur et de soja est significativement augmentée par le système de semis direct. Par contre, une variabilité dans les résultats est observée par différents auteurs pour l'effet des systèmes de travail du sol sur le prélèvement de N par les cultures (Lopez-Bellido *et al.*, 2000; Ruisi *et al.*, 2012; Amato *et al.*, 2013; Pagnani *et al.*, 2019; Souissi *et al.*, 2020). La concentration du grain de blé en N dépend plus des rendements obtenus que du type de travail du sol affirment Mazzoncini *et al.* (2008) qui trouvent que durant les années où le semis direct produit plus de biomasse (années sèches), la concentration en N dans le grain diminue à cause du phénomène de dilution, par contre durant les années humides, le grain issu du TC contient moins d'azote.

Certaines plantes telles que les légumineuses sont capables d'améliorer le prélèvement de certains éléments tels que le P et le N par les cultures leurs succédant dans la rotation. Le prélèvement de N par une culture de maïs s'est doublé après des cultures de niébé (*Vigna unguiculata*) et d'arachide (*Arachis hypogea*) (Bado *et al.*, 2006). Dans une expérimentation menée en pots, Mat Hassan *et al.* (2013) trouvent que la concentration des plantes de blé en P et en N est significativement améliorée lorsque le blé est semé dans des pots occupés précédemment par des légumineuses (fève, pois chiche et lupin blanc) par rapport au blé semé dans des pots non semés auparavant. Les mêmes auteurs précisent que la concentration en P et en N est plus importante lorsque des résidus des précédents mentionnés sont rajoutés aux pots. Cependant, la nutrition minérale semble ne pas être affectée par la monoculture de blé, De Cárcer *et al.* (2019) ont trouvé des concentrations en N, P et K supérieures dans une monoculture de blé par rapport à une rotation colza-maïs-blé. De même, Ercoli *et al.* (2017) ont observé que la teneur en N dans le grain de blé conduit en monoculture est statistiquement similaire à celle obtenue par une rotation luzerne-blé.

3.4. Sur la production agricole

3.4.1. La culture de blé dur

a. Rendement

Le blé dur est l'une des cultures les plus importantes dans le monde, particulièrement, dans la région méditerranéenne où le climat est un facteur déterminant dans les rendements obtenus. Plusieurs études menées dans les pays méditerranéens ont démontré que, durant les années sèches, les rendements de la culture de blé dur obtenus avec un travail réduit du sol où avec le semis direct sont significativement supérieurs à ceux obtenus par le travail conventionnel. Par contre, dans les années humides le labour donne des rendements significativement meilleurs (López-Bellido *et al.* 1998 ; López-Bellido *et al.*, 2000 ; De Vita *et al.*, 2007 ; Mazzoncini *et al.*, 2008 ; Ruisi *et al.*, 2014 ; Colecchia *et al.*, 2015 ; Ali *et al.*, 2019 ; Souissi *et al.*, 2020). De Vita *et al.* (2007) précisent que dans les conditions méditerranéennes, une étroite relation existe entre le rendement obtenu dans chacun des systèmes de travail du sol et la pluviométrie enregistrée durant le cycle de la culture et notent qu'au-delà de 300 mm de pluie, le travail conventionnel donne des rendements supérieurs par rapport au non labour et vice-versa. La supériorité des rendements obtenus par le système de semis direct est attribuée à une meilleure rétention de l'eau (De Vita *et al.*, 2007), ce qui permet une sénescence tardive des feuilles et un meilleur remplissage du grain. Plusieurs auteurs trouvent un poids de mille grains significativement supérieur avec le semis direct par rapport au travail conventionnel du sol dans les

conditions de sécheresse (De Vita *et al.*, 2007; Taner *et al.*, 2015). Cependant, la supériorité des rendements de blé dur obtenus par le labour conventionnel est attribuée à une meilleure levée et une meilleure densité des plantes au mètre carré grâce aux bonnes conditions de germination (bon lit de semences et meilleure disponibilité des éléments) (Lopez-Bellido *et al.*, 2000 ; Mazzoncini *et al.*, 2008 ; Colecchia *et al.*, 2015). Par conséquent, Colecchia *et al.* (2015) suggèrent une augmentation de la dose de semis dans le système de semis direct pour remplacer les pertes dues à la non couverture de la semence dans les sols non-travaillés. Lopez-Bellido *et al.* (2000) et Ruisi *et al.* (2014) proposent d'augmenter les doses de N appliquées dans les systèmes de non labour et Mazzoncini *et al.* (2008) conseillent des semis précoces pour éviter les fortes pluies au début de cycle qui interfèrent avec une bonne germination des graines et la perte des éléments par ruissèlement dans les sols non travaillés qui sont généralement pauvrement drainés.

L'amélioration des rendements de blé dur nécessitent aussi le choix des rotations correctes. Il est connu que le blé cultivé en monoculture produit moins que le blé conduit après une culture de légumineuses ou de fourrage (Woźniak *et al.*, 2014). Lopez-Bellido *et al.* (2000) et Amato *et al.* (2013) ont trouvé que les rendements de blé dur sont significativement meilleurs sous semis direct avec une rotation fève-blé par rapport à une monoculture de blé. Les mêmes remarques ont été faites par Woźniak *et al.* (2014) avec une rotation pois-blé et Souissi *et al.* (2020) avec la rotation vesce-blé. Les rotations des cultures peuvent réduire significativement les effets négatifs de la suppression de l'opération de labour. Ercoli *et al.* (2017), trouvent que le travail minimum du sol affecte négativement le rendement du blé conduit en monoculture, alors qu'il donne les mêmes niveaux de rendement que le travail conventionnel lorsque le blé est conduit après une culture de maïs ou de tournesol. Ceci est dû à une réduction de la concurrence des mauvaises herbes et des spores des champignons responsables de la transmission des maladies des céréales. Woźniak (2019) trouve qu'une rotation triennale pois-blé dur-triticales réduit fortement la pression des mauvaises herbes en réduisant leur matière sèche de 75 %, et leur nombre de 57,1 % par rapport à la monoculture des céréales triticales-blé tendre-blé dur. De même, Anken *et al.* (2006) ont noté une réduction de l'incidence des maladies fongiques sous semis direct avec une rotation colza-blé.

b. Qualité de la graine

Actuellement, les marchés mondiaux de blé ont de fortes exigences par rapport à la qualité de la graine de blé commercialisé. Une teneur en protéines supérieure à 12,5 %, un poids spécifique supérieur à 80 kg hl⁻¹ et un taux de mitadinage inférieur à 30 % sont de plus en plus recherchés (De

Vita *et al.*, 2007; Sieber *et al.*, 2015). Quoique tous les auteurs se rejoignent quant à l'effet positif de la rotation légumineuses-blé sur la teneur en protéines de la graine de blé dur (Amato *et al.*, 2013; Pagnani *et al.*, 2019; Souissi *et al.*, 2020), différents résultats ont été obtenus en comparant les différents systèmes de travail du sol. Sur un essai de 17 ans, Amato *et al.* (2013) trouvent que les systèmes de travail du sol n'affectent pas significativement la teneur en protéines du grain de blé dur conduit en monoculture. Pagnani *et al.* (2019) trouvent des teneurs en protéines significativement meilleures lorsque la rotation fève-blé est conduite avec le système de semis direct.

La qualité de la graine est fortement affectée par l'interaction climat-travail du sol (Colecchia *et al.*, 2015). Dans les conditions humides, Woźniak *et al.* (2014) trouvent que la teneur en protéines et le taux de vitrosité sont significativement améliorés par le système de semis direct et encore plus par la combinaison semis direct-précédent pois, par contre, le travail conventionnel donne un poids spécifique significativement meilleur. Cependant, dans des conditions de sécheresse, le poids de mille grains et le poids spécifiques sont significativement améliorés par le système de non labour par rapport au travail conventionnel, particulièrement, lorsque le stress hydrique intervient au stade de remplissage du grain, ce qui est dû à une meilleure capacité de rétention de l'eau dans ce système (De vita *et al.*, 2007 ; Colecchia *et al.*, 2015, Taner *et al.*, 2015).

3.4.2. Les autres cultures

Le système d'agriculture de conservation a généralement un effet négatif sur les rendements des cultures, particulièrement, durant les premières années de transition. Une amélioration commence à être constatée après 3 à 5 années grâce à l'amélioration de l'état structural du sol cultivé (Anken *et al.*, 2006). La difficulté de la gestion des mauvaises herbes, la forte incidence des maladies et la faible disponibilité de N sont les causes principales de la baisse des rendements obtenus par rapport au système conventionnel (López-Bellido *et al.*, 2000 ; Kong *et al.*, 2009 ; Ercoli *et al.*, 2017 ; Peigné *et al.*, 2018). Cependant, selon les conditions climatiques et le type de culture, différentes observations sont faites par les chercheurs (Mozafar *et al.*, 2000 ; Mazzoncini *et al.* 2008 ; Ruisi *et al.* 2012). A cause d'une forte infestation en mauvaises herbes (51 % plus important sous semis direct par rapport au travail conventionnel), Mazzoncini *et al.* (2008) ont obtenus des rendements de soja significativement inférieurs dans le système de non labour sur les 10 ans de leur expérimentation. Les cultures de blé tendre et de colza ont été négativement affecté par le système de non labour à cause du faible drainage dans un sol lourd et froid en Suisse, alors que le maïs qui est une culture d'été a donné les mêmes niveaux de rendement que le travail conventionnel dans les mêmes conditions (Mozafar *et*

al., 2000). Dans les conditions méditerranéennes, Ruisi *et al.* (2012) trouvent que les rendements des légumineuses les plus cultivées dans la région (fève, pois, pois chiche et lentille) ne sont pas affectés par le système de travail du sol dans des conditions suffisamment humides. Cependant, en conditions de sécheresse, le pois et le pois chiche produisent un nombre de gousses significativement plus important sous semis direct, et par conséquent des rendements meilleurs.

Chapitre II : Matériel et méthodes

1. Localisation de l'essai

L'essai a été réalisé au niveau de la ferme privée « OULD HOCINE » située dans la région d'El-Hachimia à 21 km du chef-lieu de la wilaya de Bouira à une latitude de $36^{\circ} 14' 21''$ Nord, une longitude de $3^{\circ} 50' 23''$ Est et à une altitude de 713 m au-dessus du niveau de la mer.



Source : Google-maps, 2020

Figure 2 : Image satellitaire montrant la localisation géographique du site expérimental.

2. Caractéristiques édapho-climatiques du site expérimental

2.1. Caractéristiques édaphiques

Le sol dans le site expérimental est profond et fin, ses caractéristiques avant l'installation de l'essai à une profondeur de 0-30 cm sont résumées dans le tableau 1 ci-dessous. Les analyses du sol ont été réalisées par un laboratoire appartenant à la firme « Profert » Annaba.

Tableau 1 : Caractéristiques du sol à 30 cm de profondeur avant l'installation de l'essai.

Caractéristiques du sol		Valeur à 0-30 cm
Physiques	Argile (%)	54
	Limon (%)	28
	Sable grossier et fin (%)	16
Chimiques	PH (eau)	7,7
	C.E (mS/m)	0,15
	Matière Organique (%)	1,9
	Carbone Organique (%)	1,1
	Calcaire actif (%)	4
	Azote Total (%)	**
	P ₂ O ₅ assimilable (ppm)	30

Les résultats du tableau 1 ci-dessus montrent que le sol est d'une texture argileuse selon l'interprétation de Henin *et al.*, (1969). Le pH_{eau} est alcalin (7,7). Le taux de matière organique est faible (1,9 %) (Anne, 1945). Selon Allaire et Angers (2011), le sol est faiblement pourvu en phosphore assimilable (30 ppm). Le taux de calcaire actif est moyennement élevé (4 %) et la salinité est faible.

2.2. Caractéristiques climatiques

Le climat de la région est méditerranéen caractérisé par une grande variation intra et interannuelle de la pluviométrie. Les données météorologiques sur 30 ans (1990-2020) de la station météorologiques d'Ain Bessam appartenant à l'office national météorologique (ONM), située à 1 km du site expérimental montrent que la pluviométrie moyenne dans la région est de l'ordre de 479 mm an⁻¹, 70 % de ces précipitations sont enregistrées pendant la période allant du mois de novembre jusqu'au mois d'avril.

La température minimale moyenne mensuelle sur cette période est de 4 °C enregistrée aux mois de janvier et février et la température moyenne mensuelle maximale est enregistrée au mois de juillet avec 35 °C. La température moyenne de l'année étant de 17 °C (tableau 2). L'humidité de l'air est maximale pendant l'hiver (≥ 70 %), alors qu'en été elle est inférieure à 50 %. Les principales caractéristiques climatiques de la région sur 30 ans et durant les trois campagnes de l'étude sont montrées dans les tableaux 2 et 3 respectivement.

Tableau 2: Données climatiques moyennes de la région d'étude durant la période de 1990-2020.

Mois	P (mm)	T min (°C)	T max (°C)	T moy. (°C)	H%	Vent (m/s)	Ensol. (h)
Janvier	67,62	3,99	12,11	7,98	72,00	3,45	5,68
Février	50,28	4,13	13,26	8,17	70,55	3,71	6,21
Mars	51,38	6,13	16,73	11,38	67,48	3,84	7,24
Avril	49,59	8,04	19,29	13,88	62,76	3,99	8,33
Mai	41,14	11,90	24,34	18,42	56,52	3,39	9,39
Juin	13,69	16,21	30,37	23,69	46,97	3,61	11,43
Juillet	4,14	19,47	34,50	27,52	39,34	3,40	11,40
Aout	10,21	19,60	34,09	27,24	42,97	3,49	10,67
Septembre	34,48	16,27	28,78	22,36	56,55	3,39	8,60
Octobre	41,79	13,16	23,63	18,23	60,90	3,50	7,57
Novembre	57,14	8,09	16,72	12,25	70,28	3,77	6,91
Décembre	57,45	5,00	12,98	8,91	74,14	3,39	5,24
moyenne	478,90*	11,00	22,24	16,67	60,04	3,58	8,24

*cumul pluviométrique

ONM, 2020.

Tableau 3 : conditions climatiques des trois campagnes d'expérimentation (2018-2020).

Mois	2017-2018			2018-2019			2019-2020		
	P (mm)	T° min	T° max	P (mm)	T° min	T° max	P (mm)	T° min	T° max
Novembre	87	7,3	18,6	84	8,1	16,4	97	8,0	15,0
Décembre	55	5,2	13,3	66	5,7	15,7	37	7,3	15,2
Janvier	23	5,0	13,9	121	2,7	10,7	37	4,6	13,2
Février	33	2,8	11,6	20	3,5	13,8	0	6,8	19,1
Mars	99	6,8	14,8	41	6,4	16,9	70	7,7	17,0
Avril	131	9,0	19,2	32	8,3	19,1	69	10,1	20,3
Mai	60	10,5	21,2	26	10,5	23,3	30	13,9	27,6
juin	4	14,6	29,1	15	18	33,5	6	16,0	31,1
Total	492			405			346		

ONM, 2020.

3. Dispositif expérimental

L'étude a été réalisée durant les trois campagnes 2017-2018, 2018-2019 et 2019-2020, sur un essai de moyenne durée ayant débuté en 2015. Le dispositif expérimental est un split-plot avec deux facteurs étudiés, trois techniques de travail du sol : travail conventionnel (TC), travail minimum (TM) et semis direct (SD) situées en sous-blocs et quatre précédents culturaux : blé, jachère, lentille et avoine fourrage situés en parcelles élémentaires.

Le bloc est répété trois fois donnant 36 parcelles mesurant 60 m de longueur et 10 m de largeur, la distance entre les micro-parcelles est de 2 m et entre les blocs de 6 m afin de permettre le passage et la rotation des tracteurs effectuant les différentes opérations culturales.

Il faut signaler que durant les années 2017-2018 et 2019-2020 seuls les systèmes de travail du sol sont comparés, car le blé dur était présent uniquement sur les parcelles de la monoculture. Le dispositif expérimental est réduit alors et devient un dispositif en blocs aléatoires complets.

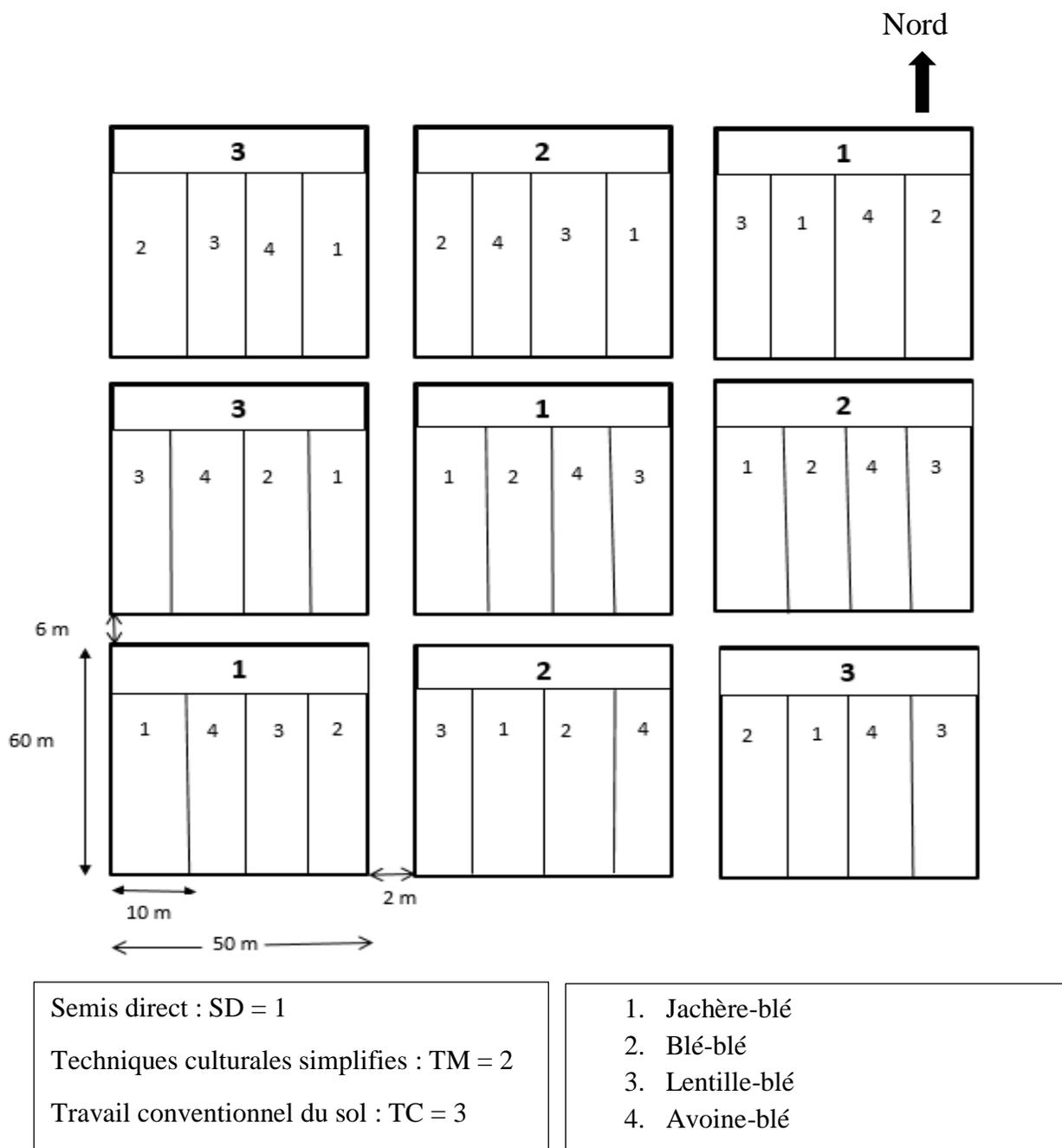


Figure 3: Schéma représentatif du dispositif expérimental

4. Conduite de l'essai

4.1. Matériel végétal utilisé

La variété Simeto étant la plus cultivée dans la région est utilisée dans cette étude. La semence de catégorie G4 est récupérée chaque année au niveau de la CCLS de la wilaya de Bouira. Les principales caractéristiques de la variété sont données dans le tableau 4 ci-dessous.

Tableau 4: Principales caractéristiques de la variété de blé dur Simeto.

Caractéristiques agronomiques	Caractères morphologiques	Caractéristiques technologiques
<ul style="list-style-type: none"> • Cycle végétatif : semi-précoce • Capacité de tallage : fort • Résiste à la fusariose • Sensible à la sécheresse. 	<ul style="list-style-type: none"> • Epi demi-lâche • Faiblement coloré (blanchâtre) • Paille moyenne (90 à 100 cm) • Grain demi-allongé 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualité semoulière très bonne • Bonne résistance au mitadinage • Teneur en protéines 15,80 %

CNCC, 2015

4.2. Travail du sol

4.2.1. Travail conventionnel (TC)

Un labour profond à l'aide d'une charrue bisocs est effectué à la mi-novembre pour les campagnes 2017-2018 et 2018-2019 et au début du mois de décembre pour la campagne 2019-2020. La reprise de labour est effectuée à la fin du mois de novembre pour les campagnes 2017-2018 et 2018-2019 et à la mi-décembre pour la campagne 2019-2020, sous forme d'un double passage de cover-crop traîné 12/24. Pour ameublir d'avantage le sol avant le semis, un passage d'une herse combinée à un rouleau cage est effectué le 4-01-2018 pour la campagne 2017-2018, le 04-12-2018 pour la campagne 2018-2019 et le 16-12-2019 pour la campagne 2019-2020 (annexes, page 162).

Durant l'année 2018-2019, pour les parcelles ayant la jachère travaillée comme précédent cultural, l'opération du labour a été effectuée le 06-04-2018, la reprise du labour est effectuée le 16-05-2018, avant la maturité des graines des adventices. Le passage de la herse combinée avec le rouleau cage est effectué en même temps que les autres parcelles, le 04-12-2018 juste avant l'opération de semis.

4.2.2. Travail minimum (TM)

Pour les parcelles destinées à ce système, il n'y avait pas de retournement de la terre et seuls les outils à dents sont utilisés. Un double passage d'un cultivateur à dents pattes d'oies est réalisé à la mi-novembre pour les campagnes 2017-2018 et 2018-2019 et au début du mois de décembre pour la campagne 2019-2020, à une profondeur allant de 5 à 7 cm. Des façons superficielles qui consistent en un passage d'une herse combinée à un rouleau cage sont effectuées le 4-01-2018 pour la campagne 2017-2018, le 04-12-2018 pour la campagne 2018-2019 et le 16-12-2019 pour la campagne 2019-2020 (annexes, page 163).

Pour les parcelles ayant la jachère travaillée comme précédent cultural durant la campagne 2018-2019, le premier passage du cultivateur à dents est réalisé le 06-04-2018 pour détruire les adventices levées, et le deuxième passage est réalisé le 16-05-2018 avant la floraison de la flore qui s'est développée. Le passage de la herse combinée au rouleau cage est effectué le 04-12-2018 avec les autres parcelles avant le semis.

4.2.3. Semis direct (SD)

Les parcelles destinées au système de semis direct n'ont reçu aucune opération de travail du sol avant le semis.

Pour les parcelles ayant la jachère chimique comme précédent cultural durant la campagne 2018-2019, un désherbage total a été effectué au stade floraison des plantes adventices par le glyphosate à une dose de 2 l ha⁻¹, le 5-4-2018.

4.3. Semis

L'opération de semis est effectuée le 04-01-2018, le 12-12-2018 et le 17-12-2019 pour les campagnes 2017-2018, 2018-2019 et 2019-2020 respectivement, à une profondeur de 4 cm. La dose de semis est de 180 kg ha⁻¹. Le semoir utilisé pour semer les parcelles travaillées avec les systèmes de TC et de TM durant les trois campagnes de l'étude est un semoir combiné de type GASPARDO SC. MARIA, avec une largeur de 3 m et un espacement entre les lignes de 14,3 cm, comptant 22 lignes de semis. Pour les parcelles de SD, le semis est réalisé directement sur les résidus de la culture précédente avec un semoir adapté. Pour la campagne 2017-2018, le semoir utilisé est un semoir combiné de marque John Chearer dont l'espacement entre les lignes est de 23 cm, et pour les campagnes 2018-2019 et 2019-2020, le semoir utilisé est de marque SOLA SD-1203 dont l'écartement entre les lignes est de 18 cm et qui n'est pas combiné (les semoirs utilisés sont montrés dans les annexes, page 164).

4.5. Fertilisation

Un apport de 60 kg de phosphore sous forme de MAP (12-52-0) à une dose de 120 kg ha⁻¹ est effectué chaque année au moment du semis, cet apport fournit aussi 14 kg d'azote pour la culture de blé dur au démarrage. Au stade 3 feuilles, 100 kg ha⁻¹ d'urée (46 % N) sont rajoutés, fournissant environ 46 kg d'azote sous forme ammoniacale.

L'épandage de l'engrais azoté a été réalisé à l'aide d'un épandeur d'engrais centrifuge (KUHN) avec une capacité d'épandage de 24 m de largeur. L'engrais phosphaté est apporté avec le semoir lorsque ce dernier est combiné durant les deux premières campagnes et en utilisant l'épandeur d'engrais lorsque le semoir direct n'est pas combiné. A la troisième campagne (2019-2020) le phosphore est apporté avec l'épandeur d'engrais pour toutes les parcelles.

4.6. Désherbage

Pour les parcelles de SD, l'opération de désherbage avant le semis est essentielle, par conséquent, un désherbage total est effectué chaque année avant le semis avec un herbicide total du nom Ridasate dont la matière active est le glyphosate, la dose étant de 2 l ha⁻¹.

Au cours du cycle de la culture, plusieurs adventices monocotylédones (phalaris, folle avoine, brome ...) et dicotylédones (gaillet, centaurée, coquelicot, moutarde des champs...) apparaissent, pour cela un désherbage post-levée est effectué. Les produits herbicides utilisés à chacune des trois campagnes, ainsi que leurs matières actives et leurs doses d'application sont présentés dans le tableau 5 ci-dessous.

Tableau 5: liste des herbicides utilisés pour le désherbage des parcelles de l'essai des systèmes de culture durant les trois campagnes de l'étude.

Année	Produit	Type	Matière active	Dose d'application
2017-2018	Granstar 75 DF	Anti-dico	Tribuneron-methyl	12 g ha ⁻¹
2018-2019	Sekator Topik	Anti-dico Anti-mono	l'iodosulfuron-methyl-sodium + amidosulfuron + mefenpyr-diethyl Clodinafop-propargyl + Cloquintocet-mexyl + propanoicacidpropynyl ester	150 ml ha ⁻¹ 1 L ha ⁻¹
2019-2020	Olympus-flex	Double action	Mesosulfuron-methyl+ Propoxycarbazone-sodium+ Mefenpyr-Deithyl	0.33 g ha ⁻¹

4.7. Traitements phytosanitaires

Les conditions humides qui ont caractérisé les campagnes 2017-2018 et 2018-2019 ont favorisé le développement de plusieurs maladies fongiques (la rouille brune, l'helminthosporiose et le piétin-échaudage) et de certains ravageurs (pucerons, criocères...). Pour y faire face, un mélange de fongicide et d'insecticide a été appliqué dès l'apparition des premiers symptômes ou foyers. La liste des produits fongicides et insecticides utilisés durant les deux premières campagnes, ainsi que leurs matières actives et leurs doses d'application sont présentés dans le tableau 6 ci-dessous.

Tableau 6 : Liste des produits phytosanitaires utilisés pour le traitement des parcelles de l'essai des systèmes de culture durant les trois campagnes de l'étude.

Année	Produit	Type	Matière active	Dose d'application
2017-2018	Propivat	Fongicide	Propiconazole	0,5 l ha ⁻¹
	Judoka	Insecticide	Lambda-Cyhalothrine	250 ml ha ⁻¹
2018-2019	Acanto	Fongicide	Picoxystrobine + Cyproconazole	0,5 l ha ⁻¹
	Judoka	Insecticide	Lambda-Cyhalothrine	250 ml ha ⁻¹

NB : Durant la campagne 2019-2020, le suivi de la culture a été interrompu dès le mois de Mars (stade tallage de la culture) jusqu'à la récolte en raison des conditions sanitaires liées à la pandémie de COVID19. Par conséquent, aucun traitement phytosanitaire n'est effectué.

4.8. Récolte

La récolte est effectuée chaque année à la maturité du grain à l'aide d'une moissonneuse batteuse dont la largeur de la barre de coupe est de 3 m. L'opération de la récolte est réalisée le 29-06-2018 pour la campagne 2017-2018, le 02-07-2019 pour la campagne 2018-2019 et le 20-06-2020 pour la campagne 2019-2020.

4.9. Gestion des résidus de culture

Les résidus de la récolte de la saison précédente coupés par la moissonneuse-batteuse à une hauteur de 30 cm sont incorporés en profondeur du sol avec le labour pour le TC, coupés et répartis de manière homogène sur la parcelle pour le TM, et laissés debout en surface pour le SD.

5. Paramètres mesurés

5.1. Paramètres de production

- **Nombre de plantes par mètre carré (NPM)**

Ce paramètre est déterminé au stade 3 à 4 feuilles en comptant le nombre de plantes levées dans cinq placettes de deux mètres linéaires de chaque parcelle élémentaire converti au mètre carré.

- **Les composantes du rendement**

Le nombre d'épis par mètre carré (NEM) est déterminé lorsque le stade épiaison est atteint, en comptant le nombre d'épis produits dans les cinq placettes de chaque parcelle élémentaire choisies préalablement, et converti au mètre carré. Le poids de mille grains (PMG) est déterminé par le comptage et la pesée de trois échantillons de 1000 grains issus de chaque parcelle élémentaire à l'aide d'un compteur de grains et d'une balance de précision. Puis le nombre de grains par épi (NGE) est

déterminé à partir du poids du grain issu de chaque placette, divisé par le nombre d'épis puis par le poids individuel d'un grain de la même placette.

- **Rendement en grain**

Le rendement en grain est obtenu directement sur le terrain, par la pesée des grains issus de la récolte d'un seul passage de la moissonneuse batteuse au milieu de la parcelle (3 m×60 m), en évitant les bordures et en choisissant une allée homogène, converti à l'hectare. La récolte se fait tard après la maturité du grain pour chaque année pour garantir un taux d'humidité d'environ 14 %.

- **Rendement en biomasse sèche**

Le rendement en biomasse sèche est déterminé deux fois, au stade floraison, puis stade maturité de la culture. Pour ce faire, trois placettes de deux mètres linéaires sont coupées à ras du sol en suivant un cheminement diagonal et pesées directement à l'aide d'une balance portative. Un sous-échantillon de chaque placette de chaque parcelle est mis à l'étuve pendant 48 heures à une température de 75 °C pour déterminer le taux de matière sèche. Le rendement en biomasse sèche de chaque parcelle est alors déterminé à partir de la moyenne des trois placettes rapporté à l'hectare. Les sous-échantillons prélevés vont servir aux analyses de P dans la plante.

- **Rendement en paille et indice de récolte**

Le rendement en paille est obtenu directement en soustrayant le rendement en grain du rendement en biomasse sèche pour chaque parcelle. L'indice de récolte est le rapport du rendement en grain par le rendement en biomasse sèche totale.

5.2. Paramètres de qualité

- **Teneur en protéines**

La concentration d'azote (N) dans le grain est déterminée par la méthode Kjeldahl sur trois échantillons de 1 g de grain broyé issu de chaque parcelle élémentaire. Puis, la teneur en protéines est calculée en multipliant la concentration en N par le facteur de pondération 5,7 et est exprimée en g kg⁻¹ de matière sèche (De vita *et al.*, 2007).

- **Poids spécifique**

Le poids spécifique ou la masse volumique a été déterminé sur trois échantillons de 250 ml à l'aide d'une balance « Pesagrano » et exprimé en kg hl⁻¹.

- **Taux de vitrosité**

L'aspect vitreux des grains a été déterminé sur trois échantillons de 100 grains de chaque parcelle à l'aide d'un farinatome de Pohl, et est exprimé en pourcentage.

NB : les paramètres de poids spécifique et du taux de vitrosité sont mesurés uniquement durant les années 2018-2019 et 2019-2020.

5.3. Paramètres liés à la nutrition phosphatée

- **Teneurs en P dans les tissus végétaux**

La concentration en P est déterminée sur la partie aérienne de la plante au stade floraison et sur le grain et la paille séparément au stade maturité. Les sous-échantillons prélevés de chacune des trois placettes de chaque parcelle élémentaire séchés et broyés sont passés aux analyses de P. La digestion a été faite par un mélange d'acide chlorhydrique et d'acide nitrique, puis la concentration en P a été déterminée par colorimétrie en utilisant la méthode vanado-molybdique et exprimée en grammes par kilogramme de matière sèche (g kg^{-1}).

- **Prélèvement de P par la culture**

Le prélèvement total de P par la plante, à chacun des deux stades, a été déterminé en multipliant le rendement en biomasse sèche de la partie de la plante analysée par sa concentration en P respective et exprimé en kg ha^{-1} . Le prélèvement total au stade maturité est déterminé en sommant les quantités de P exportées par le grain et par la paille.

- **Teneur en P et pH dans la couche 0-10 cm du sol**

Chaque année avant le semis, dix carottes de sol sont prélevées à une profondeur de 0-10 cm selon un cheminement en zigzag dans chaque parcelle élémentaire. Les dix prélèvements sont mélangés pour former un seul échantillon. L'échantillon séché et tamisé est ensuite soumis à l'analyse du P (méthode Olsen) et de pH. Les analyses du sol sont faites chaque année par un laboratoire appartenant à la firme « Fertial » d'Annaba.

6. Analyses statistiques

Afin de comparer l'effet du travail du sol et de l'année sur la monoculture de blé durant les trois années de l'étude, une analyse de la variance pluriannuelle est effectuée, le travail du sol et l'année étant des facteurs étudiés et le bloc est un facteur contrôlé. Afin d'avoir plus de détails sur la variation des paramètres mesurés dans chaque année individuellement, une ANOVA à deux critères de classification est réalisé pour chaque année séparément (le travail du sol comme facteur étudié et le bloc comme facteur contrôlé). Le test de la plus petite différence significative (ppds) de Fisher est effectué lorsque l'analyse de la variance révèle un effet significatif.

Pour déterminer l'effet des systèmes de travail du sol et des rotations des cultures sur la production, la qualité du grain et la nutrition phosphatée de la culture de blé dur pendant l'année 2018-

2019, et sur la teneur en P assimilable et le pH du sol à chacune des trois années de l'étude séparément, une analyse de la variance à trois critères de classification a été réalisée (le système de travail du sol et les rotations de cultures comme facteurs étudiés et le bloc comme facteur contrôlé). Le test de la plus petite différence significative de Fisher (ppds) est effectué lorsque l'analyse de la variance révèle un effet significatif.

Chapitre III : Résultats et discussion

1. Effet des systèmes de travail du sol sur la production de la culture de blé dur conduite en monoculture durant les trois années de l'étude

1.1. Effet du travail du sol sur le rendement et ses composantes

La comparaison des systèmes de travail du sol réalisée chaque année individuellement, à l'aide d'une analyse de la variance à un facteur a montré des effets significatifs du type de travail sol sur le rendement en grain ($P < 0,01$) et le nombre d'épis par mètre carré ($P < 0,05$), uniquement durant l'année 2019-2020 caractérisée par une pluviométrie très faible. Durant cette année, le SD a donné un rendement en grain significativement meilleur que ceux obtenus par les deux autres systèmes (17,23 q ha⁻¹ par le SD par rapport à 11,64 et 8,97 q ha⁻¹ obtenus par le TC et le TM respectivement). Ceci est dû à un nombre d'épis par mètre carré significativement supérieur sous SD (318,93 ; 225,06 et 215,20 par le SD, TM et le TC respectivement) (tableau 7, figure 4). L'analyse des corrélations a fait sortir une liaison hautement significative ($r = 0,78^{**}$) entre le nombre d'épis par mètre carré et le rendement en grain durant cette dernière année (2019-2020). La droite de régression (figure 6) montre qu'environ 60 % de la variation du rendement est due à la variation du nombre d'épis par mètre carré, le coefficient de détermination $R^2 = 0,61$. Selon Gawęda et Haliniarz (2021), la corrélation entre le rendement en grain et le nombre d'épis par mètre carré ainsi qu'avec le nombre et la taille des grains est plus forte sous le système de SD par rapport au travail conventionnel.

Des coefficients de variation de 8,93 % pour le rendement en grain, 13,02 % pour le nombre de grains par épi, 5,23 % pour le poids de mille grains et 16,07 % pour le nombre d'épis par mètre carré sont obtenus durant l'année 2017-2018. Durant l'année 2018-2019, des coefficients de variation faibles sont obtenus pour les composantes du rendement (4,66 % pour le nombre d'épis par mètre carré, 5,92 % pour le nombre de grains par épi et 8,83 % pour le poids de mille grains), alors que le rendement en grain a présenté une plus grande variation (17,78 %). Durant l'année 2019-2020, les coefficients de variation obtenus sont assez importants pour tous les paramètres (12,97 % pour le rendement en grain, 14,19 % pour le nombre d'épis par mètre carré, 20,28 % pour le nombre de grains par épi), à l'exception du poids de mille grains qui a enregistré un coefficient de variation faible de 2,89 %. Les résultats détaillés de l'analyse de la variance du rendement et de ses composantes pour chaque année sont donnés dans les tableaux 1,3 et 5 de l'annexe I.

L'analyse de la variance sur l'ensemble des trois années de l'étude montre que le type de travail du sol n'a aucun effet sur le rendement et ses composantes, alors que, les conditions de l'année ont eu un effet significatif sur tous les paramètres étudiés. L'année 2017-2018, étant la plus favorable en termes de quantité (350 mm) et de répartition des pluies au cours du cycle de la plante,

particulièrement aux stades floraison et remplissage du grain (131 mm et 60 mm de précipitation en mois d'Avril et Mai respectivement) a donné les meilleurs indices pour tous les paramètres du rendement, sauf pour le nombre de grains par épis. Cependant, l'année 2019-2020, qui était sèche (249 mm de pluie durant le cycle de la plante), a enregistré les indices les plus faibles. L'année 2018-2019, caractérisée par une quantité de pluie assez importante (321 mm), mais qui est abondante au début du cycle de la plante (66 mm en décembre et 121 mm en mois de janvier) et déficiente aux stades critiques de la floraison et de remplissage du grain (32 mm et 26 mm au mois d'Avril et Mai respectivement), a enregistré des moyennes intermédiaires pour le rendement en grain et le poids de mille grains, des moyennes similaires à celles de l'année sèche de 2019-2020 pour le nombre d'épis au mètre carré, et un nombre de grains par épi significativement supérieur à ceux obtenus durant les deux autres années. Les moyennes de tous les paramètres obtenues par les trois systèmes de travail du sol dans chaque année sont données dans le tableau 7, et leurs représentations graphiques sont montrées dans les histogrammes de la figure 4. Les coefficients de variation sont statistiquement acceptables pour la plupart des paramètres étudiés (tableau 7).

L'interaction entre le système de travail du sol et l'année s'est montrée significative pour le rendement en grain, le nombre d'épis/m² et le nombre de grains/épi, mais pas pour le poids de mille grains. Lorsque les conditions climatiques sont favorables (l'année 2018), les systèmes de travail du sol ont donné des rendements statistiquement similaires. Par contre, lorsque les conditions climatiques sont moins favorables (année 2019), le semis direct s'est distingué par un rendement supérieur à ceux obtenus par les deux autres techniques (22,78, 17,30 et 16,99 q ha⁻¹ par le SD, le TC et le TM respectivement). Durant l'année sèche (2020), le TM et le TC ont donné les plus mauvais rendements (11,64 et 8,99 q ha⁻¹ par le TC et le TM respectivement), alors que le SD a donné un rendement similaire à ceux obtenus par le TC et le TM durant l'année intermédiaire de 2019 (17,21 q ha⁻¹) (tableau 7). Le nombre d'épis produits au mètre carré est maximal avec le TM et le TC durant l'année favorable (2018), et réduit à sa moitié durant l'année défavorable (2020). Par contre le SD a donné un nombre d'épis assez important durant l'année 2020 grâce à un meilleur tallage, appréciable et stable durant les années 2018 et 2019. La fertilité des fleurs a été sévèrement affectée par le stress thermique enregistré au moment de la floraison en 2020, ce qui a affecté le nombre de grains issu de chaque épi obtenu par tous les types de travail du sol. L'année 2019 a été la plus favorable pour la floraison. Durant cette année, le TM et le TC ont donné un nombre de grains supérieur à celui de SD. Par contre, durant l'année pluvieuse de 2018, le SD a enregistré un nombre de grains par épi meilleur que ceux

obtenus par le TM et le TC (tableau 7). Les résultats détaillés de l'analyse pluriannuelle sur le rendement en grain et ses composantes sont donnés dans le tableau 7 de l'annexe II.

Tableau 7 : Moyennes du rendement et de ses composantes obtenues par les trois systèmes de travail du sol durant les trois campagnes de l'étude.

Année	Travail du sol			Moyennes
	SD	TM	TC	
Rendement en grain (q ha ⁻¹)				
2017-2018	36,49	40,64	40,39	39,17 ^a
2018-2019	22,78	16,99	17,30	19,02 ^b
2019-2020	17,21 ^A	8,99 ^B	11,64 ^B	12,61 ^c
Moyennes	25,49	22,21	23,11	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = ns , Année = 3,04, TS×Année = 5,27 CV % = 12,55				
NEM				
2017-2018	291,33	445,00	391,67	376,00 ^a
2018-2019	243,47	229,19	237,35	236,67 ^b
2019-2020	318,93 ^A	225,07 ^B	215,20 ^B	253,07 ^b
Moyennes	284,58	299,75	281,41	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = ns , Année = 42,20, TS×Année = 73,09 CV % = 14,24				
NGE				
2017-2018	39,00	27,71	28,89	31,87 ^b
2018-2019	37,26	44,39	40,07	40,57 ^a
2019-2020	18,36	19,34	22,63	20,11 ^c
Moyennes	31,54	30,48	30,53	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = ns , Année = 3,73, TS×Année = 6,46 CV % = 11,79				
PMG (g)				
2017-2018	49,83	44,65	45,61	46,70 ^a
2018-2019	45,29	44,08	42,01	43,79 ^b
2019-2020	39,44	39,39	38,30	39,04 ^c
Moyennes	44,85	42,71	41,97	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = ns , Année = 2,80, TS×Année = ns CV % = 6,30				

NB : TS = travail du sol, SD = semis direct, TM = travail minimum, TC = travail conventionnel, NEM = nombre d'épis par mètre carré, NGE = nombre de grains par épi, PMG = poids de mille grains, ns = non significatif à P<0,05. Les lettres en minuscule représentent l'effet de l'année et les lettres en majuscule représentent l'effet du travail du sol.

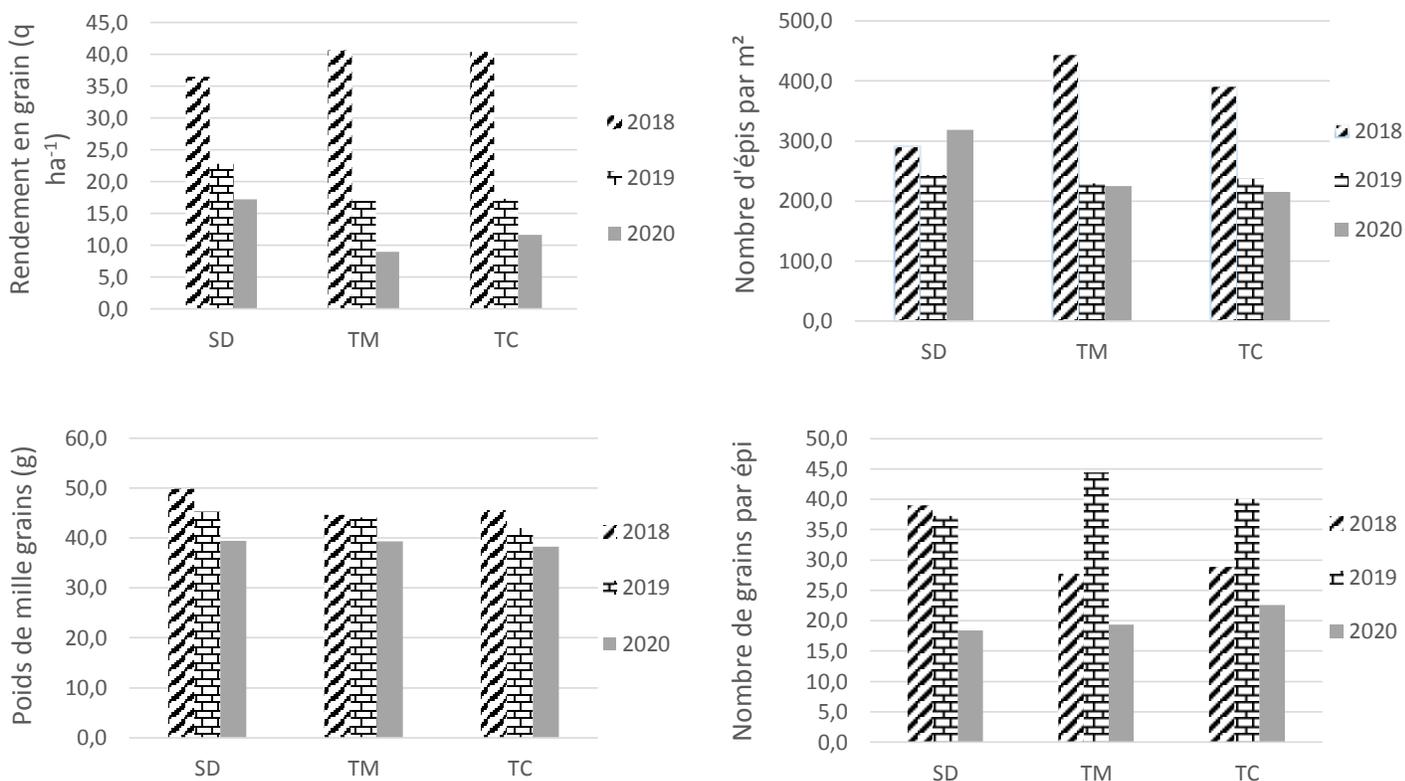


Figure 4 : Effet des systèmes de travail du sol sur le rendement et ses composantes durant les trois années de l'étude.

1.2. Effet de système du travail du sol sur le nombre de plantes par mètre carré, le rendement en biomasse sèche, le rendement en paille et l'indice de récolte

La comparaison des systèmes de travail du sol sur le rendement en biomasse sèche et en paille, l'indice de récolte et le nombre de plants par mètre carré pour chaque année de l'étude a montré des effets significatifs du type de travail du sol sur le nombre de plantes par mètre carré ($P < 0,01$) durant l'année 2017-2018 ; sur le rendement en paille ($P < 0,05$) et l'indice de récolte ($P < 0,05$) durant l'année 2018-2019 et sur le rendement en biomasse sèche ($P < 0,05$) durant l'année 2019-2020. La comparaison des moyennes des paramètres pour lesquels l'analyse de la variance a révélé des effets significatifs montre qu'à la première année (2017-2018), le TM et le TC ont montré une supériorité du nombre de plantes produites par mètre carré (403,26 et 370,63 par le TM et le TC respectivement) par rapport au système de SD (198,99 plantes produites au mètre carré) sans pour autant qu'il y est un effet sur les le nombre d'épis par mètre carré ou sur le rendement en grain et en biomasse sèche totale. Ceci est dû au phénomène de compensation, où le SD a pu avoir de meilleurs indices pour le paramètre nombre de grains par épi (la différence n'étant pas significative) et le nombre de talles (les résultats de nombre de ne sont pas montrés dans ce document). Une corrélation négative est obtenue entre le nombre de

plantes par mètre carré et le nombre d'épis par mètre carré d'une part et le nombre de grains par épi, d'autre part. Les coefficients de corrélation sont de $r = -0,85^{***}$ et $r = -0,71^{**}$ respectivement (figure 7 et 8), ce qui signifie que lorsque la densité de plantes est faible, la concurrence est moindre et la plante produira plus de grains. A la deuxième année (2018-2019), le TM et le TC ont eu une production en paille plus importante que le semis direct (58,22 ; 51,32 et 31,48 q ha⁻¹ par le TC, le TM et le SD respectivement). Cela a entraîné une augmentation de l'indice de récolte dans le système de SD par rapport aux deux autres techniques (0,43 pour le SD par rapport à 0,23 et 0,25 obtenus par le TC et le TM respectivement), l'indice de récolte étant corrélé positivement avec le rendement en grain ($r = 0,71^*$) et négativement avec les rendements en biomasse sèche ($r = -0,75^*$) et en paille ($r = -0,90^{***}$). Durant l'année sèche de 2019-2020, le SD s'est montré significativement supérieur aux deux autres techniques pour le rendement en biomasse sèche (69,06 q ha⁻¹ par le SD par rapport à 49,22 et 47,11 q ha⁻¹ obtenus par le TC et le TM respectivement). L'analyse des corrélations durant cette année a fait ressortir une forte liaison entre la production en matière sèche et le prélèvement total du P par la culture ($r = 0,88^{***}$) d'un côté, et avec le nombre d'épis par mètre carré ($r = 0,83^{***}$) de l'autre côté. Ces deux derniers eux-mêmes sont fortement et positivement corrélés ($r = 0,76^{**}$) (figures 9-11). Les moyennes obtenues pour chaque paramètre et pour chaque année sont données dans le tableau 8 ci-dessous, leurs représentations graphiques sont montrées dans la figure 5.

Des coefficients de variation faibles et acceptables pour la plupart des paramètres mesurés sont enregistrés durant l'année 2017-2018 (10,63 % pour le rendement en biomasse sèche, 13,75 % pour le rendement en paille, 10,33 % pour l'indice de récolte, 10,95 % pour le nombre de plantes par mètre carré). Pour l'année 2018-2019, des coefficients de variation faibles sont obtenus pour le rendement en biomasse sèche (11,24 %), le rendement en paille (12,07 %) et le nombre de plantes par mètre carré (7,25 %), alors que le coefficient de variation de l'indice de récolte est légèrement élevé (14,94 %). Durant l'année 2019-2020, les coefficients de variation obtenus sont légèrement plus élevés pour tous les paramètres mesurés (12,27 % pour rendement en biomasse sèche, 14,15 % pour le rendement en paille, 13,13 % pour l'indice de récolte, 15,61 % pour le nombre de plantes par mètre carré). Les résultats détaillés de l'analyse de la variance de chaque année sont donnés dans les tableaux 1, 3 et 5 de l'annexe I.

L'analyse de la variance sur l'ensemble des trois années de l'étude révèle un effet significatif du type de travail du sol sur le rendement en paille ($P < 0,05$), l'indice de récolte ($P < 0,001$) et le nombre de plantes par mètre carré ($P < 0,01$). Le TM et le TC ont produit plus de paille que le SD sur les l'ensemble des trois années, cela est dû à une levée plus importante dans ces deux systèmes par rapport

au système de semis direct (258,55 plants levés par mètre carré obtenus par le système de TC, 227,86 par le TM et 195,27 par le SD). Le système de SD a par contre été plus apte à transloquer la matière sèche de la plante vers le grain grâce à un stock d'eau plus important et une sénescence tardive, engendrant un indice de récolte statistiquement supérieur sur les trois années de l'étude (0,34 pour le SD par rapport 0,26 et 0,25 pour le TC et le TM respectivement) (tableau 8 et figure 5).

Les conditions de l'année ont significativement ($P < 0,001$) affecté tous les paramètres étudiés. L'année favorable de 2017-2018 a donné les meilleures valeurs pour tous les paramètres. Alors que l'année 2019-2020 caractérisée par une sécheresse assez marquée a enregistré les valeurs les plus basses pour tous les paramètres mesurés. L'année intermédiaire de 2018-2019 a enregistré des moyennes intermédiaires pour le rendement en biomasse sèche ; des moyennes similaires à celles de l'année sèche de 2019-2020, pour le paramètre nombre de plantes par mètre carré et un indice de récolte similaire à l'année favorable de 2017-2018. Les moyennes de tous les paramètres obtenues par les différents systèmes de travail du sol au niveau de chaque année sont montrées dans le tableau 8, et leurs représentations graphiques sont montrées dans la figure 5. Les coefficients de variation obtenus sont statistiquement faibles et acceptables pour la plupart des paramètres étudiés (tableau 8).

L'interaction entre le système de travail du sol et l'année s'est montrée significative sur tous les paramètres étudiés, sauf le PMG. Le TC et le TM ont donné des rendements en biomasse sèche et en paille statistiquement meilleurs que ceux obtenus par le SD durant les années humides de 2017-2018 et 2018-2019. Par contre durant l'année sèche de 2019-2020, le SD a produit plus de matière sèche et de paille que les deux autres systèmes (tableau 8). L'indice de récolte le plus important est obtenu par le SD durant les années 2017-2018 et 2018-2019 alors que les plus faibles sont obtenus par le TC et le TM durant l'année 2019-2020. Le nombre de plantes levées par mètre carré dans les systèmes de TC et de TM est élevé en 2017-2018 lorsque les conditions climatiques sont favorables, par contre, durant l'année défavorable (2019-2020), le nombre de plantes est réduit de plus de sa moitié. Cependant pour le système de SD, le nombre de plantes levées au mètre carré est statistiquement identique et stable durant les trois années de l'essai (tableau 8). Les résultats détaillés de l'analyse de la variance pluriannuelle sont montrés dans le tableau 7 de l'annexe I.

Tableau 8 : Moyennes de rendement en biomasse sèche, en paille et de l'indice de récolte obtenues par les trois systèmes de travail du sol durant les trois campagnes de l'étude.

Année	Travail du sol			Moyennes
	SD	TM	TC	
NPM				
2017-2018	198,99 ^B	403,26 ^A	370,63 ^A	324,29 ^a
2018-2019	183,88	207,06	178,55	189,83 ^b
2019-2020	202,93	165,33	134,40	167,56 ^b
Moyennes	195,27 ^C	258,55 ^A	227,86 ^B	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = 27,40, Année = 27,40, TS×Année = 47,46 CV % = 11,74				
Rendement en biomasse sèche (q ha ⁻¹)				
2017-2018	103,85	138,25	128,34	123,48 ^a
2018-2019	54,26	68,32	75,52	66,03 ^b
2019-2020	69,06 ^A	47,11 ^B	49,22 ^B	55,13 ^c
Moyennes	75,72	84,56	84,36	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = ns, Année = 9,80, TS×Année = 16,98 CV % = 11,70				
Rendement en paille (q ha ⁻¹)				
2017-2018	67,37	97,61	87,94	84,31 ^a
2018-2019	31,48 ^B	51,32 ^A	58,22 ^A	47,01 ^b
2019-2020	51,85	38,12	37,58	42,52 ^b
Moyennes	50,23 ^B	62,35 ^A	61,25 ^A	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = 8,44 , Année = 8,44, TS×Année = 14,62 CV % = 14,19				
Indice de récolte				
2017-2018	0,35	0,29	0,32	0,32 ^a
2018-2019	0,43 ^A	0,25 ^B	0,23 ^B	0,30 ^a
2019-2020	0,25	0,19	0,24	0,23 ^b
Moyennes	0,34 ^A	0,25 ^B	0,26 ^B	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = 0,04 , Année = 0,04, TS×Année = 0,07 CV % = 12,93				

NB : TS = travail du sol, SD = semis direct, TM = travail minimum, TC= travail conventionnel, NPM = nombre de plantes par mètre carré, ns = non significatif à $P < 0,05$. Les lettres en minuscule représentent l'effet de l'année et les lettres en majuscule représentent l'effet du travail du sol.

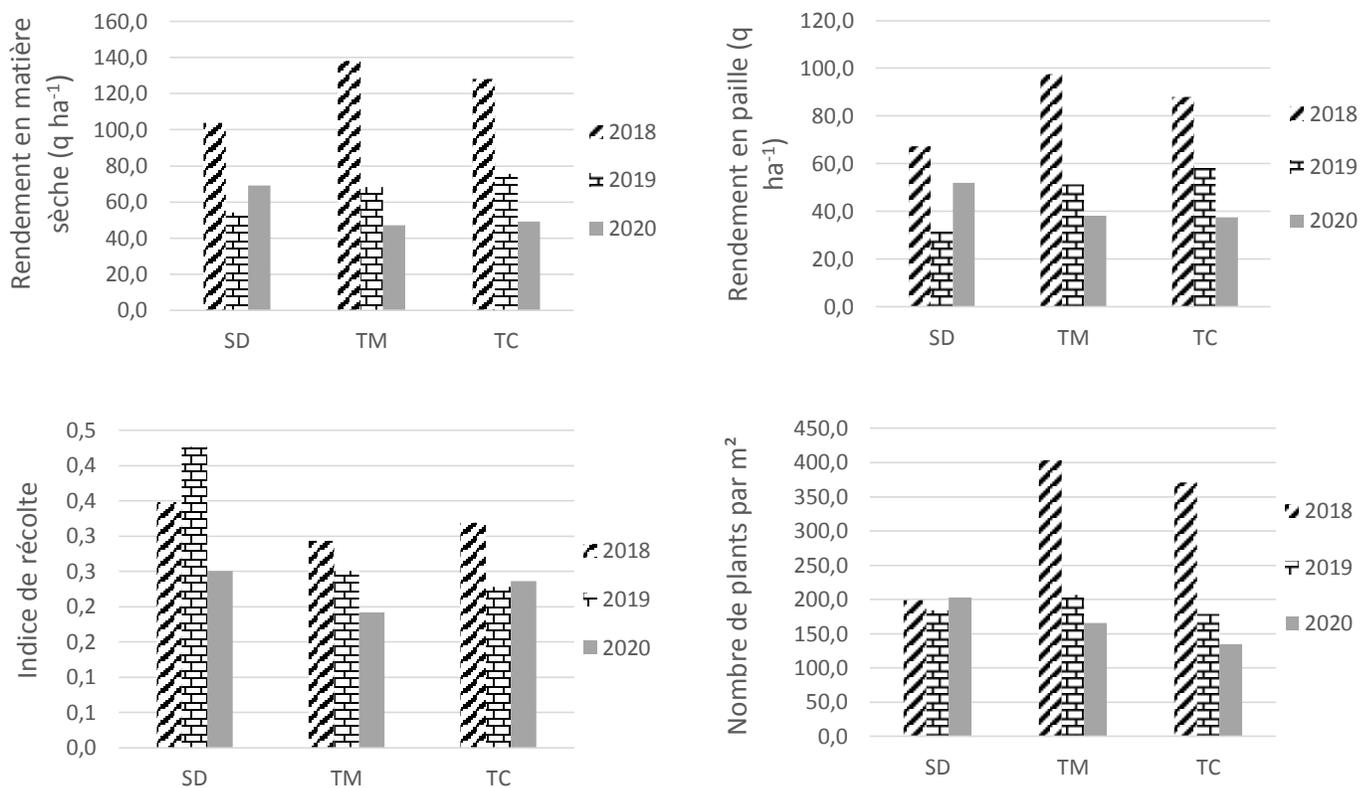


Figure 5 : Effet des systèmes de travail du sol sur le nombre de plantes par mètre carré, le rendement en matière sèche et en paille et l'indice de récolte durant les trois années de l'étude.

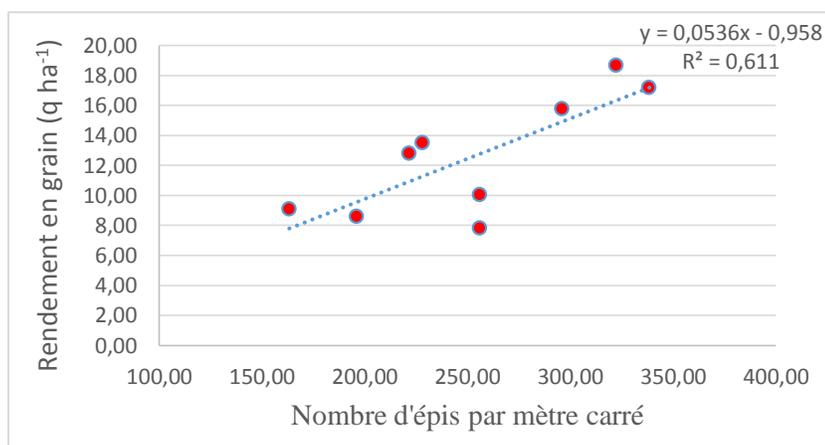


Figure 6 : Relation entre le nombre d'épis par mètre carré et le rendement en grain durant l'année 2019-2020.

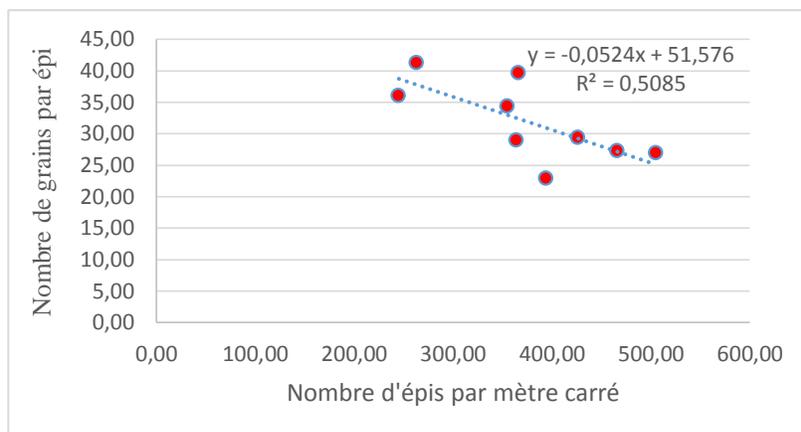


Figure 7 : Relation entre le nombre d'épis par mètre carré et le nombre de grains par épi durant l'année 2017-2018.

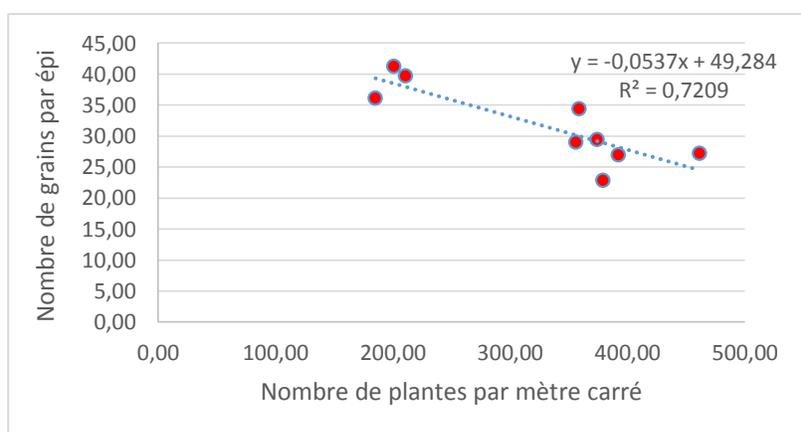


Figure 8 : Relation entre le nombre de plantes par mètre carré et le nombre de grains par épi durant l'année 2017-2018.

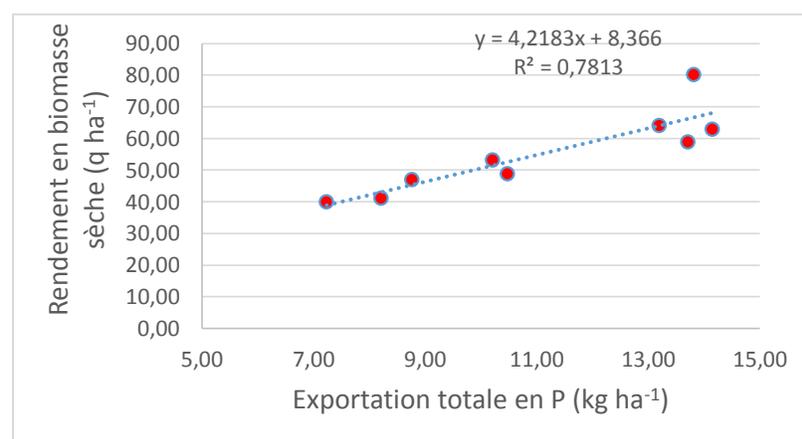


Figure 9 : Relation entre le rendement en biomasse sèche et l'exportation totale en P durant l'année 2019-2020.

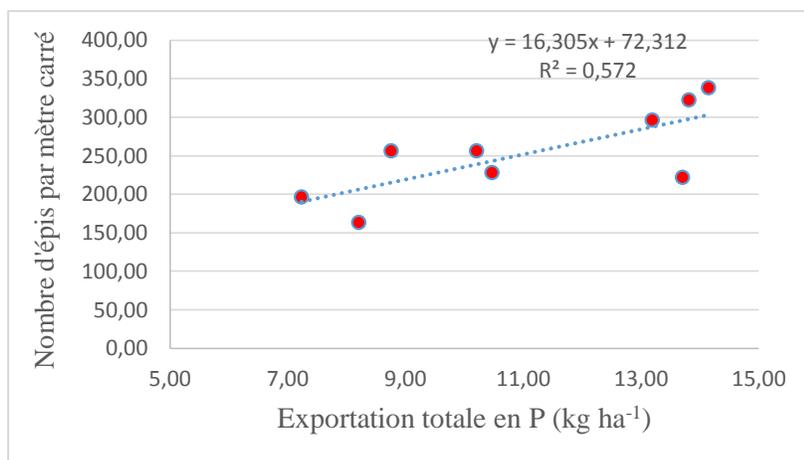


Figure 10: Relation entre le nombre d'épis par mètre carré et l'exportation totale du P durant l'année 2019-2020.

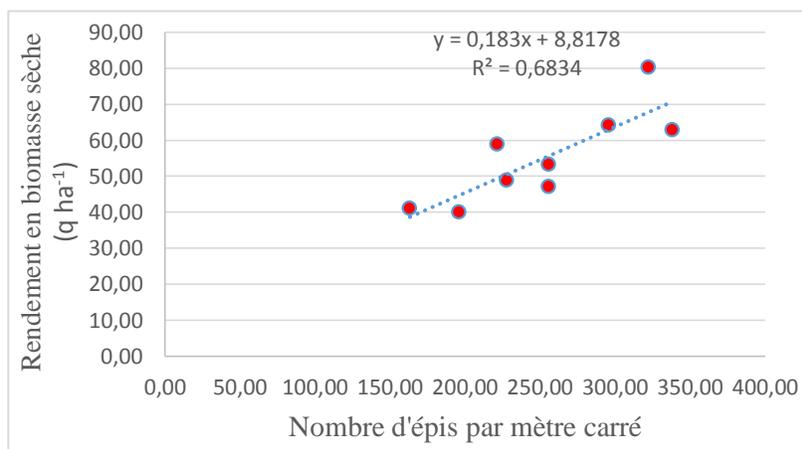


Figure 11: Relation entre le nombre d'épis par mètre carré et le rendement en biomasse sèche durant l'année 2019-2020.

2. Effet des systèmes de travail du sol sur la qualité du grain de la culture de blé dur conduite en monoculture

L'analyse de la variance individuelle sur chaque année révèle que le travail du sol n'avait pas d'effet sur les caractères qualitatifs du grain de blé dur à l'exception de l'année 2018-2019, où seul le caractère taux de vitrosité a été affecté ($P < 0,01$). Le TC a favorisé le mitadinage du grain donnant un taux de vitrosité de 83,83 %, les systèmes de non labour ont, par contre, donné des pourcentages de vitrosité significativement meilleur (96,5% et 95,67% par le SD et le TM respectivement). Les moyennes obtenues par chacun des types de travail du sol au niveau de chaque année sont données dans le tableau 9 ci-dessous et leurs représentations graphiques sont montrées dans la figure 12 ci-dessous. Nos résultats montrent qu'il y a une relation entre le poids du grain et sa teneur en protéine.

La teneur en protéines du grain est négativement corrélée avec le poids spécifique (PS) durant l'année 2018-2019 ($r = -0,82^{***}$) (figure 13) et avec le poids de mille grains (PMG) durant l'année 2019-2020 ($r = -0,67^*$) (figure 14) ; le PS et le PMG étant corrélés positivement entre eux durant les deux années ($r = 0,70^*$ en 2018-2019 et $r = 0,87^{***}$ durant l'année 2019-2020).

Les coefficients de variation obtenus sont faibles et acceptables pour tous les paramètres durant les trois années. Des coefficients de variation de 8,50 % en 2017-2018, 9,81 % en 2018-2019 et 3,79 % en 2019-2020 sont obtenus par la teneur en protéines ; 1,57 % en 2018-2019 et 1,01 % en 2019-2020 sont obtenus par le poids spécifique, et 2,96 % en 2018-2019 et 1 % en 2019-2020 par le taux de vitrosité. Les résultats détaillés de l'analyse de la variance au niveau de chaque année sont montrés dans les tableaux 2, 4 et 6 de l'annexe I.

Tableau 9 : Moyennes des caractères qualitatifs obtenues par les trois systèmes de travail du sol durant les trois années de l'étude.

Année	Travail du sol			Moyennes
	SD	TM	TC	
Teneur en protéines (%)				
2017-2018	13,57	13,75	14,24	13,85 ^a
2018-2019	11,24	12,37	11,51	11,71 ^b
2019-2020	14,27	13,29	14,06	13,88 ^a
Moyennes	13,03	13,14	13,27	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = ns , Année = 1,02, TS×Année = ns CV % = 7,58				
Taux de vitrosité (%)				
2018-2019	96,50 ^A	95,67 ^A	83,83 ^B	92,00 ^b
2019-2020	96,56	96,56	96,56	96,56 ^a
Moyennes	96,53 ^A	96,11 ^A	90,20 ^B	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = 2,22 , Année = 2,22, TS×Année = 3,85 CV % = 2,15				
Poids spécifique				
2018-2019	83,67	83,58	83,35	83,53 ^a
2019-2020	77,55	77,55	77,83	77,64 ^b
Moyennes	80,61	80,57	80,59	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = ns , Année = 1,18, TS×Année = ns CV % = 1,43				

NB : TS = travail du sol, SD = semis direct, TM = travail minimum, TC = travail conventionnel, ns = non significatif à $P < 0,05$. Les lettres en minuscule représentent l'effet de l'année et les lettres en majuscule représentent l'effet du travail du sol

L'analyse de la variance pluriannuelle sur les caractères qualitatifs de la graine montre que l'effet du travail du sol n'est significatif que sur le taux de vitrosité ($P < 0,01$). Les systèmes de non labour étant plus favorables pour ce paramètre que le labour conventionnel avec des pourcentages de 96,53 % et 96,11 % obtenus par le SD et le TM respectivement, par rapport à 90,20 % obtenu par le

TC, durant les deux années où ce paramètre est mesuré. Les conditions de l'année ont affecté tous les paramètres de qualité. L'année sèche de 2019-2020 a donné la meilleure teneur en protéine et le meilleur taux de vitrosité, mais le plus mauvais poids spécifique (tableau 9, figure 12). L'interaction année \times travail du sol, n'étant significative que sur le taux de vitrosité, montre que durant l'année sèche, tous les systèmes de travail du sol donnent des taux de vitrosité similaires, par contre pendant l'année humide le TC a négativement affecté ce paramètre (96,50 %, 95,67 % sous SD et TM par rapport à 83,83 % sous TC), cela est peut être dû à un lessivage de l'azote à cause des fortes pluies et à la vulnérabilité du sol travaillé à l'érosion et à la perte des éléments. Les coefficients de variation obtenus sont faibles et identiques (tableau 9). Les résultats détaillés de l'analyse de la variance pluriannuelle sont montrés dans les tableaux 8 et 9 de l'annexe I.

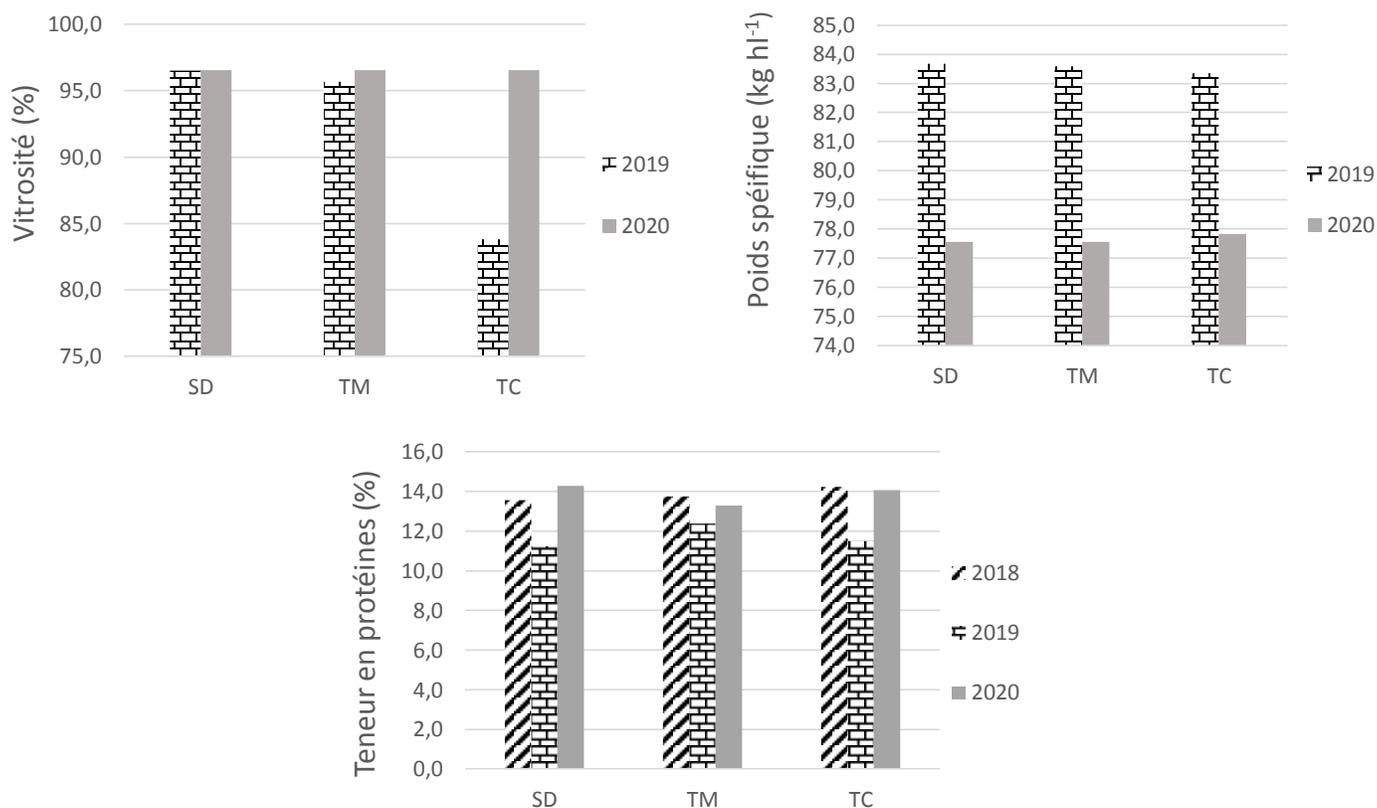


Figure 12 : Effet des systèmes de travail du sol sur le taux de protéines, le taux de vitrosité et le poids spécifique du grain durant les trois années de l'étude.

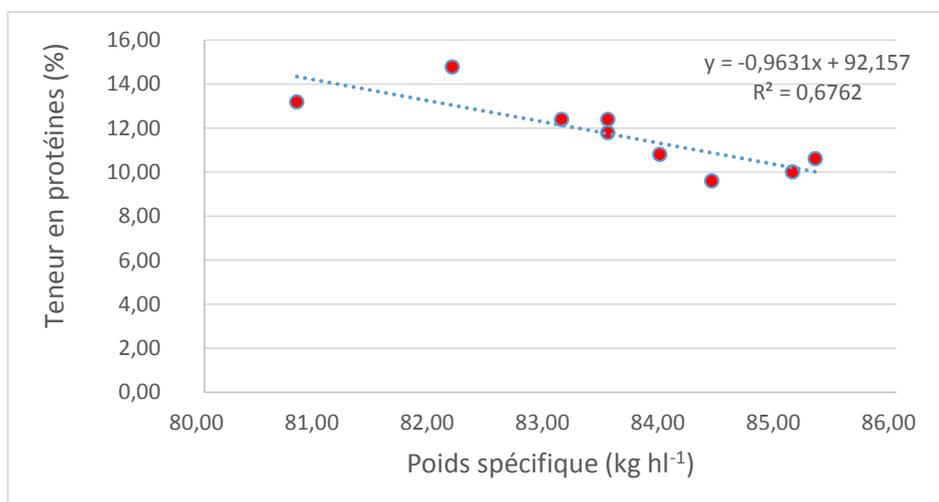


Figure 13 : Relation entre le poids spécifique et la teneur en protéines du grain durant l'année 2018-2019.

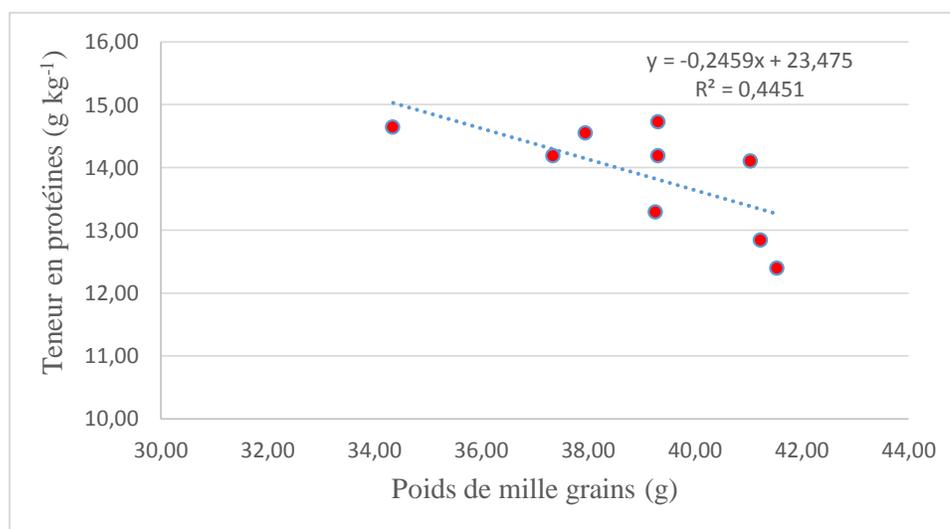


Figure 14 : Relation entre le poids de mille grains et la teneur en protéines du grain durant l'année 2019-2020.

3. Effet des systèmes de travail du sol sur la nutrition phosphatée de la culture de blé dur conduite en monoculture à différents stades

3.1. Effet sur rendement en biomasse sèche, la teneur en P dans la plante et son exportation par la culture de blé dur au stade floraison

L'analyse de la variance au niveau de chaque année montre que le type de travail du sol n'a eu aucun effet significatif sur les paramètres de rendement en biomasse sèche, la teneur en P dans la partie aérienne de la plante, et l'exportation de P par la culture de blé dur au stade floraison durant les deux années où ces paramètres ont pu être mesurés (2017-2018 et 2018-2019). Les coefficients de variation sont de 9,61 %, 12,75 % et 11,84% durant l'année 2017-2018 et de 13,85 %, 4,47 % et 14,14 % en 2018-2019 pour les paramètres de rendement en biomasse sèche, la teneur en P dans la plante et le prélèvement total de P par la culture au stade floraison respectivement. Les moyennes obtenues par les trois techniques de travail du sol sont montrées dans le tableau 10 ci-dessous et leurs représentations graphiques sont montrées dans la figure 15. Les résultats détaillés de l'analyse de la variance au niveau de chaque année sont donnés dans les tableaux 2, 4 et 6 de l'annexe I.

L'analyse de la variance pluriannuelle révèle un effet significatif du travail du sol ($P < 0,05$) et de l'année ($P < 0,001$) sur le rendement en biomasse sèche et un effet significatif de l'année ($P < 0,001$) sur l'exportation totale de P par la culture de blé à ce stade, l'exportation de P étant liée à la biomasse sèche produite ($r = 0,75^*$ en 2017-2018 et $r = 0,96^{***}$ en 2018-2019). Les systèmes de TM et de TC ont produit plus de biomasse sèche que le SD, et l'année 2017-2018 a produit plus que l'année 2018-2019. L'interaction travail du sol \times année n'a, par contre, aucun effet sur tous les paramètres mesurés à la floraison. Les résultats détaillés de l'analyse de la variance pluriannuelle sont donnés dans le tableau 8 de l'annexe I.

Tableau 10 : Moyennes obtenues par les trois systèmes de travail du sol pour les paramètres de rendement en biomasse sèche, la teneur en P dans la plante et le prélèvement total en P au stade floraison durant les années 2017-2018 et 2018-2019.

Année	Travail du sol			Moyennes
	SD	TM	TC	
Rendement en biomasse sèche au stade floraison (q ha ⁻¹)				
2017-2018	90,73	114,90	112,35	105,99 ^a
2018-2019	51,38	52,36	62,61	55,45 ^b
Moyennes	71,05 ^B	83,63 ^A	87,48 ^A	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = 9,74 , Année = 9,74, TS×Année = ns CV % = 11,10				
Teneur en P dans la plante au stade floraison (g kg ⁻¹)				
2017-2018	3,03	2,88	2,78	2,90
2018-2019	3,00	2,80	2,83	2,88
Moyennes	3,02	2,84	2,81	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = ns , Année = ns, TS×Année = ns CV % = 9,58				
Exportation totale en P au stade floraison (kg ha ⁻¹)				
2017-2018	27,40	33,28	31,16	30,61 ^a
2018-2019	15,50	14,63	17,73	15,95 ^b
Moyennes	21,45	23,95	24,44	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = ns, Année = 12,96, TS×Année = ns CV % = 12,96				

NB : TS = travail du sol, SD = semis direct, TM = travail minimum, TC = travail conventionnel, ns= non significatif à P<0,05. Les lettres en minuscule représentent l'effet de l'année et les lettres en majuscule représentent l'effet du travail du sol.

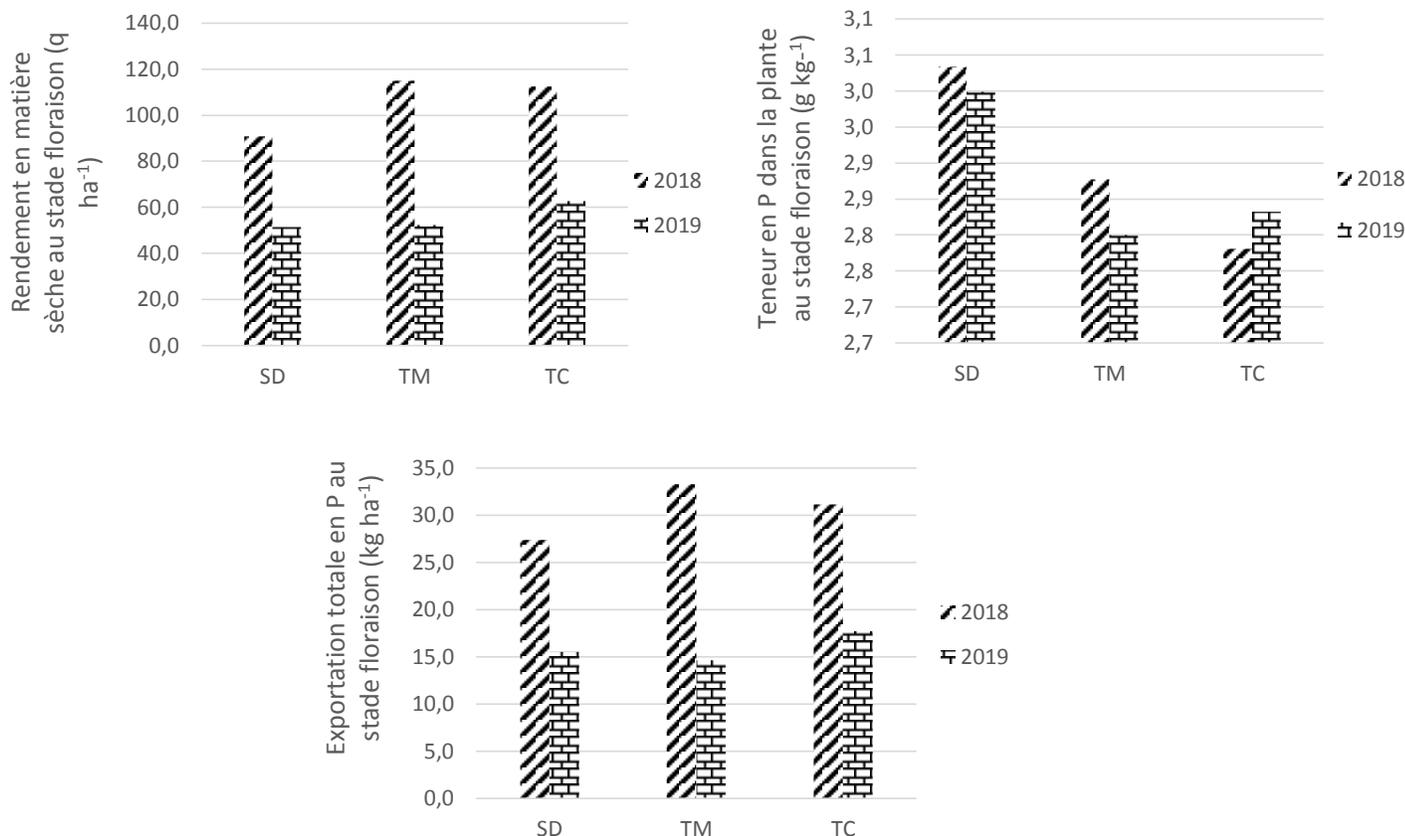


Figure 15 : Effet des systèmes de travail du sol sur le rendement en biomasse sèche, la teneur en P dans la plante et son exportation par la culture de blé dur au stade floraison durant les années 2017-2018 et 2018-2019.

3.2. Effet sur la teneur en P dans le grain et dans la paille et son exportation totale par la culture de blé dur conduite en monoculture au stade maturité

L'analyse de la variance au niveau de chaque année montre que les systèmes de travail du sol ont significativement affecté la teneur en P dans la paille et son exportation totale par la culture de blé dur durant la première année de l'étude (2017-2018). Le SD direct ayant la teneur en P dans la paille la plus élevée et le TM ayant exporté plus de P que les deux autres systèmes (tableau 11). Par contre durant les années 2018-2019 et 2019-2020, l'analyse de la variance ne révèle aucun effet du travail du sol sur ces paramètres. Les coefficients de variation obtenus sont faibles et acceptables pour tous les paramètres mesurés durant la première année (2,69 %, 12,38 %, 2,45 % pour les teneurs en P dans le grain et dans la paille et le prélèvement total en P de la culture respectivement). Durant les années suivantes (2018-2019 et 2019-2020), la variation de l'exportation totale de P est légèrement élevée (les

coefficients de variation sont de 15,44 % et 18,40 % en 2018-2019 et 2019-2020 respectivement), alors que pour les concentrations en P dans le grain et dans la paille, les coefficients de variation obtenus sont faibles et statistiquement acceptables (6,59 % et 8,94 % en 2018-2019 et 13,16 et 2,54 % en 2019-2020 sont obtenus par la teneur en P dans le grain et dans la paille respectivement). Les résultats détaillés de l'analyse de la variance au niveau de chaque année sont donnés dans les tableaux 2, 4 et 6 de l'annexe I.

Les droites de régression montrées dans les figures 17 et 18 montrent qu'il y a une corrélation positive et significative entre le rendement en grain et l'exportation du P par la culture de blé dans deux sur trois années d'étude, $r = 0,69^*$ en 2018-2019 et $r = 0,89^{***}$ durant l'année 2019-2020. Cela nous mène à dire que la nutrition phosphatée de la culture de blé dur peut avoir un effet significatif sur le rendement uniquement durant les années défavorables en termes de précipitations, et lorsque les conditions sont sèches cette liaison est plus forte.

L'analyse de la variance pluriannuelle a montré que sur l'ensemble des trois années, le type de travail du sol et l'interaction année \times travail du sol n'avaient aucun effet significatif sur la teneur en P dans le grain et son exportation totale par la culture de blé, alors que les conditions de l'année ont significativement affecté ces deux paramètres ($P < 0,01$ pour la teneur en P dans le grain et $P < 0,001$ pour l'exportation totale de P par la culture). L'exportation totale en P est significativement supérieure à la première année (2017-2018) à cause de la production importante en matière sèche, par contre la teneur en P dans le grain est meilleure durant l'année sèche de 2019-2020 à cause de sa faible production et le phénomène de dilution qui s'est produit durant les années favorables en terme de climat et de production (tableau 11, figure 16). La teneur en P dans la paille a été significativement affectée par les systèmes de travail du sol ($P < 0,001$). Le blé conduit avec le système de SD contient plus de phosphore dans sa paille ($1,20 \text{ g kg}^{-1}$ de matière sèche) que le blé conduit avec les deux autres systèmes ($1,02$ et $0,93 \text{ g kg}^{-1}$ pour le TM et le TC respectivement). L'année n'a pas montré d'effet significatif, mais l'interaction année \times travail du sol a significativement ($P < 0,001$) affecté ce paramètre. Durant l'année humide de 2017-2018, la paille du blé conduit avec le système de SD a eu la concentration en P la plus importante, suivi du blé conduit sous TM, alors que le blé conduit sous le système de TC a enregistré la valeur la plus faible. Par contre durant les deux dernières années, les trois systèmes de travail du sol ont donné des teneurs en P dans la paille similaires (tableau 11, figures 15). Les résultats détaillés de l'analyse de la variance pluriannuelle sont donnés dans le tableau 9 de l'annexe I.

Tableau 11 : Moyennes obtenues par les trois systèmes de travail du sol pour la teneur en P dans le grain et dans la paille et son exportation totale par la culture de blé dur au stade maturité durant les trois années de l'étude.

Année	Travail du sol			Moyennes
	SD	TM	TC	
Teneur en P dans le grain (g kg ⁻¹)				
2017-2018	5,12	4,43	5,06	4,87 ^a
2018-2019	3,94	3,80	3,83	3,86 ^b
2019-2020	4,83	5,50	5,41	5,25 ^a
Moyennes	4,63	4,58	4,77	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = ns, Année = 0,67, TS×Année = ns CV % = 13,81				
Teneur en P dans la paille (g kg ⁻¹)				
2017-2018	1,49 ^A	0,98 ^B	0,78 ^B	1,08
2018-2019	1,06	1,00	0,93	1,00
2019-2020	1,06	1,08	1,08	1,07
Moyennes	1,20 ^A	1,02 ^B	0,93 ^B	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = 0,1, Année = ns, TS×Année = 0.17 CV % = 8,97				
Exportation totale en P au stade maturité (kg ha ⁻¹)				
2017-2018	27,87 ^B	29,67 ^A	27,44 ^B	28,33 ^a
2018-2019	12,34	11,55	12,11	12,00 ^b
2019-2020	13,72	9,06	10,47	11,09 ^b
Moyennes	17,98	16,76	16,67	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = ns, Année = 1,69, TS×Année = ns CV % = 9,57				

NB : TS = travail du sol, SD = semis direct, TM = travail minimum, TC = travail conventionnel, ns= non significatif à $P < 0,05$. Les lettres en minuscule représentent l'effet de l'année et les lettres en majuscule représentent l'effet du travail du sol.

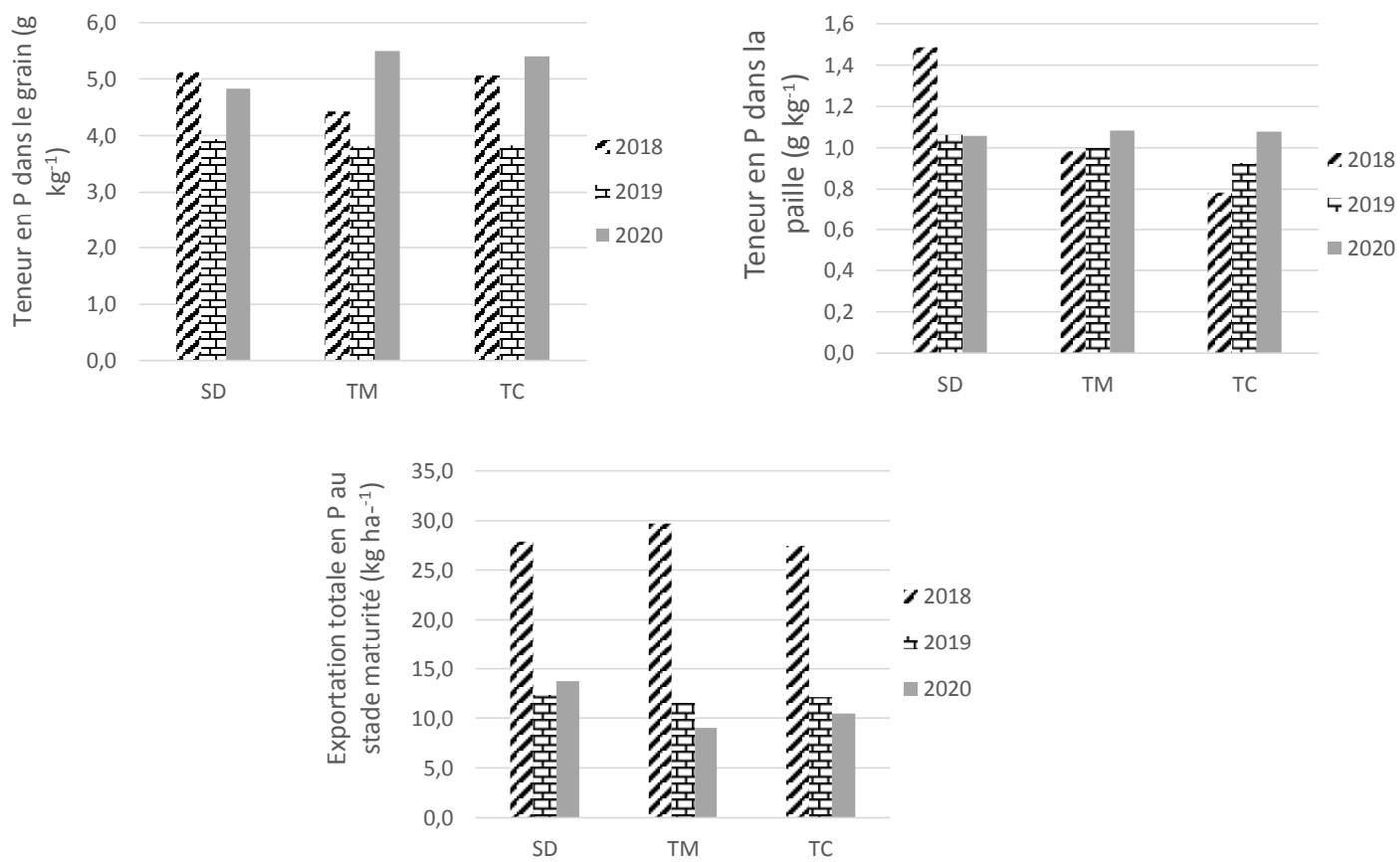


Figure 16 : Effet des systèmes de travail du sol sur la teneur en P dans le grain et dans la paille et son exportation totale par la culture de blé dur au stade maturité durant les trois années de l'étude.

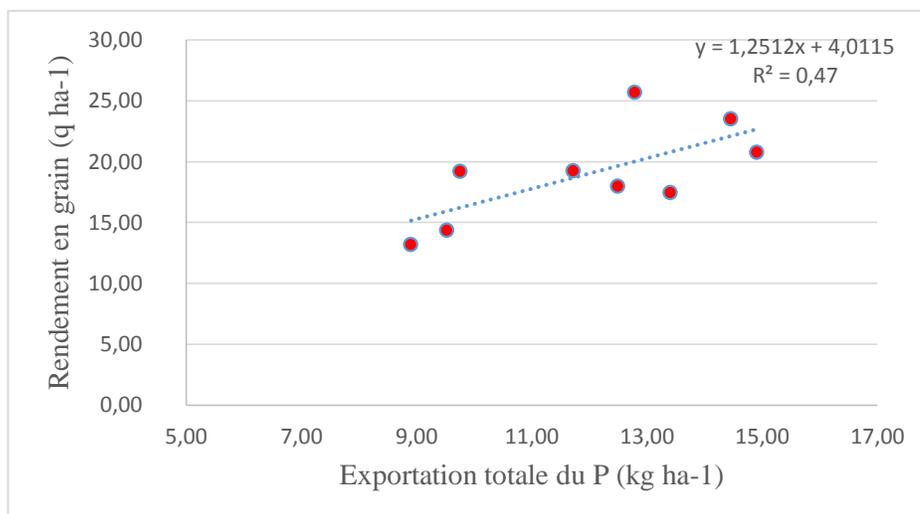


Figure 17 : Relation entre le rendement en grain et l'exportation totale du P par la culture de blé dur en 2018-2019.

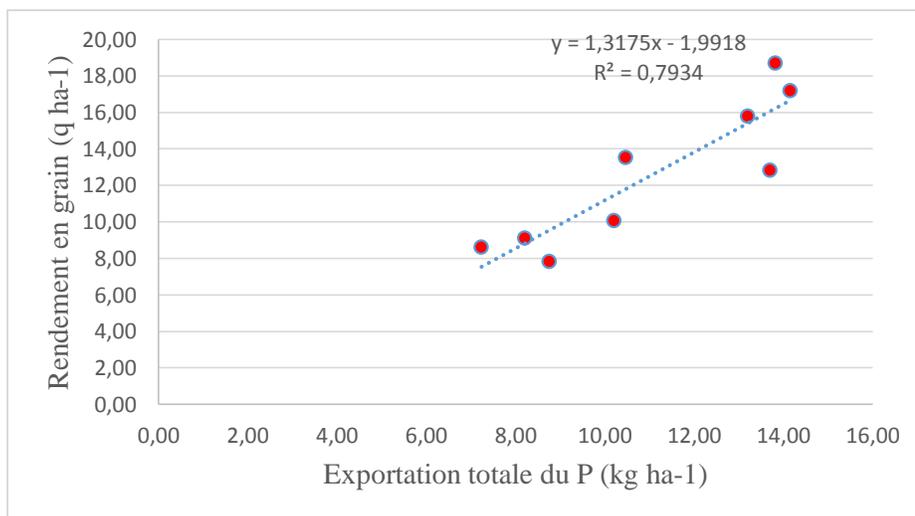


Figure 18 : Relation entre le rendement en grain et l'exportation totale du P par la culture de blé dur en 2019-2020.

4. Effet combiné des systèmes de travail du sol et des rotations de cultures sur la production de blé dur durant l'année 2018-2019

4.1. Effet sur le rendement en grain et ses composantes

L'analyse de la variance révèle que le travail du sol n'avait pas d'effet significatif sur les composantes du rendement, sauf le PMG ($P < 0,05$). Le système de SD ayant donné la meilleure valeur du poids de grain (44,91 g), par rapport au TC qui a donné une valeur significativement plus faible (39,13 g). Le TM a donné une valeur intermédiaire entre les deux (42,2 g) (tableau 12, figure 19). Cela

n'a, pour autant, pas affecté le rendement en grain qui est statistiquement similaire pour tous les types de travail du sol. De l'autre côté, la rotation culturale a eu un effet très hautement significatif sur le rendement en grain ($P < 0,001$), et significatif ($P < 0,05$) sur le PMG, mais pas sur les autres composantes du rendement (NEM et NGE). Le classement des moyennes par la plus petite différence significative (PPDS) de Fisher révèle que les précédents jachère et lentille ont donné les meilleurs rendements, par contre une rotation céréale-céréale (B-B et B-A) a donné un rendement statistiquement plus bas (27,06 et 26,19 q ha⁻¹ par les rotations J-B et L-B respectivement, par rapport à 22,52 et 19,02 q ha⁻¹ obtenus par les rotations A-B et B-B respectivement). La monoculture de blé (B-B) a donné le PMG le plus élevé (43,89 g) et les rotations J-B et A-B ont donné les PMG les valeurs les plus basses (41,18 g et 40,64 g par la J-B et A-B respectivement), la rotation L-B ayant donné un PMG intermédiaire entre les deux groupes (42,61 g) (tableau 12, figures 18).

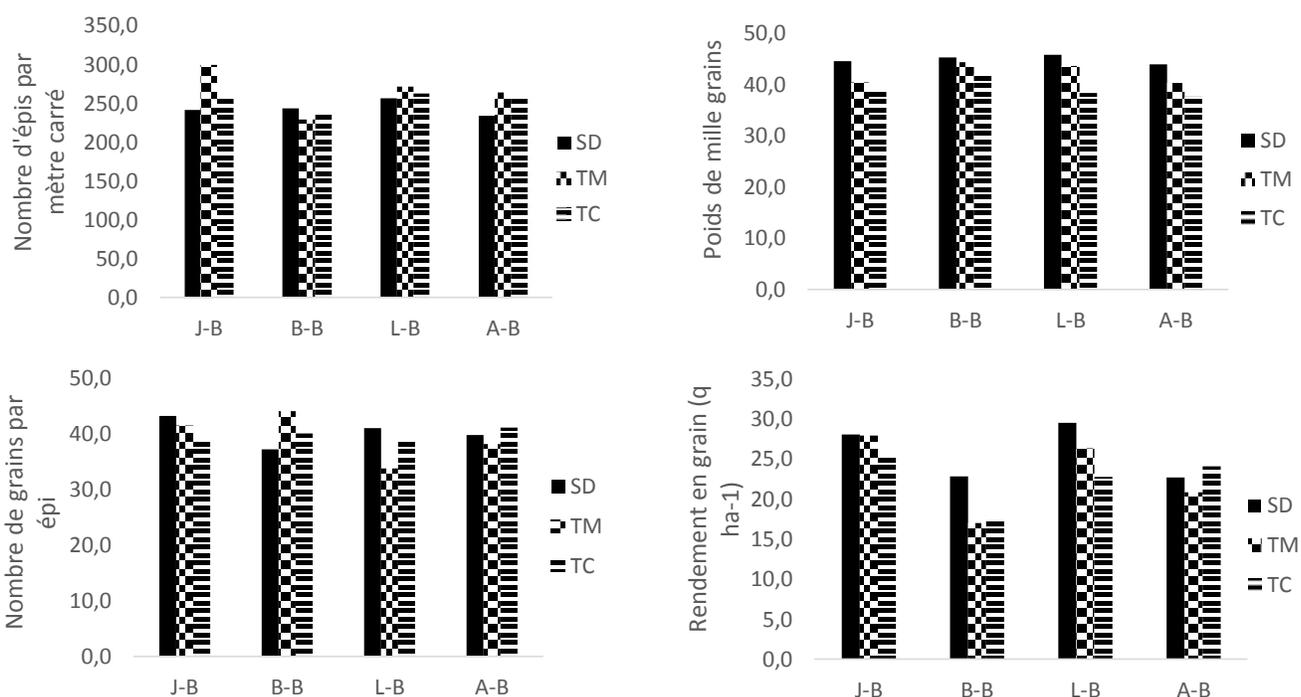


Figure 19: Effet des systèmes de travail du sol et des rotations culturales sur le rendement et ses composantes durant l'année 2018-2019.

Les coefficients de variation obtenus sont faibles et acceptables (tableau 12). Le détail de l'analyse de la variance est donné dans le tableau 10 de l'annexe I.

Tableau 12 : Moyennes du rendement en grain et de ses composantes obtenues par les différents systèmes de travail du sol et les différentes rotations de cultures durant l'année 2018-2019.

Rotation	Travail du sol			Moyennes
	SD	TM	TC	
Rendement en grain (q ha ⁻¹)				
J-B	28,06	27,92	25,19	27,06 ^a
B-B	22,78	16,99	17,30	19,02 ^c
L-B	29,47	26,34	22,77	26,19 ^a
A-B	22,68	20,82	24,05	22,52 ^b
Moyennes	25,75	23,02	22,33	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = ns, Rotation = 3,01, TS×Rotation = ns CV % (TS) = 14,70, CV % (Rotation) = 12,83				
NEM				
J-B	241,08	299,63	257,58	266,10
B-B	243,47	229,19	237,35	236,67
L-B	256,36	271,08	262,66	263,37
A-B	233,56	263,86	257,48	251,63
Moyennes	243,62	265,94	253,77	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = ns, Rotation = ns, TS×Rotation = ns CV % (TS) = 10,66, CV % (Rotation) = 9,02				
NGE				
J-B	43,25	41,58	38,93	41,25
B-B	37,26	44,08	40,07	40,47
L-B	41,06	33,79	39,25	38,03
A-B	39,84	38,25	41,19	39,76
Moyennes	40,35	39,42	39,86	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = ns, Rotation = ns, TS×Rotation = ns CV % (TS) = 11,93, CV % (Rotation) = 9,40				
PMG (g)				
J-B	44,55	40,45	38,55	41,18 ^b
B-B	45,29	44,39	42,01	43,89 ^a
L-B	45,88	43,61	38,35	42,6 ^{ab}
A-B	43,94	40,36	37,63	40,64 ^b
Moyennes	44,91 ^A	42,20 ^{AB}	39,13 ^B	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = 4,27, Rotation = 2,25, TS×Rotation = ns CV % (TS) = 8,95, CV % (Rotation) = 5,40				

NB : TS = travail du sol, SD = semis direct, TM = travail minimum, TC = travail conventionnel, NEM = nombre d'épis par mètre carré, NGE = nombre de grains par épi, PMG = poids de mille grains, ns = non significatif à P<0,05. Les lettres en minuscule représentent l'effet de la rotation culturale et les lettres en majuscule représentent l'effet du travail du sol.

4.2. Effet sur le rendement en biomasse sèche et en paille, le nombre de plants par mètre carré et l'indice de récolte

L'analyse de la variance ne révèle aucun effet significatif, du type de travail du sol ou des rotations culturales sur les paramètres de rendement en biomasse sèche et en paille, le nombre de plantes par mètre carré et l'indice de récolte. Les valeurs moyennes et les coefficients de variations obtenus par chacun des facteurs étudiés sont donnés dans le tableau 13 et leurs représentations graphiques sont montrées dans la figure 20 ci-dessous. Les résultats détaillés de l'ANOVA sont donnés dans le tableau 10 de l'annexe I.

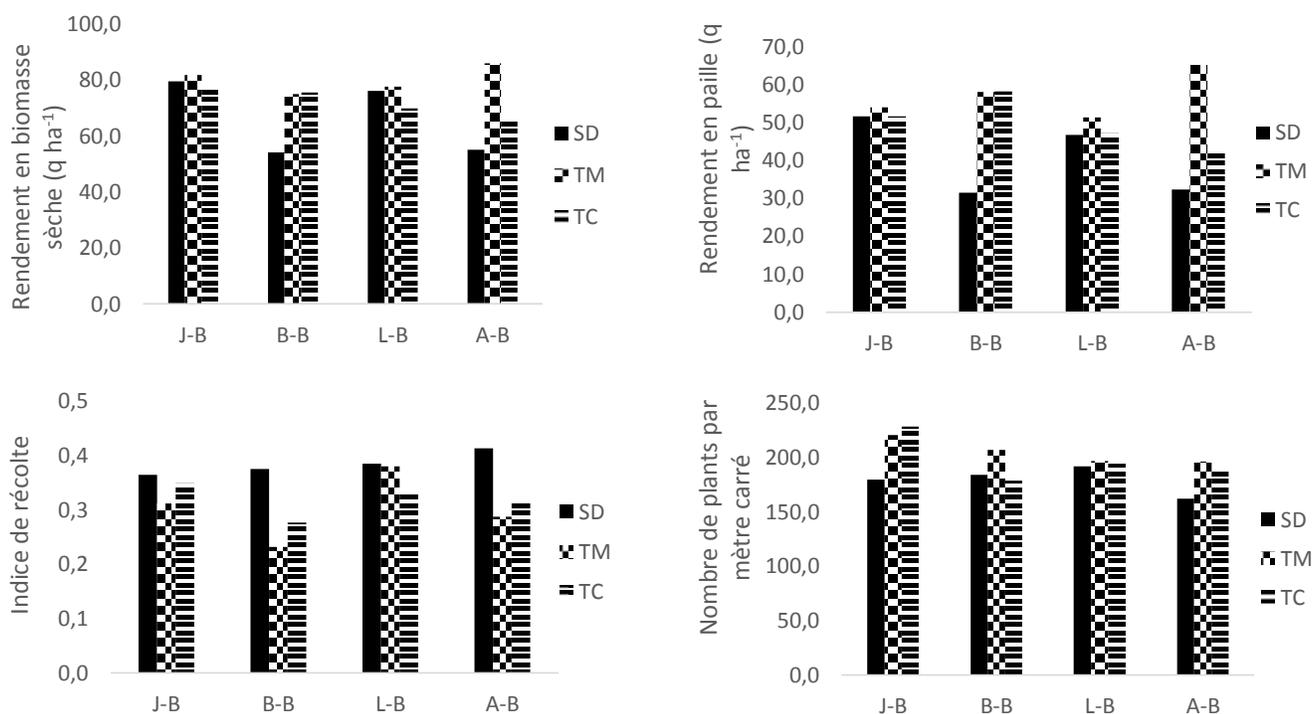


Figure 20 : Effet des systèmes de travail du sol et des rotations culturales sur le nombre de plantes par mètre carré, des rendements en biomasse sèche et en paille et de l'indice de récolte durant l'année 2018-2019.

Tableau 13 : Moyennes du nombre de plantes par mètre carré, des rendements en biomasse sèche et en paille et de l'indice de récolte obtenues par les différents systèmes de travail du sol et les différentes Rotations de cultures durant l'année 2018-2019.

Rotation	travail du sol			Moyennes
	SD	TM	TC	
NPM				
J-B	179,44	220,51	228,67	209,54
B-B	183,88	207,06	178,55	189,83
L-B	191,99	196,67	194,17	194,28
A-B	162,18	196,39	186,95	181,84
Moyennes	179,37	205,16	197,09	
TS = ns, Rotation = ns, TS× Rotation = ns CV % (TS) = 9,05, CV % (Rotation) = 10,15				
Rendement en biomasse sèche (q ha ⁻¹)				
J-B	79,65	81,83	76,74	79,41
B-B	54,26	74,98	75,52	68,25
L-B	76,22	77,68	69,82	74,58
A-B	55,04	86,02	66,25	69,10
Moyennes	66,29	80,13	72,08	
TS = ns, Rotation = ns, TS× Rotation = ns CV % (TS) = 16,99, CV % (Rotation) = 16,80				
Rendement en paille (q ha ⁻¹)				
J-B	51,59	53,91	51,55	52,35
B-B	31,48	57,99	58,22	49,23
L-B	46,75	51,34	47,05	48,38
A-B	32,36	65,20	42,19	46,59
Moyennes	40,55	57,11	49,75	
TS = ns, Rotation = ns, TS× Rotation = ns CV % (TS) = 25,84, CV % (Rotation) = 23,69				
Indice de récolte				
J-B	0,36	0,31	0,35	0,34
B-B	0,37	0,23	0,28	0,29
L-B	0,38	0,38	0,33	0,37
A-B	0,41	0,29	0,32	0,34
Moyennes	0,38	0,30	0,32	
TS = ns, Rotation = ns, TS× Rotation = ns CV % (TS) = 32,71, CV % (Rotation) = 19,74				

TS = travail du sol, SD = semis direct, TM = travail minimum, TC= travail conventionnel, NPM = nombre de plantes par mètre carré, ns = non significatif à P<0,05, CV % = coefficient de variation.

5. Effet combiné des systèmes de travail du sol et des rotations de cultures sur la qualité de la graine de blé dur durant l'année 2018-2019

La qualité de la graine mesurée à travers le poids spécifiques (PS), la teneur en protéines et le taux de vitrosité de la graine, s'est montrée peu affectée par le travail du sol durant cette année. Cependant, la rotation culturale a grandement affecté ces caractères. L'analyse de la variance a révélé un effet significatif du type de travail du sol uniquement sur le taux de vitrosité ($P < 0,01$), les systèmes de non labour étant plus favorables pour ce caractère (97,47 % et 97 % sont les pourcentages obtenus par le TM et le SD respectivement) par rapport au labour conventionnel (94,46 %).

De l'autre côté, le précédent cultural a affecté significativement la teneur en protéines ($P < 0,05$) et le taux de vitrosité ($P < 0,05$) ; ces deux paramètres sont fortement liés et dépendent des conditions de l'année (la pluviométrie) et de la teneur en azote (N) dans le sol (Colecchia *et al.*, 2013). Pour cela, le précédent légumineuse représenté par la rotation L-B a significativement augmenté la teneur en protéines du grain par rapport aux autres rotations (13,23 % par L-B par rapport à 12,09 %, 11,71 % et 11,68 % par les rotations J-B, B-B et A-B respectivement), ce qui est dû à la capacité des légumineuses à augmenter la teneur en N dans le sol grâce à la fixation atmosphérique de N_2 . Le taux de vitrosité a été négativement affecté par la monoculture de blé (B-B) par rapport aux autres types de rotations (93 % par le B-B par rapport à 97,94 %, 97,67 % et 96,61 % obtenus par les rotations J-B, A-B et L-B respectivement) (tableau 14, figure 21).

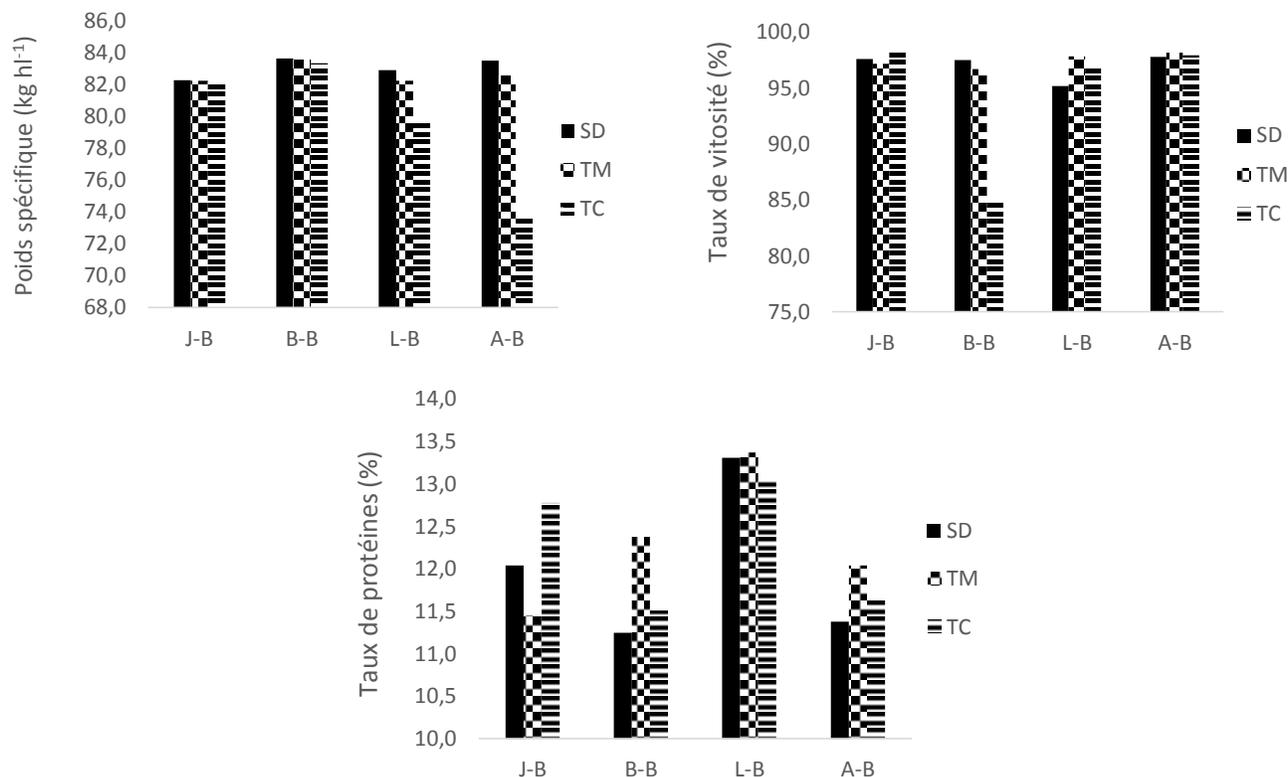


Figure 21 : Effet des systèmes de travail du sol et des rotations culturales sur la qualité du grain de blé dur durant l'année 2018-2019.

L'interaction travail du sol \times rotation a révélé un effet significatif sur le taux de vitrosité, montrant que le système de monoculture associé avec un travail du sol conventionnel affecte négativement l'aspect vitreux de la graine de blé dur, induisant un taux de mitadinage assez important. Les coefficients de variation obtenus par le système de travail du sol et des rotations de cultures pour les caractères qualitatifs sont faibles et statistiquement acceptables (tableau 14). Les détails des résultats de l'analyse de la variance sont donnés dans le tableau 11 de l'annexe I.

Tableau 14 : Moyennes des paramètres de qualité de la graine obtenues par les différents systèmes de travail du sol et les différentes rotations de cultures durant l'année 2018-2019.

Rotation	Travail du sol			Moyenne
	SD	TM	TC	
Poids spécifique (kg hl ⁻¹)				
J-B	82,30	82,25	82,15	82,23
B-B	83,67	83,58	83,35	83,53
L-B	82,92	82,25	79,62	81,59
A-B	83,52	82,60	73,63	79,92
Moyenne	83,10	82,67	79,69	
TS = ns, Rotation = ns, TS×Rotation = ns CV % (TS) = 5,42, CV% (Rotation) = 4,79				
Teneur en protéine (%)				
J-B	12,04	11,44	12,77	12,09 ^b
B-B	11,24	12,37	11,51	11,71 ^b
L-B	13,31	13,37	13,04	13,24 ^a
A-B	11,38	12,04	11,64	11,69 ^b
Moyenne	11,99	12,31	12,24	
PPDS _{0,05} , TS = ns, Rotation = 0,93, TS×Rotation = ns CV % (TS) = 19,26, CV% (Rotation) = 7,72				
Taux de vitrosité (%)				
J-B	97,58	97,17	98,25	97,67 ^a
B-B	97,50	96,67	84,83	93,00 ^b
L-B	95,17	97,83	96,83	96,61 ^a
A-B	97,75	98,17	97,92	97,94 ^a
Moyenne	97,00 ^A	97,46 ^A	94,46 ^B	
PPDS _{0,05} , TS = 1,40, Rotation = 2,31, TS×Rotation = 3,47 CV % (TS) = 1,29, CV % (Rotation) = 2,42				

NB : TS = travail du sol, SD = semis direct, TM = travail minimum, TC = travail conventionnel, ns = non significatif à P<0,05. CV % = coefficient de variation. Les lettres en minuscule représentent l'effet de la rotation culturale et les lettres en majuscule représentent l'effet du travail du sol.

6. Effet combiné des systèmes de travail du sol et des rotations de culture sur la nutrition phosphatée de la culture de blé dur durant l'année 2018-2019

6.1. Au stade floraison

L'analyse de la variance ne révèle aucun effet significatif des systèmes de travail du sol sur les paramètres mesurés au stade floraison. Par contre, les rotations des cultures ont significativement (P<0,05) affecté le rendement en biomasse sèche produite à ce stade. La rotation J-B a donné le rendement le plus élevé (71,40 q ha⁻¹), alors que le B-B a donné le rendement le plus faible (55,01 q ha⁻¹), les rotations L-B et A-B ont donné des rendements intermédiaires entre les deux groupes (66,65

et 60,64 q ha⁻¹ par la L-B et A-B respectivement) (tableau 15, figure 22). La variation pour le rendement en biomasse sèche à ce stade est très importante engendrant des coefficients de variation très élevés pour les paramètres de rendement en biomasse sèche et l'exportation totale de P, alors que, les coefficients de variation obtenus pour la teneur en P dans la plante sont faibles et statistiquement acceptables (tableau 15).

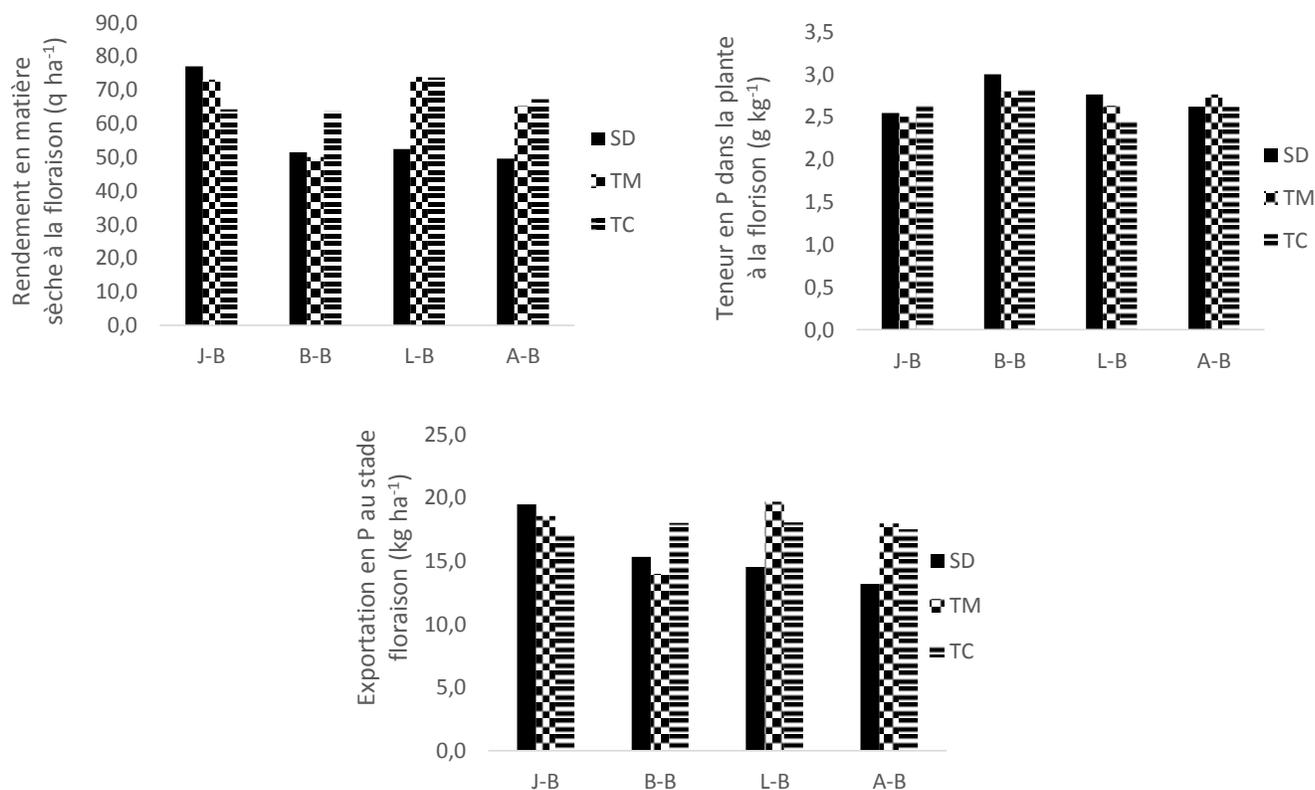


Figure 22 : Effet des systèmes de travail du sol et des rotations culturales sur la nutrition phosphatée de la culture de blé dur au stade floraison durant l'année 2018-2019.

Les résultats détaillés de l'analyse de la variance pour les paramètres mesurés au stade floraison sont donnés dans le tableau 12 de l'annexe I.

Tableau 15 : Moyennes des paramètres de rendement en biomasse sèche, la teneur en P dans la plante et le prélèvement total en P au stade floraison obtenues par les différents systèmes de travail du sol et les différentes rotations de cultures durant l'année 2018-2019.

Rotation	Travail du sol			Moyenne
	SD	TM	TC	
Rendement en matière sèche au stade floraison (q ha ⁻¹)				
J-B	76,96	73,04	64,21	71,40 ^a
B-B	51,38	50,03	63,61	55,01 ^b
L-B	52,46	73,76	73,73	66,65 ^{ab}
A-B	49,50	65,18	67,24	60,64 ^{ab}
Moyenne	57,57	65,50	67,20	
PPDS _{0,05} , TS = ns, Rotation = 11,68, TS×Rotation = ns CV % (TS) = 33,77, CV % (Rotation) = 18,58				
Teneur en P dans la plante au stade floraison (g kg ⁻¹)				
J-B	2,54	2,50	2,66	2,57
B-B	3,00	2,80	2,83	2,88
L-B	2,76	2,63	2,46	2,62
A-B	2,62	2,76	2,62	2,67
Moyenne	2,73	2,67	2,64	
TS = ns, Rotation = ns, TS×Rotation = ns CV % (TS) = 3,24, CV % (Rotation) = 8,85				
Exportation de P au stade floraison (kg ha ⁻¹)				
J-B	19,44	18,52	17,05	18,34
B-B	15,31	13,96	17,98	15,75
L-B	14,53	19,65	18,03	17,40
A-B	13,16	17,93	17,50	16,20
Moyenne	15,61	17,52	17,64	
TS = ns, Rotation = ns, TS×Rotation = ns CV % (TS) = 36,57, CV % (Rotation) = 17,53				

NB : TS = travail du sol, SD = semis direct, TM = travail minimum, TC = travail conventionnel, ns = non significatif à P<0,05. CV% = coefficient de variation. Les lettres en minuscule représentent l'effet de de la rotation culturale.

6.2. Au stade maturité

L'analyse de la variance révèle que la concentration en P dans le grain et dans la paille et son exportation totale par la culture de blé dur à la fin de son cycle sont identiques dans les différents types de travail du sol étudiés. Les rotations de cultures ont, par contre, un effet significatif sur la teneur en P dans le grain (P<0,05), et très hautement significatif (P<0,001) sur la teneur en P dans la paille, sans pour autant qu'elles aient un effet sur l'exportation totale de cet élément par la culture de blé. La rotation J-B a négativement affecté la teneur en P dans le grain (3,46 g kg⁻¹) et dans la paille (0,75 g kg⁻¹) par rapport aux autres rotations qui ont eu des teneurs statistiquement similaires (3,86 ; 3,77 et

3,68 g kg⁻¹ sont obtenus par les rotations B-B ; A-B et L-B respectivement dans le grain et 1 ; 0,91 et 0,82 g kg⁻¹ sont obtenus par les rotations B-B ; A-B et L-B respectivement dans la paille) (tableau 16, figure 23). Les coefficients de variation obtenus par le type de travail du sol sont élevés pour tous les paramètres mesurés à ce stade, par contre les précédents culturaux ont obtenu des coefficients de variation acceptables pour les teneurs en P dans le grain et dans la paille, mais légèrement élevés pour l'exportation totale de la culture (tableau 16).

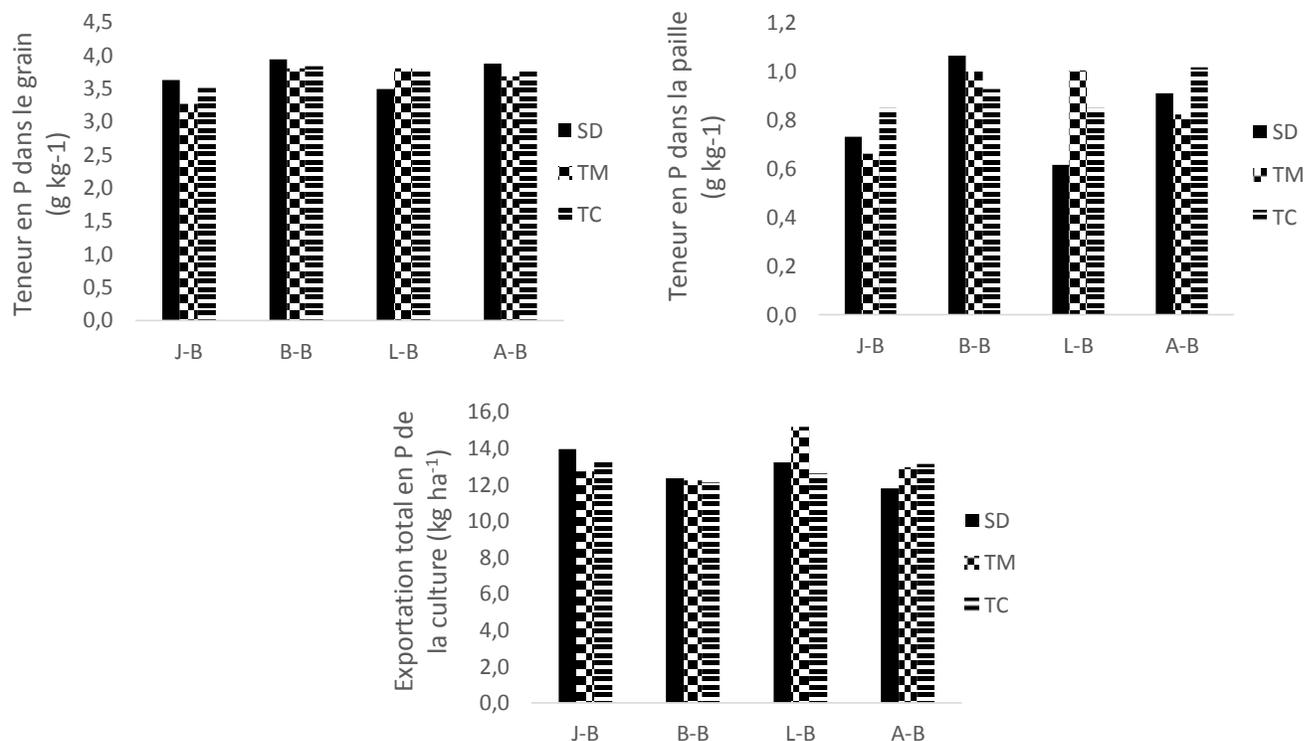


Figure 23 : Effet des systèmes de travail du sol et des rotations culturales sur la teneur en P dans le grain et dans la paille et son prélèvement total par la culture de blé dur au stade maturité durant l'année 2018-2019.

Les résultats détaillés de l'analyse de la variance pour les paramètres de la nutrition phosphatée à la maturité sont donnés dans le tableau 12 de l'annexe I.

Tableau 16 : Moyennes des paramètres de la teneur en P dans le grain et dans la paille et son prélèvement total par la culture de blé dur au stade maturité obtenues par les différents systèmes de travail du sol et les différentes rotations de cultures durant l'année 2018-2019.

Rotation	Travail du sol			Moyenne
	SD	TM	TC	
Teneur en P dans le grain (g kg ⁻¹)				
J-B	3,62	3,27	3,50	3,46 ^b
B-B	3,94	3,80	3,83	3,86 ^a
L-B	3,49	3,80	3,76	3,68 ^a
A-B	3,87	3,68	3,76	3,77 ^a
Moyenne	3,73	3,64	3,71	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = ns, Rotation = 0,25, TS×Rotation = ns CV % (TS) = 13,14, CV % (Rotation) = 6,73				
Teneur en P dans la paille (g kg ⁻¹)				
J-B	0,73	0,66	0,85	0,75 ^b
B-B	1,06	1,00	0,93	1,00 ^a
L-B	0,61	1,00	0,85	0,82 ^a
A-B	0,91	0,82	1,01	0,91 ^a
Moyenne	0,83	0,87	0,91	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = ns, Rotation = 0,09, TS×Rotation = ns CV % (TS) = 27,17, CV % (Rotation) = 10,99				
Exportation totale de P au stade maturité (kg ha ⁻¹)				
J-B	13,96	12,71	13,30	13,32
B-B	12,34	12,24	12,11	12,23
L-B	13,23	15,17	12,62	13,67
A-B	11,80	12,95	13,15	12,63
Moyenne	12,83	13,27	12,79	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = ns, Rotation = ns, TS×Rotation = ns CV % (TS) = 15,75, CV % (Rotation) = 14,67				

NB : TS = travail du sol, SD = semis direct, TM = travail minimum, TC = travail conventionnel, ns = non significatif à P<0,05. CV % = coefficient de variation. Les lettres en minuscule représentent l'effet de la rotation culturale.

7. Effet des systèmes de travail du sol et des rotations culturales sur le P assimilable et le pH dans la couche 0-10 cm du sol

Les systèmes de travail du sol et les rotations de cultures étudiés n'ont eu aucun effet significatif sur la teneur en P assimilable durant les trois années de cette étude (tableaux 17-19, figures 24-26). Cependant, le pH du sol a été significativement affecté ($P < 0,01$) par les systèmes de travail du sol durant l'année 2018-2019 (le détail de l'ANOVA réalisée au niveau de chaque année séparément est montré dans les tableaux 13-15 de l'annexe I). Une acidification significative est notée dans les systèmes de SD et de TM par rapport au TC (tableau 18, figure 25). La variation des teneurs en P entre les systèmes du travail du sol et des rotations durant la même année est très large, ce qui s'est manifesté par des coefficients de variations très élevés (tableaux 17-19). Par contre, la variation du pH est faible et les coefficients de variation obtenus sont faibles et acceptables pour les deux facteurs étudiés et dans les trois années de l'étude. Nze Memiaghe *et al.* (2022) ont également obtenus des coefficients de variation trop élevés pour les paramètres liés au P du sol, et faibles pour le pH sous différents systèmes de travail du sol.

Tableau 17 : Moyennes des paramètres de la teneur en P assimilable et du pH du sol obtenues par les différents systèmes de travail du sol et les différentes rotations de cultures durant l'année 2017-2018.

Rotation	Travail du sol			Moyenne
	SD	TM	TC	
P assimilable (ppm)				
J-B	15,03	26,06	18,95	20,01
B-B	22,83	22,39	19,97	21,73
L-B	13,12	20,85	19,07	17,68
A-B	16,74	20,86	15,65	17,75
Moyenne	16,93	22,54	18,41	
<i>PPDS</i> _{0,05} , TS = ns, Rotation = ns, TS×Rotation = ns CV % (TS) = 55,93, CV % (Rotation) = 28,09				
pH				
J-B	8,14	8,11	8,12	8,12
B-B	8,09	8,05	8,15	8,10
L-B	8,10	8,06	8,07	8,08
A-B	8,11	8,12	8,13	8,12
Moyenne	8,11	8,09	8,12	
TS = ns, Rotation = ns, TS×Rotation = ns CV % (TS) = 0,78, CV % (Rotation) = 0,48				

TS = travail du sol, SD = semis direct, TM = travail minimum, TC = travail conventionnel, ns = non significatif à $P < 0,05$.
CV% = coefficient de variation

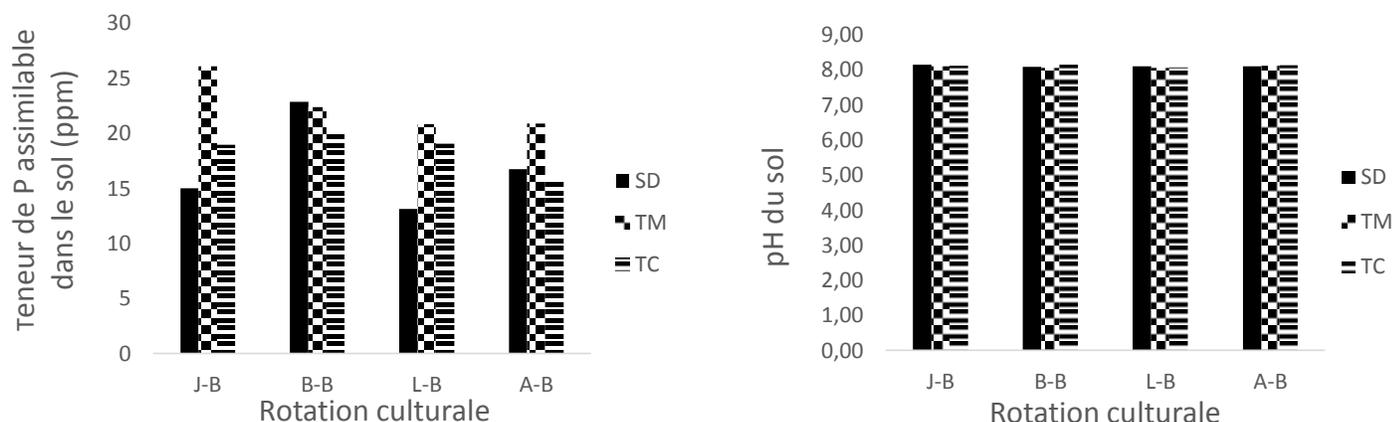


Figure 24 : Effet des systèmes de travail du sol et des rotations culturales sur la teneur en P assimilable et le pH du sol durant l'année 2017-2018.

Tableau 18 : Moyennes des paramètres de la teneur en P assimilable et du pH du sol obtenues par les différents systèmes de travail du sol et les différentes rotations de cultures durant l'année 2018-2019.

Rotation	Travail du sol			Moyenne
	SD	TM	TC	
P assimilable (ppm)				
J-B	8,20	7,40	13,80	9,80
B-B	11,13	22,13	21,00	18,09
L-B	9,87	13,80	15,47	13,04
A-B	22,33	20,60	12,00	18,31
Moyenne	12,88	15,98	15,57	
TS = ns, Rotation = ns, TS×Rotation = ns CV % (TS) = 79,01, CV % (Rotation) = 59,33				
pH				
J-B	8,09	8,12	8,10	8,10
B-B	8,14	8,14	8,19	8,15
L-B	8,14	8,12	8,17	8,14
A-B	8,06	8,16	8,20	8,14
Moyenne	8,11 ^B	8,13 ^B	8,16 ^A	
TS = 0,03, Rotation = ns, TS×Rotation = ns CV % (TS) = 0,3, CV % (Rotation) = 0,51				

NB : TS = travail du sol, SD = semis direct, TM = travail minimum, TC = travail conventionnel, ns = non significatif à $P < 0,05$. CV % = coefficient de variation. Les lettres en majuscule représentent l'effet du travail du sol.

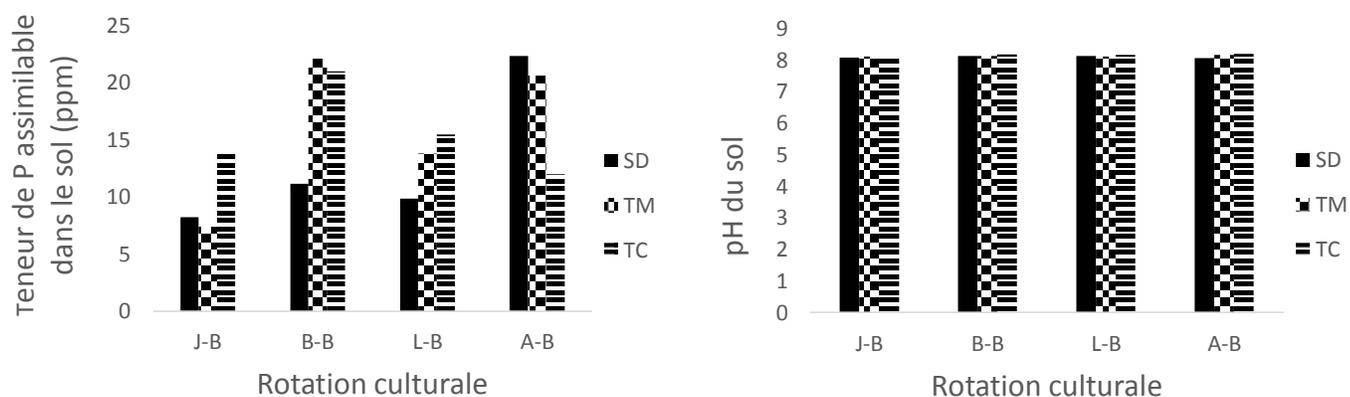


Figure 25 : Effet des systèmes de travail du sol et des rotations culturales sur la teneur en P assimilable et le pH du sol durant l'année 2018-2019.

Tableau 19 : Moyennes des paramètres de la teneur en P assimilable et du pH du sol obtenues par les différents systèmes de travail du sol et les différentes rotations de cultures durant l'année 2019-2020.

Rotation	Travail du sol			Moyenne
	SD	TM	TC	
P assimilable (ppm)				
J-B	20,08	23,88	22,88	22,28
B-B	21,98	28,48	22,77	24,41
L-B	25,68	25,31	20,02	23,67
A-B	23,14	31,91	16,88	23,98
Moyenne	22,72	27,39	20,64	
TS = ns, Rotation = ns, TS*Rotation = ns CV % (TS) = 46,56, CV % (Rotation) = 25,23				
pH				
J-B	7,89	8,02	8,05	7,99
B-B	7,83	7,98	7,98	7,93
L-B	7,91	8,04	8,05	8,00
A-B	7,83	8,00	8,10	7,98
Moyenne	7,87	8,01	8,04	
TS = ns, Rotation = ns, TS*Rotation = ns CV % (TS) = 3,47, CV % (Rotation) = 1,42				

NB : TS = travail du sol, SD = semis direct, TM = travail minimum, TC = travail conventionnel, ns = non significatif à $P < 0,05$. CV % = coefficient de variation.

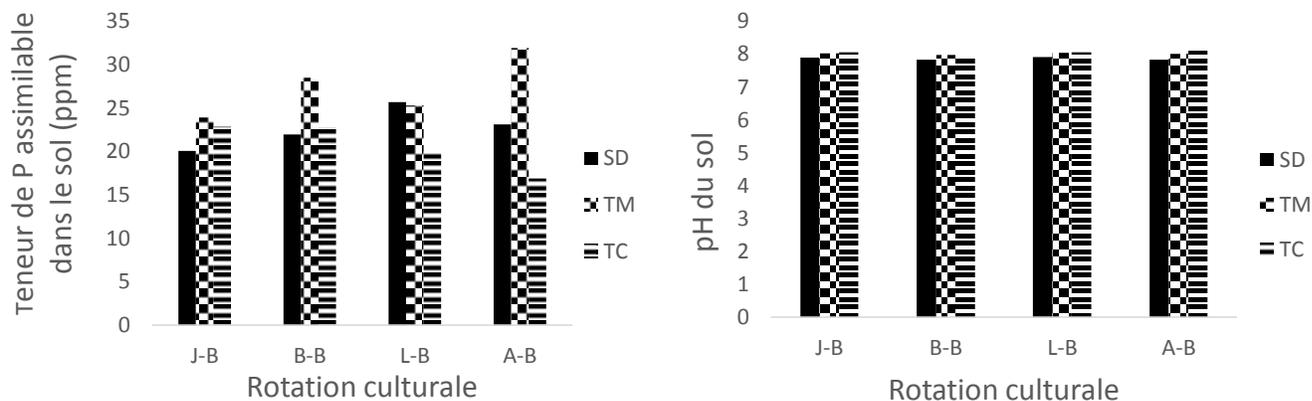


Figure 26 : Effet des systèmes de travail du sol et des rotations culturales sur la teneur en P assimilable et le pH du sol durant l'année 2019-2020.

A partir de la figure 27 ci-dessous, nous remarquons que le SD et le TM ont enregistré les valeurs de pH les plus faibles par rapport au TC sur les trois ans de l'étude. Une baisse marquante du pH sur les parcelles de SD est notée durant la dernière année (2020), ce qui est probablement dû à une augmentation de l'activité biologique après la quatrième année de l'adoption de ce système. Nous remarquons également que l'évolution de P assimilable dans le sol n'est pas liée à la valeur du pH, mais plutôt à l'apport du phosphore et à son utilisation par la culture précédente. L'année 2019 ayant enregistré les plus faibles valeurs car le phosphore n'a pas été apporté dans les parcelles de la jachère durant l'année 2018, et son exportation dans les autres parcelles était maximale à cause des rendements importants obtenus par les différents précédents durant la même année (2018).

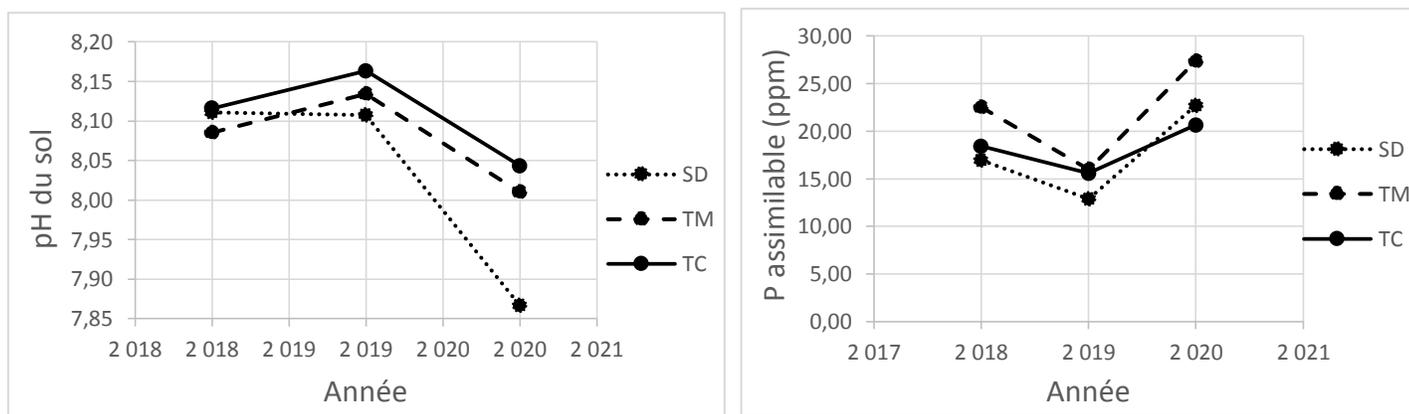


Figure 27 : Evolution du pH du sol (à gauche) et du P assimilable (à droite) en fonction du type de travail du sol et de l'année.

L'évolution du pH du sol et du P assimilable en fonction de la rotation, montrée dans la figure 28 ci-dessous, montre que les valeurs du pH ont enregistré une légère augmentation dans les parcelles occupées par les différentes cultures précédentes durant l'année 2019, puis une baisse durant l'année 2020. Tandis que les parcelles du précédent jachère ont enregistré une baisse continue de 2018 à 2020. Ceci est dû à une réduction continue du pH dans les parcelles de la jachère chimique dans les deux dernières années. La couverture végétale permanente du sol sur ces parcelles a probablement entraîné une augmentation de l'activité biologique au fil des années et par conséquent une acidification du sol. D'autre part, les valeurs du P assimilable ont baissé durant l'année 2019, particulièrement, dans les parcelles de la jachère et de la lentille. Cela est dû au fait que les parcelles de la jachère n'ont reçu aucune fertilisation phosphatée durant l'année 2018, d'une part et d'autre part à la perte des éléments par érosion hydrique au début de l'année 2019 (avant les prélèvements du sol) à cause des fortes précipitations. Pour les parcelles de la lentille, la baisse de P assimilable est due à son utilisation par la culture de lentille durant l'année 2018, où l'étude de Ryan *et al.*, (2008) ainsi que les résultats de la deuxième partie de la présente thèse montrent une utilisation plus importante du P par les cultures de légumineuses par rapport à une culture de céréales, notamment, le blé et l'avoine. Par contre à la dernière année 2020, des teneurs plus élevées et similaires sont obtenues par tous les précédents grâce à une fertilisation homogène et une utilisation homogène de phosphore par la culture de blé conduite sur toutes les parcelles en 2019.

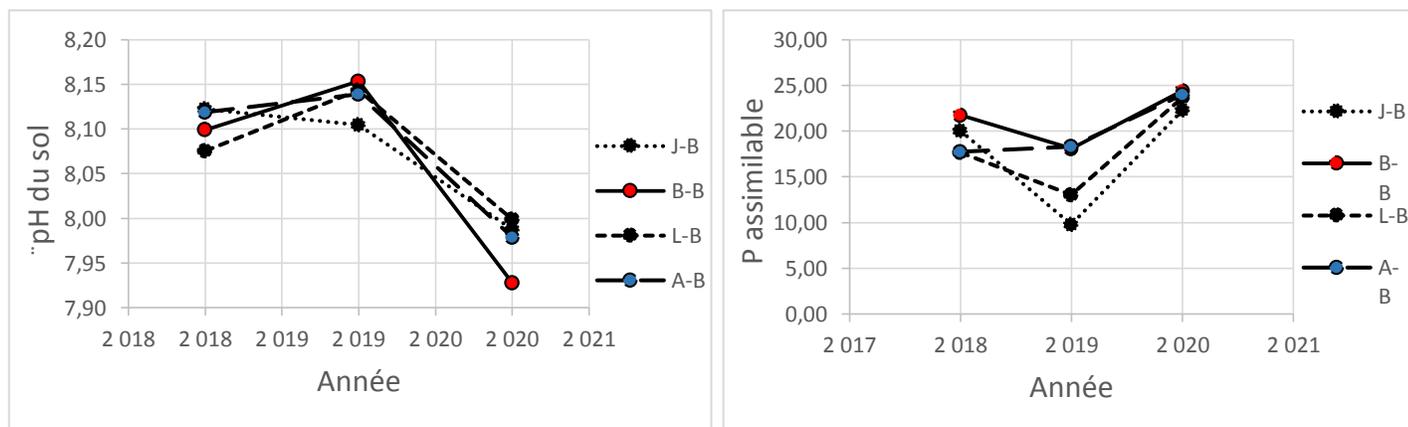


Figure 28 : Evolution du pH du sol (à gauche) et du P assimilable (à droite) en fonction de la rotation culturelle et de l'année.

Discussion

❖ Effet des conditions de l'année sur le rendement et ses composantes

Les résultats obtenus lors de cette étude montrent une grande variabilité des paramètres du rendement et de ses composantes entre les trois années d'expérimentation, ce qui est caractéristique au climat méditerranéen. Dans ce type de climat, la variabilité interannuelle des rendements est liée essentiellement à la variabilité de la pluviométrie (Colecchia *et al.*, 2015 ; Taner *et al.*, 2015, Pagnani *et al.*, 2019).

La pluviométrie obtenue durant le cycle de la culture (Janvier-Juin) durant la campagne 2017-2018 dépasse celle enregistrée durant les 30 dernières années à la même période (350 mm et 264 mm respectivement). Les mois de Novembre et Décembre étant suffisamment pluvieux pour permettre un bon emmagasinement de l'eau pour le démarrage de la culture et ainsi prévenir l'insuffisance pluviométrique enregistrée aux mois de Janvier et Février (23 mm et 33 mm respectivement). Les pluies particulièrement fréquentes enregistrées durant les mois de Mars et Avril (99 mm et 131 mm respectivement) coïncident avec les stades critiques de la formation du rendement (épiaison, floraison et remplissage du grain). Ces conditions favorables nous ont permis d'obtenir les rendements les plus élevés qui sont d'environ 40 q ha⁻¹ en moyenne.

En 2018-2019, le cumul pluviométrique enregistré durant le cycle de la culture (Décembre-Juin) a suivi les données de long terme (321 mm et 331 mm respectivement). La distribution de cette pluviométrie est, toutefois, différente de l'année précédente, étant marquée par un hiver pluvieux (121 mm au mois de janvier) et un printemps assez sec (41 mm et 32 mm au mois de Mars et Avril respectivement). Cette irrégularité a entraîné une chute de la densité d'épis à presque la moitié de celle obtenue l'année d'avant, ce qui est dû à une baisse importante de la levée et du tallage. Cela a entraîné une réduction des rendements obtenus d'environ 50 % (19 q ha⁻¹ en moyenne). La pluviométrie du début de cycle a entraîné des inondations parfois de longues durées sur la plupart des parcelles qui sont mal drainées à cause de la texture lourde du sol (54% d'argile), cela a induit une réduction de la levée et de la croissance des plantes. Selon Mackay et Barber (1985), une augmentation excessive de l'humidité du sol, en particulier dans les stades jeunes de la culture, induit une diminution de tallage et de la longueur des racines ce qui affecte le peuplement d'épis au mètre carré. D'autre part, la mauvaise qualité du lit de semences du sol travaillé dans des conditions humides a engendré une couverture partielle des graines au semis entraînant beaucoup de pertes à la levée. Cela s'est négativement répercuté sur le peuplement épis au mètre carré et par la suite sur le rendement en grain. Selon, Keller *et al.*, (2007), il est important de réaliser les opérations de travail du sol dans des conditions optimales

d'humidité du sol, car si le sol est travaillé dans des conditions humides, de grosses mottes peuvent être produites et la structure du sol ainsi que la levée des graines peuvent être endommagées. Sur les parcelles de SD, l'humidité élevée et le mauvais drainage du sol au semis ont également gêné l'opération de semis laissant une partie des graines non couvertes, ce qui a entraîné une baisse de la germination et de la levée durant cette année. Ceci est en accord avec les observations faites par López-Bellido *et al.*, (2000) et Colecchia *et al.*, (2015) qui notent une baisse de la levée dans le système de SD lorsque le semis est fait dans des conditions du sol humide à cause de la non couverture des graines.

La campagne 2019-2020 était la plus sèche où seuls 249 mm sont enregistrés le long du cycle de la culture (Décembre-Juin), avec une baisse d'environ 25 % par rapport aux données de 30 ans. Cette dernière année est caractérisée par des mois de Janvier et Février très secs (37 mm et 0 mm respectivement), et des mois de Mars et Avril assez pluvieux (70 mm et 69 mm respectivement), mais chauds. Malgré ce printemps humide par rapport à l'année de 2018-2019, les rendements moyens obtenus sont les plus faibles et ne dépassent pas 12 q ha⁻¹ en moyenne.

La baisse des rendements observée durant cette année est due essentiellement à la baisse de la fertilité de l'épi et du poids de 1000 grains provoquée par une augmentation des températures durant le stade floraison-début remplissage du grain. La densité d'épis n'étant pas significativement différente de celle de l'année précédente grâce à une levée plus homogène et un bon tallage dus à un emmagasinement important de l'eau durant le mois de Novembre (97 mm) et des meilleures conditions de semis. Il est bien connu que la température affecte le rendement en modifiant la durée et le taux de remplissage des grains de blé (Ferreira, 2011). Les températures optimales qui permettent un rendement maximum de la culture de blé sont comprises entre 15 et 20°C (DuPont et altenbach, 2003, Ercoli *et al.*, 2010). Hors, les températures journalières maximales à la première semaine du mois de mai 2020 qui coïncide avec les stades de la floraison-début de remplissage du grain ont varié de 24 à 34 C° par rapport à des températures de 16 à 20 C° et de 14 à 24 C° durant la même période en 2018 et 2019 respectivement. Selon Cosentino *et al.*, (2019), une température supérieure à 31 C° au moment de la floraison et au début de remplissage du grain peut diminuer le rendement de 3,7 q ha⁻¹ et le poids de 1000 grains de 11,7 mg. Ces températures élevées ont aussi accentué l'évaporation de la pluie interceptée, ce qui a entraîné un épuisement du stock d'eau et a réduit la translocation de la matière sèche vers le grain. Cela s'est traduit par un indice de récolte fortement réduit par rapport aux deux premières années.

❖ Effet des conditions de l'année sur la qualité du grain

La mesure de la qualité du grain effectuée uniquement durant les campagnes 2018-2019 et 2019-2020 montre que lorsque l'année est plus favorable en termes de température et d'humidité, le poids du grain augmente et sa teneur en protéines diminue, et l'inverse est vrai lorsque les conditions climatiques sont défavorables. En 2018-2019, nous avons trouvé une teneur en protéines inférieure à la valeur standard requise dans les marchés ($TP < 12,5\%$) alors que le poids spécifique répondait aux normes ($PS > 80 \text{ kg hl}^{-1}$) (De vita *et al.*, 2007). Alors qu'en 2019-2020, caractérisée par un stress thermique au mois de Mai coïncidant avec les stades de la floraison et de remplissage du grain, nous avons enregistré une augmentation de la teneur en protéines (11,71 % en 2019 contre 13,88 % en 2020), accompagnée d'une baisse du poids spécifique ($83,53 \text{ kg hl}^{-1}$ en 2019 contre $77,64 \text{ kg hl}^{-1}$ en 2020) et du poids de mille grains (43,79 g en 2019 contre 39,04 g en 2020). Ces résultats sont en accord avec ceux de Ali *et al.*, (2019) et Colecchia *et al.*, (2015), qui rapportent une corrélation négative entre la qualité de la graine et son poids. Nos résultats sont aussi en accord avec ceux de Gooding *et al.*, (2003) ; Del Moral *et al.*, (2007) ; Dinelli *et al.* (2013) ; Li *et al.* (2013) ; Talukder *et al.* (2014) et Cosentino *et al.* (2019) qui notent qu'un stress thermique au stade remplissage du grain augmente significativement la teneur en protéines du grain et réduit sa taille. Cosentino *et al.* (2019) précisent qu'une augmentation de la température de $5,5 \text{ C}^\circ$ entraîne une augmentation de la teneur en protéines dans le grain de 1,3 %.

L'augmentation de la teneur en protéines dans les conditions climatiques défavorables (température élevée et humidité réduite) est due à la réduction de l'accumulation d'amidon. Gooding *et al.*, (2003) et Del Moral *et al.* (2007) expliquent que l'augmentation de la teneur en protéines dans le grain de blé dur en condition de sécheresse résulte du fait que la quantité d'azote dans le grain reste constante pendant que l'accumulation d'amidon soit fortement réduite. L'amidon est le principal composant du grain du blé dur et représente 60 à 75% du poids sec final du grain (Zhao *et al.*, 2009). Cependant, l'accumulation de ce dernier est réduite lors d'un stress hydrique ou thermique subi en particulier au début de la période de remplissage du grain, se traduisant généralement par une réduction du poids des grains (Kobata *et al.*, 1992). Zhao *et al.* (2009) affirment que 65,5% du poids final de l'amidon dans les grains de blé est accumulée au cours de la toute dernière phase de remplissage du grain. La photosynthèse fournissant la plus grande partie de ces hydrates du carbone (Arduini *et al.*, 2006 ; Alvaro *et al.*, 2008). Cependant, 66-82% des protéines accumulées proviennent de la remobilisation de l'azote stocké avant la floraison, ce qui permet une production stable en protéines même dans des conditions d'humidité et de température défavorables (Ehdaie et Waines, 2001). Ainsi,

dans des conditions chaudes et sèches survenant pendant le remplissage des grains, le taux de photosynthèse réduit provoque une limitation de la formation de nouveaux assimilats, affectant le taux d'amidon, mais pas celui des protéines (Hafsi *et al.* 2007 ; Alvaro *et al.* 2008).

La quantité de pluie survenue durant la période végétative peut également affecter la concentration en protéines dans le grain de blé dur. Selon Colecchia *et al.* (2015), une quantité de pluie de 250 mm au début de la saison de croissance peut conduire à une lixiviation de l'azote minéral du sol pendant cette période. Cela peut provoquer une carence en azote durant la phase de remplissage du grain, induisant une réduction de la teneur en protéine. Dans notre étude, 248 mm de pluie sont enregistrée au début de la campagne de 2018-2019, ce qui peut être, en partie, à l'origine de la faible teneur en protéines trouvée durant cette année. Des observations similaires sont également faites par Alijani *et al.* (2012), Campiglia *et al.* (2015) et ali *et al.* (2019), qui ont tous signalé une diminution de la concentration en protéines du grain en raison des hivers pluvieux.

❖ Effet des systèmes de travail du sol sur le rendement et la qualité du grain

Les systèmes de travail du sol comparés n'ont pas eu d'effet significatif sur la productivité du blé dur sur l'ensemble des trois années de l'étude. Tandis que durant l'année 2019-2020, le semis direct a donné des rendements en grain et en biomasse sèche significativement meilleurs que ceux obtenus par le TM et le TC. Ces résultats sont en accord avec la plupart des études menées dans des conditions semi-arides, qui indiquent que le travail conventionnel du sol affecte positivement le rendement pendant les années humides, tandis que durant les années sèches, les systèmes de non-labour (SD et TM) donnent de meilleurs rendements (Lopez-Bellido *et al.*, 1998 ; De vita *et al.*, 2007 ; Mazzoncini *et al.*, 2008 ; Amato *et al.*, 2013 ; Colecchia *et al.*, 2015 ; Taner *et al.*, 2015 ; Woźniak et Stępniewska, 2017 ; Pagnani *et al.*, 2019).

En conditions méditerranéennes, De Vita *et al.* (2007) trouvent une relation étroite entre le rendement obtenu dans chaque système de travail du sol et la pluviométrie au cours du cycle de la culture. Ces mêmes auteurs, notent qu'au-delà de 300 mm de pluie, le travail conventionnel donne des rendements plus élevés par rapport au semis direct et *vice-versa*. Cependant, dans les deux premières années de notre étude (2017-2018 et 2018-2019) où la pluviométrie a dépassé 300 mm, le rendement, ainsi que ses principales composantes obtenus par le système de TC ont été similaires à ceux des systèmes de TM et de SD. A la troisième année (2019-2020), par contre, où la pluviométrie était inférieure à 300 mm (249 mm), le SD a donné un rendement significativement meilleur que ceux obtenus par les deux autres systèmes.

En 2017-2018, la levée était significativement plus faible dans les parcelles de SD par rapport au TM et au TC, ce qui est dû principalement aux mauvaises conditions de semis (humidité du sol élevée) qui ont négativement affecté la germination dans le sol non travaillé, sans que cela affecte le peuplement en épis et le rendement en grain qui restent statistiquement similaires dans les trois systèmes de travail du sol. Ceci est en accord avec les observations de Morris *et al.* (2010) ; Soane *et al.* (2012) ; Arvidsson *et al.* (2013) et Colecchia *et al.* (2015). Ces auteurs ayant tous trouvé une faible densité de plantes dans un système de SD, s'accordent qu'il y a une plus faible germination dans ce système par rapport à un travail conventionnel à cause de la non-couverture des semences induite par une plus forte compaction du sol due aux passages répétitifs des engins. Nos résultats sont, par contre, en désaccord avec Colecchia *et al.* (2015) qui trouvent une interférence de la mauvaise germination dans le système de SD sur le nombre d'épis au mètre carré. La baisse de la densité de plantes dans le système de SD a entraîné une réduction non significative mais importante du rendement en biomasse sèche et en paille, ce qui peut être due à une plus faible disponibilité de l'azote (N) dans les parcelles SD. Lopez-Bellido *et al.* (2000) et Ruisi *et al.* (2016) affirment que la minéralisation de l'azote est plus lente dans les sols non travaillés, et sa perte par ruissellement de surface est très fréquente en raison de son application en surface, par conséquent, Amato *et al.* (2013) recommandent une augmentation de la dose d'azote appliquée en semis direct. Le poids de mille grains sous système de SD (49,83 g vs 45,61 et 44,65 g par le TC et le TM respectivement) a permis de compenser les pertes à la germination, et à aboutir à un rendement en grain égal ceux des deux autres techniques. Cela est dû à la sénescence tardive des feuilles due à un stock d'eau plus important dans le sol non travaillé (Kitonyo *et al.*, 2017 ; Gawęda et Haliniarz, 2021).

Durant l'année sèche de 2020, le SD a donné une densité en épis et un rendement en grain significativement meilleurs que les deux autres systèmes. Durant cette année, le semis a été effectué dans des conditions d'humidité plus adéquate (meilleur drainage du sol), ce qui a entraîné une meilleure levée dans ce système. A cela s'ajoute la sécheresse enregistrée après le semis aux mois de Janvier et Février qui a entraîné une baisse de tallage dans les systèmes de TM et de TC, mais pas dans les parcelles de SD qui ont emmagasiné suffisamment d'eau grâce à la couverture végétale. Cela s'est positivement répercuté sur la densité en épis dans ce système conduisant à des rendements plus importants. Un meilleur tallage sous SD a été également rapporté par Mekhlouf *et al.*, (2011), Abdellaoui *et al.*, (2011) et Fellahi *et al.*, (2013). Mekhlouf *et al.*, (2011) expliquent que l'avantage du semis direct est lié à la régularité de la profondeur du semis, un meilleur emplacement des fertilisants et une bonne adhérence de la graine avec le sol.

La qualité du grain n'a pas varié significativement entre les différents systèmes de travail du sol pendant les deux années où les paramètres de qualité ont été mesurés (2018-2019 et 2019-2020), sauf pour la vitrosité du grain. Des teneurs en protéines similaires ont été observées dans les différents traitements, ce qui est en accord avec les résultats d'Amato *et al.* (2013) ; Taner *et al.* (2015) ; Woźniak et Stępniewska (2017) ; Calzarano *et al.* (2018) et Souissi *et al.* (2020) et en désaccord avec ceux de De Vita *et al.* (2007) et Pagnani *et al.* (2019) qui trouvent des teneurs en protéines plus élevées dans le SD en conditions de sécheresse, et ceux de Woźniak *et al.* (2014) ; Colecchia *et al.* (2015) ; Ali *et al.* (2019) et Chaieb *et al.* (2020) qui notent une supériorité du TC en conditions humides.

D'autre part, la vitrosité du grain a significativement varié avec les systèmes de travail du sol, étant plus faible dans le TC par rapport aux systèmes de travail du sol de conservation (TM et SD) durant l'année 2018-2019, ce qui est du probablement à un lessivage d'azote à cause des fortes pluies enregistrées au début de la saison. Le poids spécifique et le poids individuel des grains sont corrélés et sont plus affectés par l'année que par le travail du sol ou la rotation (Woźniak et Stępniewska, 2017). Malgré le fait que le système de semis direct a enregistré un PMG plus important dans chaque année individuellement et dans la moyenne des trois ans, cette supériorité est, toutefois, non significative. Statistiquement, les trois systèmes de travail du sol ont donné des PMG et des PS similaires, ce qui est en accord avec les résultats de Taner *et al.* (2015) ; Colecchia *et al.* (2015) et Calzarano *et al.* (2018) et en désaccord avec Gawęda et Haliniarz (2021) qui trouve que le labour conventionnel augmente significativement le poids de la graine.

❖ Effet des rotations culturales sur le rendement et la qualité du grain de blé dur

L'effet des précédents culturaux étudié durant l'année 2018-2019 a été significatif sur le rendement et la teneur en protéines de la culture de blé dur suivante. Les précédents jachère et lentille étant plus favorables à la formation du rendement, suivis du précédent avoine fourrage. Alors que la monoculture de blé a enregistré le rendement le plus faible, cela est dû, selon Sieling et Christen (2015), à une plus grande incidence de maladies dans une rotation céréale/céréale. Il est connu que le blé cultivé en monoculture produit moins que le blé cultivé après une légumineuse ou une culture fourragère (Woźniak *et al.*, 2014). L'effet positif du précédent lentille sur le rendement de la culture de blé suivante est dû à une meilleure disponibilité de l'azote grâce à la faculté de ce type de cultures à fixer le N₂ de l'atmosphère (Gawęda et Haliniarz, 2021). En raison de sa plus lente minéralisation, l'azote des légumineuses est utilisé plus efficacement que l'azote des engrais chimiques (Lenssen *et al.*, 2013). Plusieurs autres auteurs ont observé une augmentation du rendement après une culture de

légumineuse (Amato *et al.*, 2013 ; Woźniak *et al.*, 2014 ; Calzarano *et al.*, 2018 ; Woźniak, 2019 ; Souissi *et al.*, 2020 ; Gawęda et Haliniarz, 2021). Angus *et al.* (2015) trouvent que l'augmentation du rendement peut atteindre jusqu'à 12 q ha⁻¹. Cela est dû non seulement au N₂ fixé biologiquement, mais également à d'autres facteurs, notamment, une augmentation de la fertilité du sol en raison d'une augmentation du carbone organique (Robertson *et al.*, 2015 ; Venkatesh *et al.*, 2017). Les résidus des légumineuses sont très riches en éléments nutritifs et leur maintien dans le sol pourrait réduire le besoin d'une fertilisation supplémentaire pour les céréales suivantes. D'autre part, l'effet positif de la jachère sur le rendement durant cette année est dû essentiellement à la qualité du lit de semences obtenue, où le travail du sol dans des conditions optimales au mois d'Avril de l'année précédente dans les parcelles de la jachère travaillée a augmenté le nombre de plantes levées et par la suite le nombre d'épis au mètre carré par rapport aux autres types de rotation. De plus, la jachère a permis de réduire l'infestation en mauvaises herbes par rapport aux autres types de rotation, réduisant la concurrence à l'obtention des éléments nutritifs, particulièrement, dans les parcelles de la jachère chimique, ce qui a permis d'avoir un poids de mille grains plus important et par la suite un rendement en grain plus important.

Le précédent lentille a augmenté de façon significative la teneur en protéines dans le grain ce qui est similaire aux résultats de Woźniak *et al.* (2014) avec un précédent petits pois, Amato *et al.* (2013) avec les précédents fève et bersim et Gawęda et Haliniarz (2021) avec le précédent soja. Cette augmentation de la concentration des protéines dans le grain est due aussi à la meilleure disponibilité de l'azote.

Quoique l'effet du travail du sol soit non significatif sur le blé dur durant l'année (2018-2019), on a pu remarquer une différence de 5 q ha⁻¹ entre le blé conduit après la lentille dans le système de SD par rapport à la même rotation dans le système de TC. Cela est dû à une meilleure activité biologique dans les sols non perturbés, ainsi qu'à la dégradation progressive des résidus maintenus de la culture de lentille sur la surface du sol. Giambalvo *et al.* (2012) trouvent que le pouvoir de la fixation de N atmosphérique par les légumineuses est aussi amélioré à long terme par l'adoption du système de semis direct.

❖ Effet des systèmes de travail du sol et des rotations des cultures sur la disponibilité du phosphore dans le sol et la nutrition phosphatée de la culture de blé dur

Nos résultats montrent que les systèmes de travail du sol étudiés n'ont eu aucun effet sur la disponibilité du P dans le sol durant trois années d'étude, au début de la transition du système de labour conventionnel au système de semis direct. La variation du phosphore assimilable étant

généralement associée à la fertilisation phosphatée appliquée l'année d'avant et aussi à l'utilisation du P par la culture précédente. Ceci est en accord avec les constatations d'Oehl *et al.* (2002) qui montrent que la disponibilité du P dans l'horizon de surface est liée directement au bilan entrées/sorties de P sur la parcelle et indirectement au système de culture. Cependant, plusieurs études ont montré que les systèmes de non labour ont un effet significatif sur la distribution du P dans le sol et qu'il y a une accumulation de P sous ses différentes formes (totale, organique, et assimilable) dans les horizons de surface dans les sols non labourés (Grant and Lafond, 1994; Holanda *et al.*, 1998 ; Selles *et al.*, 1999; Borie *et al.*, 2000 ; Mallarino et Borges, 2006; Redel *et al.* 2007 ; Baan *et al.*, 2009 ; Tiessen *et al.*, 2010 ; Piegholdt *et al.*, 2013 et Peigné *et al.*, 2018). La non apparition de cette stratification du P à la surface du sol dans notre essai peut être due au fait que l'essai n'avait que 4 ans jusqu'aux derniers prélèvements. Selon Castellini *et al.* (2019), les effets positifs du système de SD sur le rendement et sur la qualité du sol n'apparaissent pas sur le court terme, mais une détérioration de la structure du sol peut apparaître dans les premières années de transition, puis une amélioration de la structure du sol commence à se mettre en évidence après 4 à 5 années. Une lixiviation des éléments en profondeur à cause des conditions humides qui ont suivi l'apport de P durant les années 2018 et 2019 peut aussi avoir contribué aux résultats obtenus. Ben moussa-Machraoui *et al.*, (2010) ont constaté une augmentation du P assimilable à une profondeur de 0-20 cm dans des conditions similaires en Tunisie.

Nos résultats montrent que la rotation culturale n'a pas eu d'effet, ni sur le pH du sol, ni sur la teneur en P assimilable dans l'horizon de surface (0-10 cm). Des variations de pH ont été constatées sans, pour autant, qu'elles soient significatives. Ceci est en contradiction avec la littérature, où des études comparant différents types de cultures sur le sol ont rapporté des variations dans la rhizosphère du sol à cause de la différence de leurs systèmes racinaires (Nuruzzaman *et al.* 2005a ; Redel *et al.*, 2007 ; Maltais-Landry, 2015). Des comparaisons entre les systèmes de rotation des cultures et de monoculture ont montré que les activités enzymatiques sont plus sensibles aux effets positifs de la polyculture (Melero *et al.*, 2011). La présence d'une culture de légumineuses dans la rotation augmente les valeurs d'activité enzymatique du sol, car le système racinaire des cultures de légumineuses peut sécréter plus activement des quantités plus élevées d'exsudats que celui des cultures non légumineuses, cela entraîne à long terme une acidification du sol et un changement de sa composition (Sainju *et al.*, 2006). De même, la présence d'une culture mycorrhizable telle que l'avoine et le lupin entraîne une augmentation de la libération du P assimilable dans le sol (Redel *et al.*, 2007).

En se basant sur la bibliographie, nos hypothèses suggéraient que la monoculture devrait avoir un effet négatif sur la présence des éléments, notamment, le P dans le sol. Cependant, nous avons

obtenus des teneurs en P assimilable statistiquement similaires avec les autres types de rotations. Selles *et al.* (1999) notent qu'un apport continu des fertilisants (N et P) dans un système de monoculture, réduit considérablement l'épuisement des réserves en ces éléments par rapport à une jachère. Dans notre étude la jachère a enregistré une réduction des teneurs en P, particulièrement, durant l'année 2018-2019, sans que cette réduction ne soit significative. Cela est dû à la perte des éléments par érosion et à l'absence de la fertilisation phosphatée durant l'année de la jachère.

Sur les trois années de notre étude, le système de SD a affecté significativement la teneur en P dans la paille de blé. Ceci, est en accord avec les résultats de Mazzoncini *et al.* (2008), qui trouvent une meilleure concentration de P dans la paille de blé conduit avec le système de SD par rapport au TC dans 9 sur 10 ans d'expérimentation. Cette amélioration de la concentration de P dans le système de SD ne peut pas être attribuée à une meilleure disponibilité de P dans le sol, car, le SD a enregistré les teneurs en P disponible les plus faibles sur les trois années de l'étude. Cette augmentation est probablement due à une augmentation de l'activité biologique, notamment, la colonisation des racines des céréales par les mycorhizes (Miller *et al.*, 1995 ; Doran *et al.*, 1998; Mozafar *et al.*, 2000; Borie *et al.*, 2002; Redel *et al.*, 2007, Jaziri *et al.*, 2022). Jaziri *et al.*, (2022) affirment que le système de SD augmente la colonisation des racines du blé de 13,5 % par rapport à 12,7 et 12,3 % obtenus par les systèmes de TM et du TC respectivement, et que cette augmentation est plus importante et significative lorsque le SD est associée avec une rotation comportant une culture de légumineuse (fève-blé dur-orge). Aussi, le stock d'eau dans les parcelles de SD entraîne une continuation de l'absorption des éléments dans ce système par rapport au système conventionnel. Ces éléments, notamment le P, ne seront, par contre, pas transmis en totalité vers le grain, mais ils restent condensés dans la paille, ce qui explique en partie l'égalité des teneurs en P dans le grain dans les trois systèmes de travail du sol. D'autre part, les grains issus du système de SD sont plus gros (le PMG est plus important dans le SD) par rapport aux autres systèmes, ce qui entraîne une dilution des éléments comme le phosphore. Ces résultats sont en contradiction avec ceux de Miller *et al.* (1995) et Mozafar *et al.* (2000), qui ont trouvé une augmentation des teneurs en P dans le grain de blé dur dans le système de SD par rapport à un travail conventionnel du sol, et en accord avec ceux de Mazzoncini *et al.* (2008) qui ne trouvent aucun effet des systèmes de travail du sol sur ce paramètre dans un essai de 10 ans au sud de l'Italie.

Durant l'année 2018-2019, les rotations de cultures ont eu un effet significatif sur les teneurs en P dans le grain et dans la paille. La rotation J-B a entraîné une réduction significative de la teneur en cet élément dans la plante, ce qui est dû aux plus faibles teneurs en P assimilable dans les parcelles du précédent jachère durant cette même année et aussi à la faible activité biologiques dans les parcelles

non cultivées. Jansa *et al.* (2006) affirment que la densité des spores et d'hyphes sont généralement plus faibles dans les sols nus ou dans les sols plantés avec des cultures non mycorhiziennes telles que le colza, que dans les sols cultivés avec des espèces mycorhiziennes telles que le maïs, l'avoine, et lupin blanc.

Conclusion

Les résultats de la première partie de cette étude, qui avait comme objectif de comparer l'effet de trois techniques de travail du sol (TC, TM et SD) et de quatre rotations de cultures (J-B, B-B, L-B et A-B) sur le rendement, la qualité du grain et la nutrition phosphatée d'une culture de blé dur dans la région semi-aride d'El Hachimia (Bouira), nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Le rendement ainsi que la qualité du grain de blé dur sont fortement liés aux conditions climatiques de l'année, notamment, la pluviométrie et la température. Cela nous emmène à recommander des semis précoces afin de pouvoir échapper aux stress hydrique et thermiques qui peuvent survenir durant les stades les plus critiques de la formation du rendement (floraison et remplissage du grain).
- Dans les conditions pédoclimatiques de la région d'étude et des régions qui présentent des conditions similaires, le système de SD est une alternative durable qui peut garantir des niveaux de production similaires à ceux de TM et du TC dans les conditions favorables (années humides) et des niveaux significativement supérieurs durant les conditions défavorables (années sèches), avec un gain important de temps et d'énergie utilisés pour le travail.
- De cette étude, il ressort aussi que, le système de monoculture est une mauvaise option affectant négativement la production et la qualité du grain de blé dur, et que le précédent légumineuse (lentille) est le meilleur précédent à préconiser dans la région, ayant un effet positif à la fois sur le rendement, la qualité du grain et la nutrition phosphatée de la culture de blé dur lui succédant.
- Nos résultats montrent que la nutrition phosphatée de la culture de blé et la teneur en P dans les 10 premiers centimètres du sol ne varient pas selon le type de travail du sol durant les premières années de transition et qu'il faut attendre probablement plus longtemps pour commencer à percevoir les effets attendus. La rotation culturale affecte significativement ces paramètres, la jachère étant une mauvaise option induisant des concentrations en P dans le grain et dans la paille significativement réduites, et ce à cause de la vulnérabilité du sol à l'érosion et à la perte des éléments nutritifs.

Partie II :

**Réponse de la culture de blé dur à la
fertilisation phosphatée sous différents
systèmes de culture**

Introduction

Le phosphore (P) est l'un des principaux éléments dont les plantes ont besoin pour leur croissance, son rôle dans la stimulation du tallage et le développement des racines est bien reconnu. Cependant, sa carence devient une menace sérieuse pour la production végétale dans le monde (Kopinski et Jurga, 2016). Malgré le fait que les engrais phosphatés sont apportés en grandes quantités chaque année, environ 80 % du P apporté est bloqué sous forme de précipités insolubles, et ce à cause de son adsorption sur les constituants portant des charges positives, tels que les oxydes métalliques, les argiles et les matières organiques (Hinsinger *et al.*, 2015).

Une fertilisation réussie nécessite une étude approfondie du type de sol, des besoins de la plante et des caractéristiques de l'engrais à utiliser. Cela va permettre une meilleure application de la règle des 4R " the Right fertilizer product in the Right rate, at the Right time and in the Right place" en français : "le bon engrais au bon dosage, au bon moment et au bon endroit " (Grant et Flaten, 2019). Il est connu que la distance de distribution des engrais phosphatés dans le sol diffère d'un engrais à un autre (Lu *et al.*, 2019). Le choix d'un produit à fort mouvement et à solubilité progressive dans le temps est un élément important de sélection (Cordell et White, 2013). De plus, une application précoce de P est nécessaire pour un bon démarrage de la culture. Grant *et al.* (2001) indiquent qu'une carence survenant durant les quatre premières semaines du développement de la culture de blé induit une réduction irréversible du volume des racines, du nombre de talles et du rendement en biomasse. Sander *et al.* (1990) et Rashid *et al.* (2010) ont constaté que dans un sol carencé en P, une application d'engrais en bande près de la graine est deux fois plus efficace que son application superficielle. Dans les sols à faible teneur en P, une augmentation de la dose d'engrais phosphaté a un effet positif sur le rendement de la culture de blé (May *et al.*, 2008 ; Rashid *et al.*, 2010), mais au-delà d'un niveau défini, une application supplémentaire du phosphore ne conduit pas à un gain de rendement mais parfois à sa perte (Rashid *et al.*, 2010). Une fertilisation excessive entraîne un surplus de P dans le sol, au-delà des besoins de la plante, conduisant à des pertes de P par lixiviation et érosion, ce qui rend cette fertilisation économiquement non rentable (Kopinski et Jurga, 2016).

L'intensification de l'agriculture a conduit à simplifier considérablement les systèmes de culture, le cas le plus extrême étant la monoculture (Gaba *et al.*, 2015). Cependant, une diversification des cultures dans le temps et dans l'espace reste le moyen le plus efficace pour la gestion des ressources en éléments, notamment le P (Hinsinger *et al.*, 2015). Selon Johnston *et al.* (2014), une mobilisation des résidus de P issus d'applications antérieures d'engrais est possible par l'introduction de certaines

cultures, notamment, les légumineuses. Ces cultures sont connues pour avoir la capacité de mobiliser les formes de P insolubles dans le sol, soit avec leurs exsudats racinaires, ou en développant des symbioses avec des microorganismes solubilisateurs de P tels que les champignons mycorrhiziens et certaines espèces bactériennes. Il a été démontré que les cultures de légumineuses augmentent la disponibilité du P pour d'autres cultures, y compris les céréales cultivées en association (Betencourt *et al.*, 2012 ; Latati *et al.*, 2014) ou en rotation (Nuruzzaman *et al.*, 2005a ; Rose *et al.* 2010 ; Mat Hassan *et al.* 2013 ; Doolette *et al.*, 2019).

Dans les conditions semi-arides du Nord de l'Algérie, la carence en P est très fréquente. Dans une enquête réalisée en 2019, dans la région d'El Hachimia où la présente étude a été menée, la teneur moyenne en P des sols a été trouvée à environ 42 kg P ha⁻¹ ce qui est considéré comme très faible selon Allaire et Angers (2011). Par conséquent, une fertilisation en P a été pour longtemps recommandée dans la région. Cependant, le fort potentiel de fixation de P des sols dû à leur nature calcaire, et les faibles niveaux de productivité de la culture du blé dur dus principalement au manque d'eau, nous amènent à considérer l'efficacité d'une fertilisation phosphatée de la culture de blé dur dans ces zones céréalières semi-arides. Un autre problème de l'agriculture algérienne est le manque du matériel agricole adéquat, tels que les semoirs combinés qui, à la fois, minimisent le nombre de passages de tracteurs (minimisation de l'énergie et du travail), et augmentent l'efficacité d'utilisation des engrais par un apport localisé de ces derniers.

Peu de recherches ont été faites sur la dose et le type d'engrais P qui devrait être appliqué dans les conditions semi-arides du nord de l'Algérie, et aucune à notre connaissance n'a examiné l'effet des méthodes d'application (épandage superficielle vs l'apport localisé) et de la rotation légumineuse-blé sur la réponse du blé dur à une fertilisation phosphatée.

Ainsi, l'objectif de cette étude est de fournir aux agriculteurs des conseils fiables et corrects leur permettant de placer les cultures dans une situation où la nutrition en phosphore n'est pas un facteur limitant, tout en répondant à certaines questions fréquentes relatives à l'optimisation de la fertilisation phosphatée :

- ✓ Dans les conditions de la région de l'étude, la fertilisation phosphatée est-elle nécessaire ?
- ✓ A quel point les semoirs combinés sont-ils indispensables pour l'efficacité de la fertilisation en P ?
- ✓ Les systèmes de cultures doivent-ils être pris en considération dans la gestion d'une stratégie de fertilisation phosphatée ?

Pour répondre à ces questions, l'effet de trois doses d'engrais P ($0 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, $30 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ et $60 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) appliquées selon deux modes : localisé (appliqué sous forme de bandes sous la ligne de semis) et non localisé (appliqué superficiellement puis mélangé à une profondeur de 5 cm avant le semis), sur le rendement et la nutrition phosphatée du blé dur cultivé dans différents systèmes de culture (monoculture et rotation lentille-blé) a été étudié dans les conditions semi-arides pluviales du nord de l'Algérie.

Chapitre I : Bibliographie

1. Importance du phosphore

Après l'azote (N), le phosphore (P) est un élément nutritif vital pour la croissance et la productivité des plantes. Sa concentration varie de 0,05 % à 0,5 % du poids sec total des plantes (Malhotra *et al.*, 2018). Le P joue un rôle primordial dans le fonctionnement du métabolisme énergétique et de la biosynthèse des acides nucléiques et des membranes (Beaudin., 2008). Il joue également un rôle important dans la photosynthèse, la respiration et la régulation d'un certain nombre d'enzymes (Raghothama, 1999).

Le phosphore est un élément nécessaire pour le développement des cultures à tous les stades. Sa présence en quantité suffisante est un facteur important pour la germination et l'installation des cultures aux premiers stades de leur développement (Nadeem *et al.*, 2011). Il est aussi nécessaire pour un bon développement racinaire, une maturation uniforme, une floraison précoce et une bonne formation du grain (Malavolta, 1989). Ma *et al.* (2002) qui ont étudié l'effet de la nutrition phosphatée sur la floraison de lupin blanc ont montré que les plantes qui ont reçu de faibles doses de P ont enregistré un nombre de fleurs significativement plus faible et une floraison retardée d'environ 18 jours par rapport aux plantes qui ont été bien alimentées en P. La majorité du P absorbé par les plantes est stockée dans les graines, ainsi, un apport insuffisant de P peut réduire la taille, le nombre et la viabilité des graines (Malhotra *et al.*, 2018). Ma *et al.* (2002) ont noté une réduction significative du rendement et de l'indice de récolte d'une culture de lupin suite à une réduction du poids des grains dans des conditions de déficience en P. De même, le rendement en grain du soja manquant de P a diminué en raison de la réduction du nombre de gousses et de grains formés (Crafts-Brandner, 1992). Il a été estimé que la déficience en P peut réduire jusqu'à 30-40 % des rendements en grain des cultures (Malhotra *et al.*, 2018).

Chez les légumineuses, la présence de P affecte significativement le processus de fixation de N en augmentant la densité des *rhizobia* dans le sol, ce qui favorise l'inoculation des nodules par ces bactéries bénéfiques (Khan *et al.*, 2020). La déficience en P a un impact important sur le taux de fixation d'azote, d'une façon directe en provoquant une réduction des nodules racinaires (Bonetti *et al.* 1984), ou d'une façon indirecte en altérant la croissance et le métabolisme des plantes (Jakobsen, 1985).

2. Effet d'une déficience en P

Bien que la quantité totale de P dans le sol soit parfois élevée, il est souvent présent sous des formes qui ne sont disponibles qu'en dehors de la rhizosphère (Schachtman *et al.*, 1998). Dans de nombreux systèmes agricoles, le prélèvement du P appliqué au cours d'une saison de croissance est très faible, car dans le sol, plus de 80 % du P devient immobile et non disponible pour l'absorption par les plantes en raison de l'adsorption, de la précipitation ou de la transformation en forme organique (Holford, 1997). Le cycle de P dans le sol (figure 29) étant très compliqué, la déficience en P est très fréquente et elle est considérée comme un des défis majeurs de l'agriculture, particulièrement, dans les zones fragiles telles que les zones semi-arides (Rashid *et al.*, 2010).

Dans des conditions de faible teneur en P, la plante apparaît chétive avec un feuillage vert foncé et une surface foliaire réduite, les feuilles plus âgées acquièrent une pigmentation violacée en raison de la synthèse accrue d'anthocyanes (Malhotra *et al.*, 2018).

Lorsque les plantes sont soumises à une déficience externe en P, une inhibition irréversible de la croissance est souvent rapidement observée (Grant *et al.*, 2001 ; Veneklaas *et al.*, 2012). Un arrêt de la croissance des feuilles de maïs est directement enregistré lorsque les plantes sont soumises à une privation de P notent Mollier et Pellerin (1999). En raison de la réduction de la surface foliaire, les mêmes auteurs trouvent que la capacité des plantes à intercepter la lumière a été sévèrement réduite et le processus de photosynthèse a été négativement affecté. Mimura *et al.* (1996) ont de même observé une inhibition sévère de la croissance des feuilles d'orge lorsqu'une déficience en P est survenue, bien que les concentrations des feuilles en P restent suffisantes. Cela indique que la plante commence à économiser le P nécessaire pour ses fonctions vitales et réduit la synthèse des acides nucléiques et la division cellulaire (Malhotra *et al.*, 2018). L'arrêt de la croissance n'est, par contre, pas observé dans la partie racinaire, Mollier et Pellerin (1999) n'ont observé aucune réduction significative dans la masse ni dans le développement des racines latérales chez les plantes de maïs soumises à la privation en P par rapport aux plantes témoins. Par conséquent, une augmentation du rapport poids des racines / poids de la partie aérienne de la plante est souvent noté en cas d'une carence en P (Atkinson, 1973 ; Mollier et Pellerin, 1999; Zhu et Smith, 2001). Souvent, afin d'augmenter la surface absorbante, une modification de l'architecture racinaire se traduisant par une diminution du diamètre des racines et une augmentation de la production des poils absorbants sont observées sous le stress P (Raghothama, 1999). Les poils absorbants ont présenté une plus grande efficacité par rapport au prélèvement de P que les racines cylindriques, leur volume et leur longueur sont corrélés positivement avec la quantité de P prélevée par la plante (Itoh et Barber, 1983 ; Gahoonia *et al.*, 1997). Une autre réponse des

plantes à une carence en P est d'augmenter la colonisation de leurs racines par les mycorhizes. Zhu et Smith (2001) ont trouvé que les pousses de blé issues des graines pauvres en P ont montré une plus grande colonisation par les mycorhizes, cela a significativement amélioré le prélèvement de P au début de leur cycle de croissance. Dans les sols riches en P cet avantage n'est par contre pas remarquable parce que ces champignons sont connus pour leur sensibilité envers des teneurs élevées en P du sol. (Zhu et Smith, 2001 ; Syers *et al.*, 2008). En se basant sur leurs résultats, Graham and Abbott (2000) suggèrent que dans les sols riches en P une colonisation précoce des racines par les champignons mycorhiziens pourrait avoir un effet négatif sur la croissance de blé, par contre, dans des environnements déficients en P cette colonisation devrait aider à surmonter les conséquences négatives de la carence en P durant les premiers stades de développement.

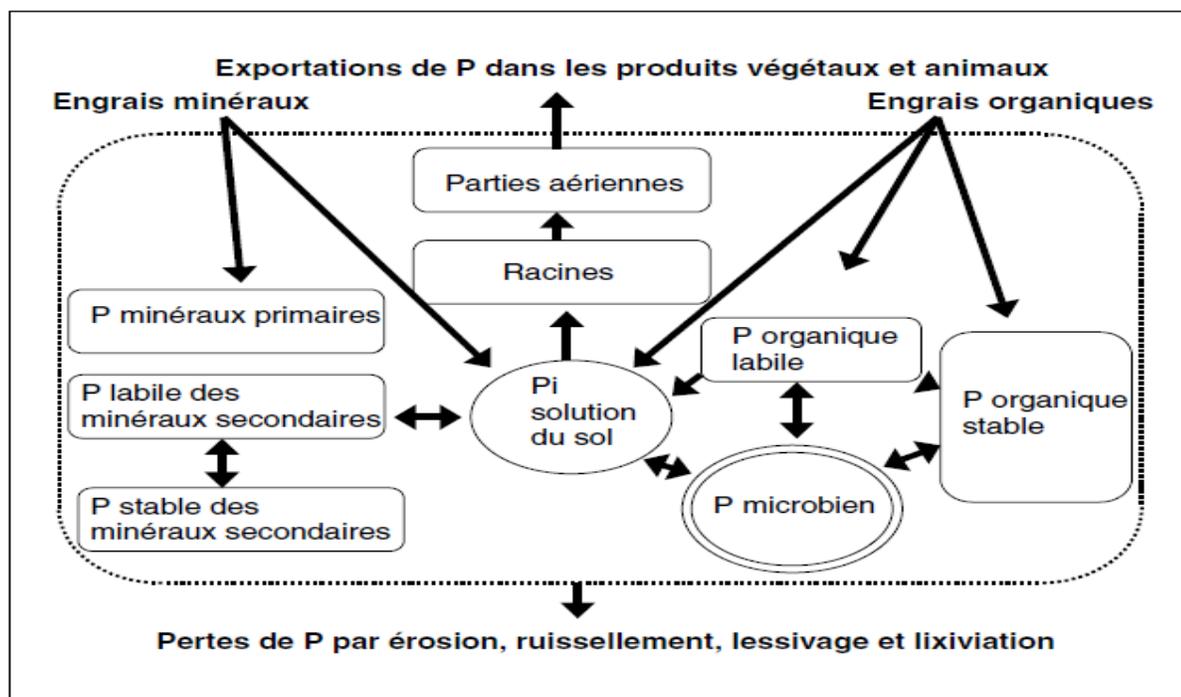


Figure 29: cycle de P dans le système plante, sol, engrais (Frossard *et al.*, 2004)

3. Effet du travail du sol sur la nutrition phosphatée

Dans les systèmes de non-labour où l'incorporation de l'engrais dans le sol est minimale, une stratification du P peut se produire, entraînant une accumulation de cet élément en surface dans le cas d'un épandage superficiel (Holanda *et al.*, 1998). Dans le cas d'une application localisée, les bandes d'engrais P appliqué s'accumulent à la profondeur de semis, et restent intactes pendant plusieurs années, ce qui permet une meilleure disponibilité du P près de la graine (Grant et Bailey, 1998 ; Grant et Lafond, 1994 ; Zibilske *et al.* 2002 ; Mallarino et Borges, 2006). La non perturbation du sol associée

à un épandage localisé de l'engrais P peut améliorer la disponibilité de cet élément à long terme, en ralentissant sa réaction avec le calcium (Ca) et le magnésium (Mg) dans les sols à pH élevé ou avec l'aluminium (Al) et le fer (Fe) dans les sols à pH plus faible (Grant et Flaten, 2019). Alors que, la perturbation du sol, pendant les opérations de travail du sol, peut augmenter le degré de contact entre le P dérivé des engrais et les particules du sol, favorisant ainsi la formation de composés de P insolubles (Phiri *et al.*, 2001).

En plus de l'effet direct sur l'accumulation de P près des racines des plantes, le travail réduit du sol affecte aussi d'une façon indirecte la nutrition phosphatée des cultures, il a été montré qu'il est bénéfique pour une meilleure aération du sol et par conséquent un bon développement racinaire et une bonne nutrition minérale (Syers *et al.*, 2008). L'amélioration des associations mycorhiziennes due à des réseaux mycéliens non perturbés dans un système de travail réduit du sol peut accroître la disponibilité du P pour certaines cultures (Miller, 2000 ; Grant *et al.*, 2005 ; Bittman *et al.*, 2006). Cela s'est traduit par un meilleur prélèvement et de meilleures concentrations en P dans les différentes parties des plantes de maïs, de blé et de soja conduites sous systèmes de non-labour (Miller *et al.* 1995 ; Mozafar *et al.*, 2000 ; Mazzoncini *et al.*, 2008). Cependant, dans des études menées à Manitoba (Canada), l'absorption de P par les plantules de colza (*Brassica* spp.) et de blé (*Triticum aestivum* L.) en début de saison, ainsi que la réponse de l'une ou l'autre de ces cultures à l'application de P n'ont pas été affectée par le système de travail du sol (Grant *et al.*, 2009), ce qui est dû selon ces auteurs à la disponibilité suffisante de cet élément dans le site de leur essai de 6 ans.

4. Effet des rotations de cultures sur la nutrition phosphatée

Il est communément admis que les précédents culturaux affectent la croissance et le rendement des cultures suivantes par plusieurs mécanismes tels que des changements dans les interactions avec les maladies et les mauvaises herbes, dans la qualité biologique et structurale du sol, ainsi que dans la disponibilité des nutriments (Arihara et Karasawa, 2000). Une succession correcte des cultures limite les effets négatifs des champignons pathogènes et des nématodes sur le bon développement des racines qui limitent leur pouvoir de prélever le P (Syers *et al.*, 2008). Beaucoup d'espèces végétales améliorent l'absorption du P en formant des associations mycorhiziennes (Miller, 2000 ; Borie *et al.*, 2002 ; Grant *et al.*, 2005 ; Jansa *et al.*, 2006 ; McGonigle *et al.*, 1999 ; Smith *et al.*, 2011). La colonisation mycorhizienne des racines des cultures peut être réduite si une culture est pratiquée sur une jachère ou après une culture non mycorhizienne comme le colza, le lupin blanc ou la betterave (McGonigle *et al.*, 1999; Arihara et Karasawa, 2000; Miller, 2000 ; Grant *et al.*, 2005).

En l'absence d'une application de P, la pratique de la monoculture à long terme a entraîné des réductions plus importantes du P assimilable que dans un système blé-jachère. Cependant, lorsque le N et le P sont appliqués pour compenser le P exporté dans le grain, la monoculture a augmenté la teneur en P dans le sol par rapport aux systèmes à base de jachère (Selles *et al.*, 1999). Dans les systèmes de culture durables, les rotations constituent une alternative aux engrais chimiques pour la restitution des éléments. Il a été démontré que l'incorporation des cultures accumulatrices de P dans la rotation augmente significativement la disponibilité de P pour les cultures suivantes (Nachimuthu *et al.*, 2009). Les cultures accumulatrices de P ont été définies par Kwabiah *et al.* (2003) comme étant celles qui contiennent plus de 0,3 % de P dans leurs tissus végétaux.

Les légumineuses ont été incorporées avec succès dans les rotations des cultures pour améliorer la disponibilité du phosphore et de l'azote pour les cultures suivantes (Kwabiah *et al.*, 2001 ; Kwabiah *et al.*, 2003). En plus de leur efficacité dans la production et la sécrétion des acides organiques dans la rhizosphère (Raghothama, 1999), et dans l'augmentation du taux d'inoculation par les mycorhizes des céréales suivantes (Alvey *et al.*, 2001), des légumineuses telles que la fève et le pois sont capables de servir comme des puits de P pour les cultures suivantes. Des expériences à court terme conduites dans des pots en serre par Mat Hassan *et al.* (2012), Nuruzzaman *et al.* (2005a) et Nuruzzaman *et al.* (2005b) ont montré que la minéralisation des résidus de ces cultures améliore significativement le statut de P dans le sol et son prélèvement par les céréales suivantes.

5. Effet de la fertilisation sur la nutrition phosphatée

5.1. Forme de l'engrais

Les sources de P organique, telles que les résidus de culture et le fumier animal, ont généralement une faible teneur en P. Ces formes de P doivent être fournies en quantités massives pour obtenir des taux de P adéquats, ce qui rend leur application économiquement irréalisable dans de nombreux endroits et conditions (Chien *et al.*, 2011). Une étude de Nachimuthu *et al.* (2009) conduite en pots a montré qu'une source organique de P (des résidus des légumineuses) n'est pas suffisante pour satisfaire les besoins d'une culture de maïs durant l'année de son application à cause d'une minéralisation très lente. L'engrais organique n'a contribué qu'avec un maximum de 10 % au P prélevé par la plante, alors que les 90 % restant ont été prélevé du sol. Bien que le P provenant des résidus végétaux puisse être plus disponible à long terme (Ryan *et al.* 2008), il est probable que, pendant les premiers stades de croissance, une fertilisation organique basée sur les résidus de légumineuses ne soit pas suffisante pour une bonne nutrition en P dans des sols peu fertiles

(Nachimuthu *et al.*, 2009), par conséquent un mélange avec un engrais chimique pourrait être plus bénéfique.

Un choix approprié de l'engrais phosphaté peut être un moyen important pour augmenter la disponibilité du P dans le sol (Cordell et White, 2013). Le diammonium phosphate (DAP), le monocalcium phosphate (MCP), le monoammonium phosphate (MAP) et le superphosphate simple (SSP) et triple (TSP) sont les produits P commerciaux largement utilisés pour la production végétale (Chien *et al.*, 2011). Bien que tous ces engrais P soient solubles dans l'eau, leur capacité de diffusion dans le sol varie considérablement, ce qui peut avoir une influence sur la disponibilité de P à court et long terme (Chien *et al.*, 2011; Lu *et al.*, 2019). Dans les sols calcaires, Lu *et al.* (1987) trouvent que la performance de SSP est meilleure que le DAP et le MAP. Bell (1968) a classé la capacité de déplacement du P (la distance à laquelle le P diffuse à partir de l'endroit où il a été placé) dans l'ordre suivant : DAP > MAP > MCP. Lu *et al.* (2019) ont trouvé que l'application de MCP à une distance de plus de 5 cm de la graine a induit une carence en P au début de la croissance des plantules de blé, ce qui est dû à une distribution et un développement racinaire limités avant le tallage ne permettant pas d'atteindre la région d'application. La meilleure efficacité de DAP par rapport aux autres types d'engrais phosphatés est due à la présence suffisante d'ammonium. Jing *et al.* (2012) ont constaté que l'application de P avec l'ammonium améliore la croissance des plants de maïs (*Zea mays* L.) en stimulant la prolifération des racines et l'acidification de la rhizosphère par rapport à l'application l'engrais P seul.

Certaines études sur le blé et le maïs indiquent que l'application foliaire de P peut être bénéfique en tant que traitement d'appoint si l'absorption de P provenant du sol est limitée en raison d'un stress hydrique ou d'un faible niveau de P dans le sol (Mosali *et al.*, 2006 ; Girma *et al.*, 2007). Cependant, cet avantage n'a pas été constaté dans les conditions arides du sud Algérien (Deraoui *et al.*, 2016).

5.2. Date d'application

De nombreuses études sur de nombreuses espèces végétales ont montré que l'apport de P en début de saison est essentiel pour obtenir des rendements optimaux (Grant *et al.*, 2001). Une application précoce du P est nécessaire pour la germination et le bon démarrage des cultures (Nadeem *et al.*, 2011). Pendant les premiers stades de croissance, les jeunes plantules dépendent dans une large mesure des réserves de P contenus dans la graine (Atkinson, 1973; Kolawole et Kang 1997 ; White et Veneklaas, 2012 ; Bilal *et al.*, 2019), l'approvisionnement extérieur ayant peu d'effet sur la croissance

(Grant *et al.*, 2001). La durée de la dépendance à cette réserve de P peut être de quelques semaines, tout dépend de la culture (Veneklaas *et al.*, 2012), allant d'une seule semaine pour des pousses de maïs, jusqu'à cinq semaines chez les plantules de blé tendre (Zhu et Smith, 2001; Nadeem *et al.*, 2011).

Même si les cultures n'absorbent que de petites quantités de P au cours des deux ou trois premières semaines de croissance, cette accumulation précoce de P est extrêmement importante (Grant *et al.*, 2001). Dans un sol dont la disponibilité de P est limitée, l'hydrolyse des réserves en P dans la graine permet une croissance racinaire insuffisante pour un bon démarrage de la culture (Nadeem *et al.*, 2011). A ce stade, le placement de l'engrais phosphaté là où les racines entreront en contact avec lui peu après la germination va aider la plante à développer son système racinaire, ce qui va lui permettre d'acquérir les éléments nécessaires du sol durant les stades de croissance ultérieurs (Grant et Flaten, 2019). Une carence en début de croissance peut entraîner des conséquences assez graves. Le maïs a montré une réduction du rendement total et du rendement en grain en raison d'un apport limité de P entre le semis et le stade six feuilles (Barry et Miller 1989). Grant *et al.* (2001) affirment qu'une carence survenue durant les quatre premières semaines de développement d'une culture de blé a induit une réduction irréversible de son volume racinaire, du nombre de talles produites et de son rendement en biomasse.

5.3. Dose d'application

La dose d'engrais P doit être choisie de manière à ce que la culture puisse se procurer du P au moment où elle en a besoin pour optimiser sa croissance. Une analyse du sol doit être faite pour déterminer s'il est nécessaire d'apporter des engrais et estimer la dose d'engrais à appliquer (Ryan *et al.*, 2008). L'analyse du sol permet d'estimer la probabilité moyenne d'une réponse à l'application de P de la culture envisagée, et d'évaluer l'accumulation ou l'épuisement du P d'un champ au fil du temps, mais elle ne permet pas de prédire précisément la quantité de P à appliquer ou si une réponse se produira dans un champ spécifique et une année spécifique (Grant et Flaten, 2019). La réponse d'une culture à une augmentation de la dose de P dépend non seulement de la disponibilité de cet élément dans le sol, mais aussi de son potentiel de production (Grant *et al.*, 2009 ; Zentner *et al.*, 2010), et des conditions climatiques de l'année (Campbell *et al.*, 2005).

Dans des sols sévèrement déficients en P, une application de l'engrais phosphaté affecte grandement la production en biomasse et en grain d'une culture de blé dur (Rashid *et al.*, 2005; Rashid *et al.*, 2010). Cependant, dans des conditions où P ne fait pas défaut, la réponse de cette culture à une fertilisation P est généralement négative (Grant et Bailey, 1998 ; Ryan *et al.*, 2008 ; Grant *et al.*, 2009).

La méthode d'application de l'engrais P peut réduire la dose qu'il faut pour atteindre le niveau maximum de production, selon Rashid *et al.* (2010), une localisation de phosphore apporté dans des bandes localisées près de la ligne de semis est deux fois plus efficace que son application en surface. Dans un sol déficient en P deux variétés de blé dur ont répondu positivement à l'augmentation de la dose de P appliqué, la localisation de P en bandes près du grain étant plus efficace (Grant et Bailey, 1998).

Les légumineuses répondent souvent positivement à une fertilisation en P contrairement aux céréales qui sont plus performantes à acquérir le P nécessaire du sol (Ryan *et al.*, 2008). Sur une culture de lentille, Singh *et al.* (2016) trouvent que le nombre de branches secondaires, et de gousses par plant et le poids de 100 grains augmentent significativement avec l'augmentation de la dose de P appliquée. De même, Ma *et al.* (2002) ont obtenu une amélioration de tous les paramètres de rendement d'une culture de lupin blanc suite à une augmentation de P appliqué, ce qui a eu un effet positif sur le rendement et l'indice de récolte qui est passé de 0,25 avec une dose de 10 mg P kg⁻¹ à 0,35 avec les doses 25, 30 et 40 mg P kg⁻¹. La comparaison de la réponse de différentes variétés de soja à différentes doses de P (0, 20, 30, 40 kg P ha⁻¹) a révélé que le rendement maximal de toutes les variétés a été atteint lorsqu'une dose de 40 kg P ha⁻¹ a été appliquée (Kamara *et al.*, 2008). Dans un sol plus déficient en P, Matusso et Cabo (2015) notent qu'il faut aller à une dose de 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ pour obtenir un rendement en grain et un poids des nodules maximal pour la culture de soja.

5.4. Localisation de l'engrais

Le choix du meilleur positionnement de l'engrais dépend des niveaux de P dans le sol, du taux de P appliqué et des conditions environnementales. L'épandage et l'incorporation de l'engrais P permettent une distribution relativement uniforme du P sur toute la surface du sol, ce qui permet d'obtenir une large zone fertilisée du sol. Cependant, si le P appliqué en surface n'est pas incorporé, il reste sur la surface du sol, ce qui favorise le risque de sa perte dans les eaux de ruissèlement (Grant et Flaten, 2019). Étant donné que le P se déplace principalement vers la zone racinaire par diffusion et que les coefficients de diffusion du P sont très faibles dans le sol, un apport de P près de la graine est nécessaire pour optimiser son absorption par les plantes, en particulier pendant la période de croissance la plus active (McLaughlin *et al.*, 2011). La localisation de l'engrais à proximité de la zone racinaire minimise le contact entre le P appliqué et le sol, ce qui réduit sa fixation et maintient une forme disponible pour les plantes pendant plus longtemps qu'une application superficielle (Fixen, 1992). Par conséquent, l'efficacité d'utilisation de l'engrais P par les plantes est doublée, et une augmentation

significative du rendement des cultures est obtenue (Grant *et al.*, 2009 ; Rashid *et al.*, 2010 ; McLaughlin *et al.*, 2011 ; Farmaha *et al.*, 2012 ; Nkebiwe *et al.*, 2016).

Les conditions environnementales (texture du sol, teneur en P dans le sol et climat), l'espèce et la variété, ainsi que la profondeur et la distance d'application peuvent influencer la réponse des cultures à une fertilisation en P. Lorsque la quantité de l'engrais appliqué est suffisante pour satisfaire les besoins de la culture, le mode d'application a peu d'effet sur l'amélioration de l'efficacité de l'engrais P (Grant et Bailey, 1998). La géométrie et la morphologie des racines des plantes sont importantes pour maximiser l'absorption de P, car les systèmes racinaires qui ont un rapport surface/volume plus élevé explorent plus efficacement un plus grand volume du sol (Lynch, 1995). Cependant, le fait d'appliquer l'engrais en bandes restreint la zone de réaction du sol avec les racines, ce qui réduit la quantité de volume racinaire qui est alimenté en cet élément. Ainsi, le mode d'apport de l'engrais phosphaté n'affecte que rarement les céréales qui avec leurs racines ramifiées peuvent explorer un grand volume du sol. Par contre les espèces à racines pivotantes moins ramifiées comme les légumineuses répondent plus souvent positivement au P appliqué en mode localisé (Hinsinger *et al.*, 2015).

Il est essentiel de choisir le mode de localisation de l'engrais P en fonction de la capacité de déplacement des différents types d'engrais P et du type du sol (Lu *et al.*, 2019). Singh *et al.* (2005) rapportent qu'une application de P en bandes profondes (10 à 15 cm) améliore le rendement de blé d'une manière significative par rapport à une profondeur de 5 à 7 cm dans les conditions semi-arides du Nord de l'Australie. De même, Lu *et al.* (2019) trouvent qu'une application de l'engrais à 5 cm près de la ligne de semis ou en surface affecte d'une façon similaire le rendement et le prélèvement de P par la culture de blé, alors qu'une fertilisation à base de diammonium phosphaté (DAP) apportée à une profondeur de 12 cm au-dessous de la graine améliore le volume racinaire, le rendement en matière sèche et le prélèvement de P par la plante.

Chapitre II : Matériel et méthodes

1. Localisation de l'essai

Voir partie I, chapitre II, page 22.

2. Caractéristiques édapho-climatiques du site expérimental

2.1. Caractéristiques édaphiques

Avant l'installation des essais, des analyses du sol ont été effectuées sur un échantillon de sol issu d'un mélange de 10 prélèvements sur la parcelle, en suivant un cheminement en zigzag, à une profondeur de 15 cm. L'échantillon séché, broyé et tamisé est passé aux analyses au laboratoire des analyses du sol de département des productions végétales à l'ENSA. Les analyses de l'azote total et la mesure du pH ont été effectuées au niveau du laboratoire du département des sciences du sol à l'ENSA. Les résultats des analyses du sol sont montrés dans le tableau 20 ci-dessous.

Tableau 20 : Caractéristiques du sol à 15 cm de profondeur avant l'installation de l'essai.

Caractéristiques du sol		Valeur à 0-15 cm
Physiques	Argile (%)	37
	Limon (%)	58,5
	Sable grossier et fin (%)	4,85
Chimiques	PH (eau)	8,2
	C.E (mS/m)	0,14
	Matière Organique (%)	2,4
	Carbone Organique (%)	1,40
	Calcaire total (%)	9,5
	Azote Total (%)	0,51
	P ₂ O ₅ assimilable (ppm)	48

Les résultats obtenus montrent que, le sol est d'une texture argilo-limoneuse (Henin *et al*, 1969). Le pH_{eau} est alcalin (8,2). Le taux de matière organique est faible (2,4%) (Anne, 1945). Le sol est faiblement pourvue en phosphore assimilable 48 ppm (Allaire et Angers, 2011), cependant il est très riche en azote (0,51 %). Le taux de calcaire (9,5 %) est moyennement élevé et la salinité est faible.

2.2. Caractéristiques climatiques

La courbe ombrothermique de Gaussen ci-dessous (figure 30), montre que l'année 2018-2019 est caractérisée par une période humide allant du mois de Novembre au mois de Mars et une période sèche qui commence du mois de Mars jusqu'à la fin de cycle de la culture (Juin). Cette sécheresse de fin de cycle n'a pas eu un effet important sur les rendements qui restent appréciables grâce au stock d'eau relativement important à la sortie de l'hiver. L'année 2019-2020 est, par contre, caractérisée par deux

périodes humides (de Novembre à Janvier puis de Mars à Avril) et deux périodes sèches, la première au mois de Février qui est marqué par une absence totale des précipitations (0 mm), puis la deuxième du mois d'Avril jusqu'à la fin de la saison. La deuxième année (2019-2020) est caractérisée aussi par des températures plus importantes que l'année précédente, particulièrement, au mois de Février et Mai. Le stress thermique du mois de Mai, qui a coïncidé avec les stades floraison et remplissage du grain, a eu un impact important et négatif sur la fertilité des fleurs ce qui a affecté le nombre de grains produits par épi et par la suite le rendement en grain.

Voir les détails des caractéristiques climatiques de la région durant les 30 dernières années (1990-2020) et des deux années d'expérimentation (2018-2019 et 2019-2020) dans la partie « matériel et méthodes » de la partie I (tableaux 2 et 3, page 24).

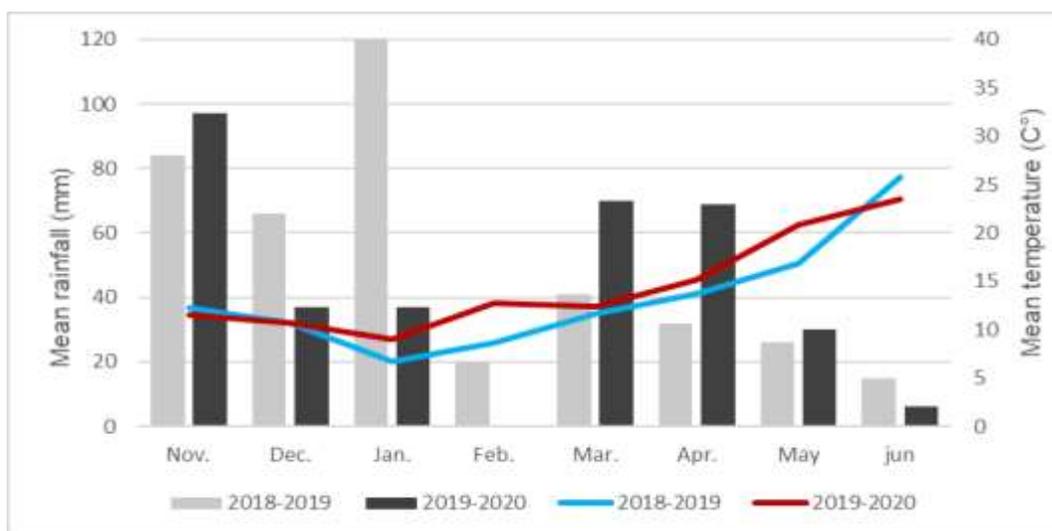


Figure 30 : Courbe ombrothermique de Gaussen de la région d'étude pendant les deux campagnes 2018-2019 et 2019-2020.

3. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental adopté est un split plot avec quatre répétitions. Les facteurs étudiés sont les doses d'engrais (1 : témoin de 0 kg P₂O₅ ha⁻¹, 2 : 30 kg P₂O₅ ha⁻¹ et 3 : 60 kg P₂O₅ ha⁻¹) et les modes d'apport (L : localisé. NL : non localisé). Les doses sont situées en sous blocs et les modes d'apport en parcelles élémentaires. Les dimensions d'une parcelle élémentaire sont de 4 m de longueur et 3 m de largeur. L'espacement entre les parcelles élémentaires et entre les blocs est de 1 m. Un schéma du dispositif expérimental adopté est donné dans la figure 31 ci-dessous.

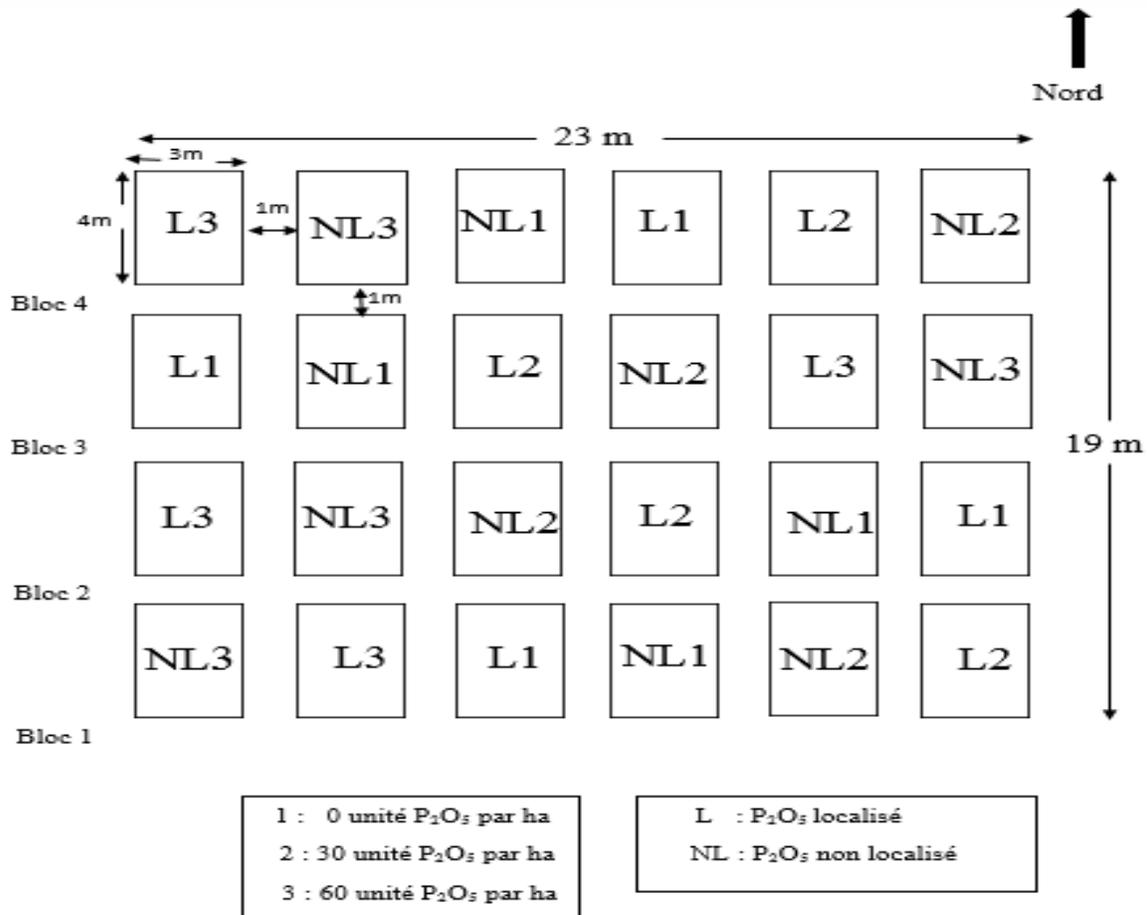


Figure 31 : Schéma du dispositif expérimental de l'essai de fertilisation.

4. Conduite de l'essai

4.1. Matériel végétal utilisé

La variété de blé dur utilisée pour cette étude est Simeto (catégorie G4), récupérée chaque année de la CCLS de la wilaya de Bouira. Les principales caractéristiques de la variété sont données dans la partie I (tableau 4, page 27). Pour la culture de lentille la variété utilisée est « Syrie 229 », catégorie « R2 ». Cette variété a été sélectionnée par l'ITGC à partir de 1970 pour les zones à sol maigre et calcaire. Cette variété est caractérisée par : une petite graine blonde ; bombée et attractive ; sa cuisson rapide, elle est assez précoce. Son goût délicieux et son port érigé facilite la récolte mécanisée (l'ITGC, 2013).

4.2. Travail du sol

Le travail du sol effectué consiste en un travail superficiel à l'aide d'un cultivateur à dents pattes d'oie à une profondeur maximale de 5 cm, suivi d'un passage d'une herse combinée à un rouleau cage pour la préparation d'un bon lit de semences et l'élimination des plantes adventices qui ont poussé en surface. L'opération du travail du sol est effectuée le 14-11-2018 pour la campagne 2018-2019 et le 05-

12-2019 pour la campagne 2019-2020. Les façons superficielles sont effectuées le 22-12-2018 et le 07-12-2019 pour les campagnes 2018-2019 et 2019-2020 respectivement.

4.3. Semis

Le semis de la lentille est du blé dur durant la campagne 2018-2019 est effectué manuellement du 23 au 25 décembre 2018. Le semis de blé dur dans les deux systèmes de culture à l'année suivante (2019-2020) est effectué du 14 au 16 décembre 2019. La profondeur de semis est de 4 cm et les doses de semis sont de 180 kg ha⁻¹ pour la culture de blé dur et de 60 kg ha⁻¹ pour la culture de lentille.

4.4. Fertilisation

La fertilisation phosphatée a fait l'objet de cette deuxième partie. Selon le dispositif expérimental (figure 31), trois doses de l'engrais P sont appliquées (0 kg P₂O₅ ha⁻¹, 30 kg P₂O₅ ha⁻¹ et 60 kg P₂O₅ ha⁻¹) selon deux modes : **non localisé**, où l'engrais est apporté en surface puis mélangé dans le sol à la profondeur de semis, et **localisé**, où l'engrais est distribué d'une façon homogène sur la ligne de semis à une profondeur de 5 cm, juste avant le semis. Le Mono-ammonium Phosphate (MAP) de la formule 12-52-0 N-P-K, qui est un engrais complètement soluble dans l'eau est utilisé dans cette expérimentation.

Pour la fertilisation azotée, un apport de 100 kg ha⁻¹ d'urée (46 % N) fournissant environ 46 kg d'azote sous forme ammoniacale est appliqué au stade 3 feuilles de la culture de blé dur durant les deux années d'expérimentation. La culture de lentille n'a, par contre, reçu aucune fertilisation azotée.

4.5. Désherbage

Le désherbage est effectué manuellement sur la culture de blé dur au stade tallage, puis dès l'apparition de jeunes pousses d'adventices, durant les deux années de l'expérimentation.

Sur la culture de lentille, un désherbage chimique est effectué deux jours après le semis (27 décembre 2018), à l'aide d'un herbicide de contact « Challenge » dont la matière active est aclonifène (49,6 %), à une dose de 3,5 l ha⁻¹. Puis, un désherbage manuel est effectué au mois d'Avril (fin du stade végétatif de la culture), à cause d'un développement important des adventices suite à l'augmentation des températures et la bonne réserve en eau emmagasinée durant l'année 2018-2019. La figure 32 montre une parcelle de lentille avant et après le désherbage manuel.

Les mauvaises herbes les plus rencontrées sont essentiellement le Phalaris mineur (*Phalaris minor*), le gaillet gratteron (*Galium aparine* L.), la folle avoine (*Avena sterilis*), la Centaurée (*Centaurea erythraea*) et la Fausse coriandre (*Coriandrum* sp.).



Figure 32: Photos illustrant une parcelle de lentille avant le désherbage manuel (à gauche) et après le désherbage manuel (à droite).

4.6. Traitements phytosanitaires

Durant la première année de l'essai (2018-2019), les deux cultures ont subi des attaques d'insectes et de ravageurs : le puceron noir (*Aphis craccinora*) et le puceron vert (*Aulacorthum solani*) sur la lentille, et les punaises, les criocères et la cécidomyie sur le blé dur. Pour cela un traitement insecticide est appliqué à l'aide d'un produit du nom commercial ACTARA^{TN}, dont la matière active est la Thiaméthoxam. La dose d'application est de 100 g ha⁻¹.

Un traitement fongicide préventif est appliqué sur la culture de blé dur au stade montaison-début épiaison. Le produit utilisé est du nom « ACANTO » dont la matière active est la picoxystrobine, à une dose de 0,5 l ha⁻¹.

Sur la culture de lentille, des maladies cryptogamiques telles que la rouille et la fusariose sont observées aux stades de maturité physiologique et de remplissage du grain. Pour cela un traitement fongicide est appliqué le 7 mai 2019, à l'aide d'un fongicide de contact « BRAVO » composé de deux matières actives complémentaires le chlorothalonil et le metconazole, à raison de 2 l ha⁻¹.

NB : durant la campagne 2019-2020, le suivi de la culture a été interrompu dès le mois de Mars (stade tallage de la culture de blé dur) jusqu'à la récolte en raison des conditions sanitaires liées à la pandémie de la COVID19. Par conséquent, aucun traitement phytosanitaire n'est effectué.

4.7. Récolte

La récolte a été faite manuellement le 29 mai 2019 par arrachage des plantes à maturité physiologique pour la culture de lentille. Pour la culture de blé dur, les plantes sont coupées à ras du sol et à un taux d'humidité du grain de 14 à 15 %, le 26 juin 2019 pour l'année 2018-2019 et le 17 et 18 juin 2020 pour la campagne 2019-2020.

5. Paramètres mesurés

5.1. Paramètres mesurés sur la culture de lentille

- **Les composantes du rendement**

Le nombre de gousses par plante est déterminé lorsque les gousses sont formées, en comptant le nombre de gousses produites sur cinq plantes prélevées aléatoirement de chaque placette de chaque parcelle élémentaire. Les mêmes échantillons ont servi au comptage du nombre de grains par gousse (NGG). Le poids de mille grains (PMG) est déterminé par le comptage et la pesée de trois échantillons de 100 grains issus de chaque parcelle élémentaire.

- **Rendement en grain**

Le rendement en grain est obtenu à la récolte et après séchage des plantes arrachées de chaque parcelle élémentaire à l'air libre jusqu'à un taux d'humidité voisin de 14%. Le grain issu du battage est pesé, puis le poids obtenu est converti à l'hectare.

5.2. Paramètres mesurés sur la culture de blé dur

- **Les composantes du rendement**

Le nombre d'épis par mètre carré (NEM) est déterminé en comptant le nombre d'épis produits dans trois placettes de chaque parcelle élémentaire choisies préalablement, converti au mètre carré. Le poids de mille grains (PMG) est déterminé par le comptage et la pesée de trois échantillons de 1000 grains issus de chaque parcelle élémentaire à l'aide d'un compteur de grains et d'une balance de précision. Puis le nombre de grains par épi (NGE) est déterminé à partir du poids du grain issu de chaque placette, divisé par le nombre d'épis puis par le poids individuel du grain de la même placette.

- **Rendement en grain**

Le rendement en grain est obtenu par la pesée des grains issus du battage de la récolte de chaque parcelle élémentaire, converti à l'hectare.

- **Rendement en biomasse sèche**

Ce paramètre est déterminé peu avant la récolte, en récoltant, à ras du sol, les trois placettes de deux mètres linéaires sur lesquelles sont effectuées toutes les mesures. Les placettes récoltées sont pesées directement sur le terrain à l'aide d'une balance portative. Un sous-échantillon de chaque placette de chaque parcelle est mis à l'étuve pendant 48 heures à une température de 75 °C pour déterminer le taux de matière sèche. Le rendement en biomasse sèche de chaque parcelle est alors déterminé et rapporté à l'hectare.

- **Teneurs en P dans les tissus végétaux**

La concentration en P est déterminée sur des sous-échantillons prélevés de chacune des trois placettes de chaque parcelle élémentaire. Après battage, le grain et la paille de l'échantillon sont séchés et

broyés, puis passés aux analyses de P séparément selon la méthode vanado-molybdique décrite dans la partie I, chapitre II, page 30.

- **Prélèvement de P par la culture**

Le prélèvement total de P par la plante est déterminé en sommant les produits de multiplication du rendement en biomasse sèche de la partie de la plante analysée par sa concentration en P respective, et exprimé en kg ha^{-1} .

5.3. Teneur en P et pH dans la couche 0-15 cm du sol

Dans chaque parcelle élémentaire, cinq prélèvements de sol en zigzag ont été effectués après la récolte du blé et de la lentille à la première année, à l'aide d'une tarière, sur une profondeur de 15 cm (figure 33). Les échantillons de chaque parcelle sont mélangés, séchés, broyés et tamisés (0,2 mm), puis analysés pour leur teneur du P assimilable en suivant la méthode JORET-HEBERT.

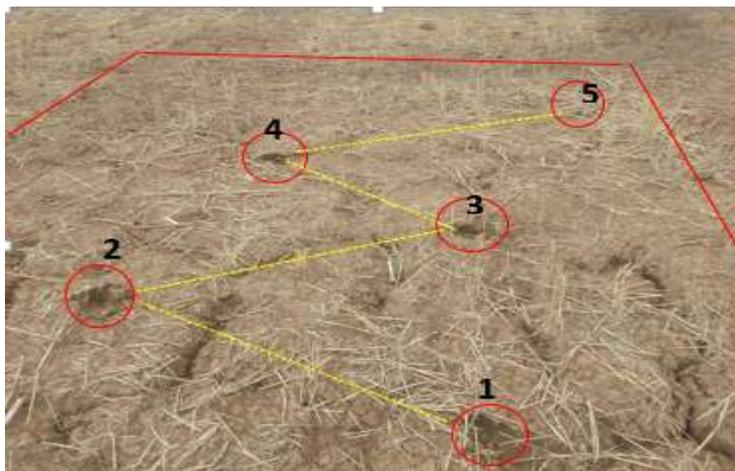


Figure 33 : Image illustrant la méthode d'échantillonnage du sol.

6. Analyses statistiques

Afin de comparer l'effet des doses et des modes d'apport de l'engrais phosphaté durant les deux années de cette étude, une analyse de la variance à deux facteurs est effectuée (la dose et le mode d'apport comme facteurs étudiés et le bloc comme facteur contrôlé) dans chaque essai séparément. Le test de la plus petite différence significative (PPDS) de Fisher est effectué lorsque l'ANOVA révèle un effet significatif.

Chapitre III : Résultats et discussion

1. Effet des doses et des méthodes d'application de l'engrais P dans le système lentille-blé dur

Au cours de la première année de l'expérience (2018-2019), les doses de phosphore ont eu un effet significatif sur la culture de la lentille. Une dose de 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ a augmenté de manière significative ($p < 0,05$) le nombre de gousses produites par plante et au mètre carré, ce qui a eu un effet positif sur le rendement en grain qui en a résulté. Ce dernier est significativement augmenté ($p < 0,01$) par la dose 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ (22,1 q ha⁻¹) par rapport à 30 et 0 kg P₂O₅ ha⁻¹ (18,9 et 17,6 q ha⁻¹ respectivement) (Tableau 21, figure 34). Le phosphore apporté ayant favorisé la floraison, où la dose de 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ a augmenté de plus de 50 % le nombre de fleurs produites par plante lorsqu'elle est apportée en mode localisé, et de près de 40 % lorsqu'elle est apportée en surface (les données du nombre de fleurs par plante ne sont pas montrés dans ce document). Le poids de mille grains ainsi que le nombre de grains produits par gousse sont restés indifférents à l'augmentation des doses de P₂O₅. Les méthodes d'application de l'engrais phosphaté n'ont eu, aucun effet significatif sur tous les paramètres mesurés sur la culture de lentille (tableau 21, figure 34).

La mesure de la teneur en P du sol après la récolte de la lentille durant la première année de cet essai montre que le P disponible a varié de manière significative ($p < 0,01$) selon les doses de P appliquées. La dose 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ a augmenté de manière significative le niveau de P du sol (41,68 ppm par rapport à 32,53 et 31,92 ppm obtenus par les doses 0 et 30 kg P₂O₅ ha⁻¹ respectivement) (Tableau 21, figure 34), ce qui explique la supériorité du rendement enregistrée dans les parcelles ayant reçu cette dose. D'autre part, la teneur en P assimilable dans le sol n'a pas été affectée par les méthodes d'application de l'engrais P au cours de cette campagne.

Les coefficients de variation obtenus pour les deux facteurs (dose d'engrais et mode d'apport) sont faibles et acceptables pour les paramètres poids de mille grains et rendement en grain (tableau 21). La variation du nombre de gousses par plante et du nombre de grains par gousse est, par contre, légèrement élevée, se traduisant par des coefficients de variation supérieurs à 13 % (tableau 21). Les résultats détaillés de l'analyse de l'effet des doses et des méthodes d'application de l'engrais P sur la culture de lentille durant l'année 2018-2019 sont montrés dans le tableau 1 de l'annexe II.

Tableau 21 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur la culture de lentille durant l'année 2018-2019.

Doses d'engrais (D)	Mode d'application (M)		Moyenne
	P localisé	P non-localisé	
Nombre de gousse par plant			
0	46,00	44,80	45,40 ^b
30	49,25	52,05	50,65 ^b
60	60,50	61,80	61,15 ^a
Moyenne	51,92	52,88	
<i>PPDS</i> _{0,05} , D = 10,24, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 15,96, CV % (M) = 15,33			
Nombre de grains par gousse			
0	1,32	1,36	1,34
30	1,51	1,24	1,37
60	1,28	1,36	1,32
Moyenne	1,37	1,32	
D = ns, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 13,05, CV % (M) = 15,99			
Nombre de grains par mètre carré			
0	3733,33	3474,83	3604,08 ^b
30	3049,92	4233,21	3641,57 ^b
60	4867,5	4016,54	4442,02 ^a
Moyenne	3883,58	3908,19	
<i>PPDS</i> _{0,05} , D = 682,76, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 14,32, CV % (M) = 18,42			
Poids de mille gains (g)			
0	37,90	35,45	36,68
30	38,85	37,90	38,37
60	38,81	37,26	38,03
Moyenne	38,52	36,87	
D = ns, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 4,93, CV % (M) = 5,62			
Rendement en grain (q ha ⁻¹)			
0	18,7	16,5	17,6 ^b
30	18,0	19,8	18,9 ^b
60	24,0	20,2	22,1 ^a
Moyenne	20,2	18,8	
<i>PPDS</i> _{0,05} D = 2,05, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 4,44, CV % (M) = 12,06			
Teneur en P dans le sol (ppm)			
0	35,95	29,11	32,53 ^b
30	28,81	35,02	31,92 ^b
60	43,16	40,20	41,68 ^a
Moyenne	35,98	34,78	
<i>PPDS</i> _{0,05} , D = 4,44, M = ns, D*M = 12,06 CV % (D) = 11,61, CV % (M) = 15,46			

NB : D = dose d'engrais, M = mode d'apport d'engrais, n s= non significatif à P<0,05. CV %= coefficient de variation. Les lettres en minuscule représentent la classification des moyennes par rapport aux doses d'engrais.

En deuxième année (2020), la culture de blé dur est mise en place dans la même parcelle occupée précédemment par la culture de lentille. Durant cette année, le rendement en biomasse du blé cultivé après la lentille a eu une réponse positive à l'apport du phosphore. Une augmentation significative ($p < 0,01$) de la biomasse sèche produite est survenue avec une application de 60 kg P_2O_5 ha^{-1} (75,4 q ha^{-1} contre 64,2 q ha^{-1} et 62,9 q ha^{-1} pour les doses de 60, 30 et 0 kg P_2O_5 ha^{-1} respectivement), tandis que le rendement en grain et ses composantes ont été statistiquement similaires avec les trois doses et les deux modes d'application d'engrais (Tableau 22, figure 35).

Les coefficients de variation obtenus sont faibles et acceptables pour tous les paramètres de production à l'exception du nombre de grains par épis qui a présenté une variation assez élevée se traduisant par des coefficients de variation supérieurs à 2 % (tableau 22). Les moyennes obtenues par les différents facteurs étudiés (dose d'engrais et mode d'apport) pour les paramètres de rendement sont données dans le tableau 22, et leurs représentations graphiques sont données dans les histogrammes de la figure 35. Les résultats détaillés de l'analyse de la variance sont donnés dans le tableau 2 de l'annexe II.

La nutrition phosphatée de la culture de blé dur mesurée à travers la teneur en P dans le grain et dans la paille, ainsi que le prélèvement total de cet élément par la culture, à la fin de son cycle, n'a pas été affecté par l'augmentation des doses de P apportées. Cependant, les méthodes d'application de l'engrais P ont eu un effet significatif uniquement sur la concentration de P dans le grain ($p < 0,01$) et la paille ($p < 0,05$) de blé dur cultivé dans ce système. L'application localisée de P_2O_5 sous la ligne de semis ayant obtenue les meilleures concentrations, ce qui est probablement dû à une meilleure disponibilité de P près des racines de la culture de blé dur, particulièrement dans les conditions du manque d'eau qui ont caractérisé la campagne 2019-2020. La minéralisation des résidus des racines de lentille riche en P dans la ligne de semis peut aussi avoir eu un effet sur les résultats obtenus.

Les coefficients de variation obtenus sont faibles et acceptables pour les teneurs en P dans le grain et la paille, mais élevés pour l'exportation totale de P (tableau 23). Les moyennes des paramètres de la nutrition phosphatée obtenues par les différentes doses et modes d'apports d'engrais P étudiés sont montrées dans le tableau 23 et leurs représentations graphiques sont montrées dans la figure 36 ci-dessous. Les résultats détaillés de l'analyse de la variance pour ces paramètres sont donnés dans le tableau 3 de l'annexe II.

Tableau 22 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur le rendement et ses composantes de la culture de blé dur conduite après une culture de lentille durant l'année 2019-2020

Doses d'engrais (D)	Mode d'application (M)		Moyenne
	P localisé	P non-localisé	
Nombre d'épis par mètre carré			
0	213,13	232,71	222,92
30	200,63	226,25	213,44
60	227,71	231,04	229,38
Moyenne	213,82	230,00	
D = ns, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 5,06, CV % (M) = 9,21			
Nombre de grains par épi			
0	18,74	18,59	18,66
30	20,16	19,64	19,90
60	19,27	20,84	20,05
Moyenne	19,39	19,69	
D = ns, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 38,53, CV % (M) = 27,47			
Poids de mille grains (g)			
0	46,87	45,68	46,27
30	46,80	47,99	47,39
60	46,87	46,56	46,71
Moyenne	46,85	46,74	
D = ns, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 7,57, CV % (M) = 4,18			
Rendement en grain (q ha ⁻¹)			
0	18,6	19,9	19,2
30	18,8	21,2	20,0
60	20,3	22,4	21,3
Moyenne	19,2	21,2	
D = ns, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 1,53, CV % (M) = 1,53			
Rendement en matière sèche (q ha ⁻¹)			
0	61,0	64,7	62,9 ^b
30	60,5	67,9	64,2 ^b
60	75,1	75,7	75,4 ^a
Moyenne	65,5	69,4	
PPDS _{0,05} D = 7,5, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 0,9, CV % (M) = 1,16			

NB : D = dose d'engrais, M = mode d'apport d'engrais, ns = non significatif à P<0,05, CV % = coefficient de variation. Les lettres en minuscule représentent la classification des moyennes par rapport aux doses d'engrais.

Tableau 23 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur la teneur en P dans le grain et la paille et son exportation totale par la culture de blé dur conduite après une culture de lentille durant l'année 2019-2020.

Doses d'engrais (D)	Mode d'application (M)		Moyenne
	P localisé	P non-localisé	
Teneur en P dans la graine (g kg ⁻¹)			
0	3,84	3,64	3,74
30	3,94	3,86	3,90
60	4,06	3,68	3,87
Moyenne	3,95 ^A	3,72 ^B	
D = ns, M = 0,14, D*M = ns CV % (D) = 13,51, CV % (M) = 4,03			
Teneur en P dans la paille (g kg ⁻¹)			
0	0,51	0,50	0,50
30	0,51	0,51	0,51
60	0,52	0,50	0,51
Moyenne	0,51 ^A	0,50 ^B	
D = ns, M = 0,006, D*M = ns CV % (D) = 6,03, CV % (M) = 1,3			
Exportation de la plante en P (kg ha ⁻¹)			
0	9,33	9,69	9,51
30	9,56	10,60	10,08
60	11,05	10,89	10,97
Moyenne	9,98	10,39	
D = ns, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 22,13, CV % (M) = 15,45			

NB : D = dose d'engrais, M = mode d'apport d'engrais, ns = non significatif à P<0,05. CV % = coefficient de variation. Les lettres en majuscule représentent la classification des moyennes par rapport aux modes d'apport d'engrais P.

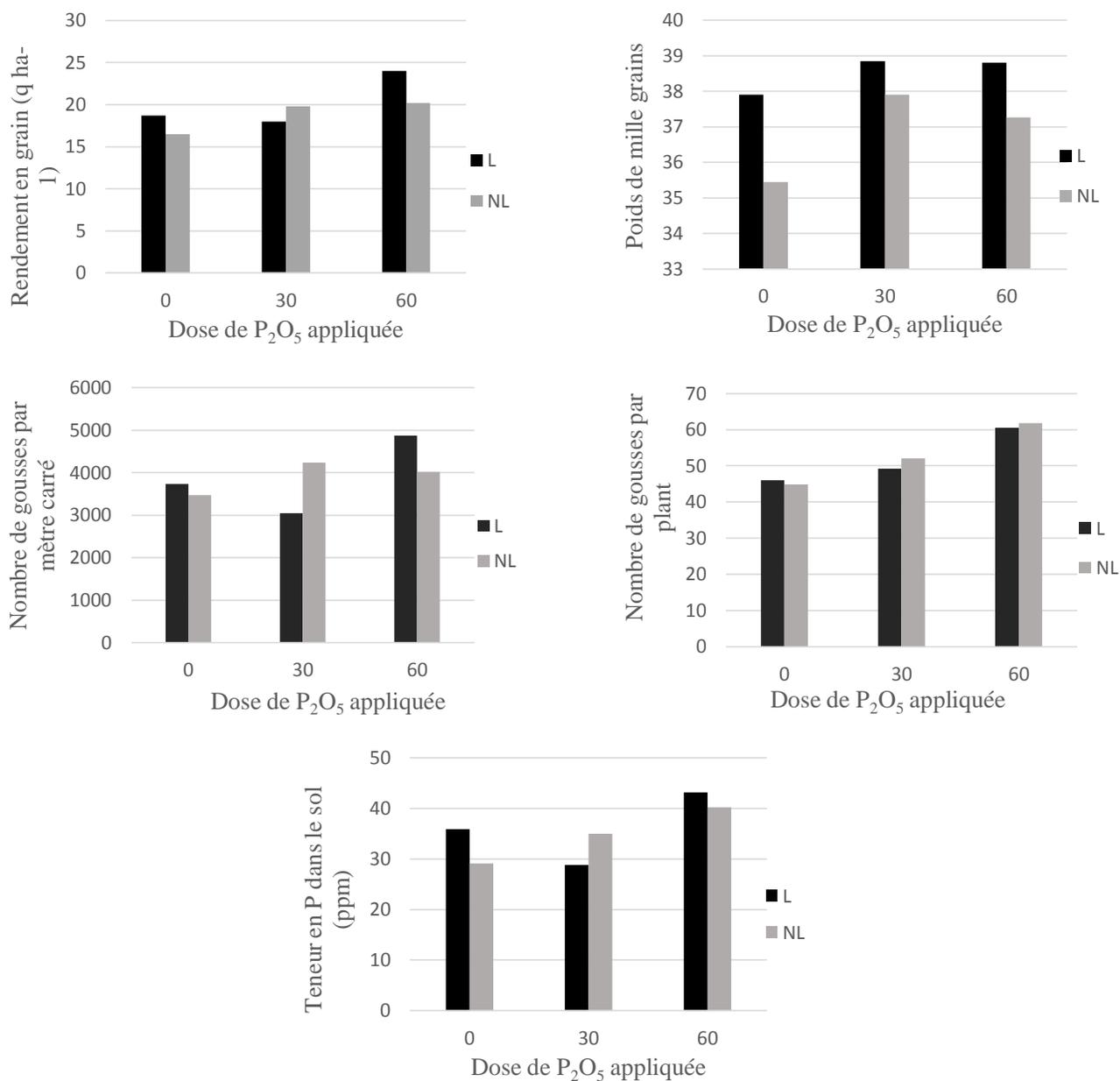


Figure 34 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur la culture de lentille durant l'année 2018-2019.

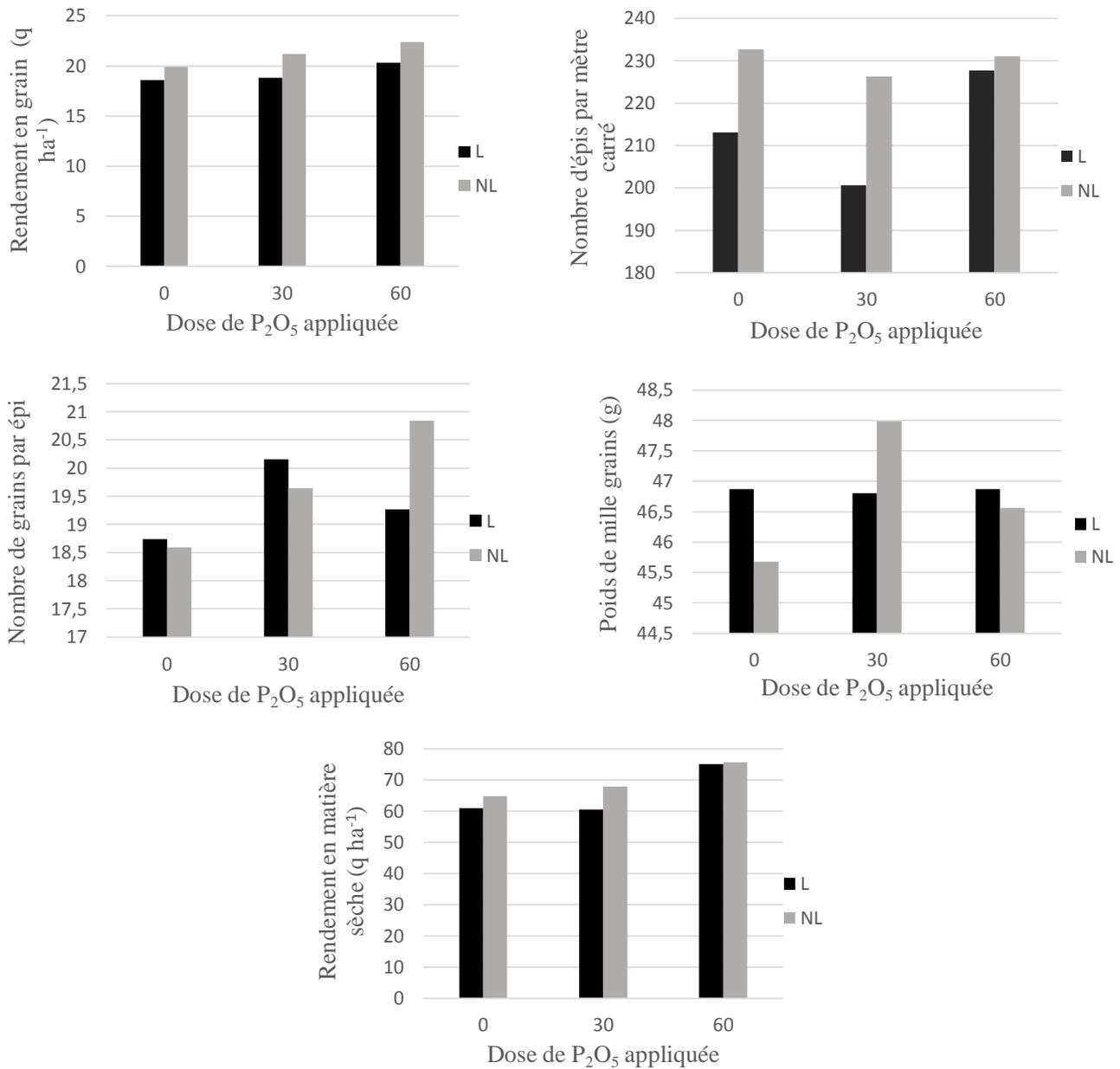


Figure 35 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur les composantes du rendement et les rendements en biomasse sèche et en grain de la culture de blé dur conduite après une culture de lentille durant l'année 2019-2020.

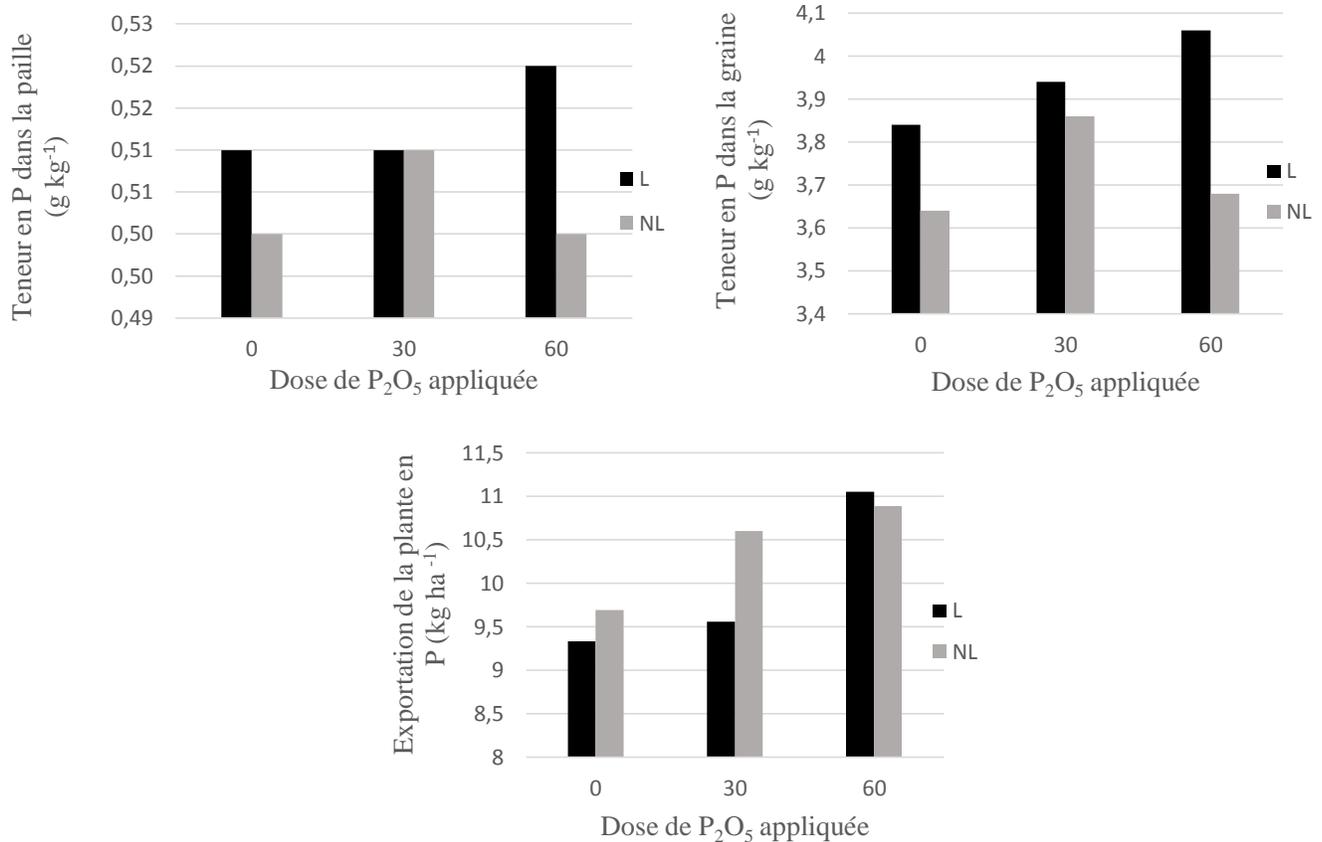


Figure 36 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur la nutrition phosphatée de la culture de blé dur conduite après une culture de lentille durant l'année 2019-2020.

2. Effet des doses et des méthodes d'application de l'engrais P dans le système de monoculture du blé dur

Durant les deux années de l'expérimentation (2019 et 2020), les doses de P, ainsi que les méthodes d'application n'ont pas eu d'effet significatif sur le blé cultivé en monoculture, les trois doses de P appliquées soit en surface, soit en bandes localisées sous la ligne de semis n'ont pas entraîné de variation significative du rendement du blé dur ou de ses composantes (Tableaux 24 et 26). De même, la nutrition phosphatée de la culture de blé dur, mesurée par la concentration de cet élément dans les différentes parties de la plante (grain et paille) au stade de maturité, n'a pas été affectée par les apports de phosphore au cours des deux campagnes (tableaux 25 et 27). L'analyse de la teneur en P du sol effectuée après la récolte du blé à la première année (2019), a montré que le statut de P du sol n'a pas été affecté par le P appliqué, quelle que soit sa méthode d'application. Les deux doses d'engrais ainsi que le témoin ont donné des teneurs en P statistiquement similaires (33,5 ppm ; 32,13 ppm et 30 ppm par les doses 0, 30 et 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ respectivement) (Tableau 25). Ceci est dû, d'une part, à la nature

calcaire du sol qui favorise le blocage de P juste après son application, et d'autre part, aux conditions climatiques qui ont caractérisé cette première année d'étude, où les précipitations importantes au début de la saison (juste après l'apport de P) ont entraîné des inondations qui ont persisté environ 20 jours sur toutes les parcelles. Ceci a engendré une précipitation rapide de l'engrais appliqué, car selon Engelstad *et al.* (1985), dans des conditions d'inondation le P soluble se précipite très rapidement après dessiccation du sol, particulièrement, dans les sols qui contiennent un taux d'argile élevé. Des résultats similaires aux nôtres ont été rapportés par Selles *et al.* (2003) qui affirment que l'inondation survenue directement après le semis a masqué l'effet de la fertilisation en P pendant les 3 années de leur étude. Sah *et al.*, (1989) ont aussi rapporté une diminution de la disponibilité de P due à l'excès d'eau pendant une longue période.

Les moyennes obtenues par chacun des facteurs étudiés dans le système de monoculture pour les paramètres de rendement sont données dans les tableaux 24 et 26 pour les années 2018-2019 et 2019-2020 respectivement et leurs représentations graphiques sont données dans les histogrammes des figures 37 et 39. Pour les paramètres de la nutrition phosphatée, les moyennes obtenues par les doses et les modes d'apport d'engrais sont données dans les tableaux 25 et 27 pour les années 2018-2019 et 2019-2020 respectivement, leurs représentations graphiques sont données dans les histogrammes des figures 38 et 40.

Les coefficients de variations obtenus sont faibles et acceptables pour les composantes de rendement, élevés pour les rendements en biomasse sèche et en grain (tableau 24) et pour les paramètres liés à la nutrition phosphatée (teneur en P dans le grain et dans la paille, et l'exportation totale de P par la culture) durant la première année 2018-2019 (tableau 25). A la deuxième année 2019-2020, les coefficients de variation obtenus pour les composantes du rendement de blé dur sont élevés, sauf pour le PMG, qui avec le rendement en grain et en biomasse sèche ont obtenu des coefficients de variation plus faibles (tableau 26). Pour les paramètres liés à la nutrition phosphatée, la variation durant cette dernière année est assez importante sauf pour la teneur en P dans le grain qui a enregistré des coefficients de variation faibles qui sont de 7,15 % pour la dose d'engrais et 4,70 % pour le mode d'apport (tableau 27). Le détail de l'analyse de la variance est donné dans les tableaux 4-7 de l'annexe II.

Tableau 24 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur le rendement et les composantes du rendement de la culture de blé dur conduite en monoculture durant l'année 2018-2019.

Doses d'engrais (D)	Mode d'application (M)		Moyenne
	P localisé	P non-localisé	
Nombre d'épis par mètre carré			
0	241,25	258,96	250,10
30	245,42	238,13	241,77
60	299,17	254,48	276,82
Moyenne	261,94	250,52	
D = ns, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 11,11, CV % (M) = 12,56			
Nombre de grains par épi			
0	37,38	36,55	36,97
30	39,72	39,76	39,74
60	40,07	39,02	39,54
Moyenne	39,06	38,44	
D = ns, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 1,16, CV % (M) = 0,87			
Poids de mille grains (g)			
0	51,58	53,37	52,47
30	53,76	53,24	53,50
60	52,45	52,35	52,40
Moyenne	52,59	52,98	
D = ns, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 6,28, CV % (M) = 3,43			
Rendement en grain (q ha ⁻¹)			
0	33,1	28,5	30,8
30	27,7	28,3	28,0
60	31,9	28,0	29,9
Moyenne	30,9	28,3	
D = ns, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 14,97, CV % (M) = 19,97			
Rendement en matière sèche (q ha ⁻¹)			
0	87,1	81,0	84,0
30	80,5	75,1	77,8
60	87,6	77,8	82,7
Moyenne	85,0	77,9	
D = ns, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 17,15, CV % (M) = 23,74			

NB : D = dose d'engrais, M = mode d'apport d'engrais, ns = non significatif à P<0,05. CV % = coefficient de variation.

Tableau 25 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur la teneur en P du sol, la teneur en P dans le grain et la paille et son exportation totale par la culture de blé dur conduite en monoculture durant l'année 2018-2019.

Doses d'engrais (D)	Mode d'application (M)		Moyenne
	P localisé	P non-localisé	
Teneur en P dans la graine (g kg ⁻¹)			
0	3,07	3,06	3,07
30	3,36	3,39	3,38
60	2,88	3,19	3,03
Moyenne	3,10	3,22	
D = ns, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 19,50, CV % (M) = 9,14			
Teneur en P dans la paille (g kg ⁻¹)			
0	0,60	0,48	0,54
30	0,71	0,61	0,66
60	0,55	0,62	0,59
Moyenne	0,62	0,57	
D = ns, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 20,87, CV % (M) = 36,77			
Exportation de la plante en P (kg ha ⁻¹)			
0	13,48	11,34	12,41
30	12,63	12,38	12,50
60	12,21	11,72	11,97
Moyenne	9,98	10,39	
D = ns, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 24,77, CV % (M) = 22,95			
Teneur en P dans le sol (ppm)			
0	29,25	37,75	33,50
30	29,50	34,75	32,13
60	31,25	28,75	30,00
Moyenne	30,00	33,75	
D = ns, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 37,74, CV % (M) = 28,82			

NB : D = dose d'engrais, M = mode d'apport d'engrais, ns = non significatif à P<0,05. CV % = coefficient de variation.

Tableau 26 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur le rendement et ses composantes de la culture de blé dur conduite en monoculture durant l'année 2019-2020.

Doses d'engrais (D)	Mode d'application (M)		Moyenne
	P localisé	P non-localisé	
Nombre d'épis par mètre carré			
0	235,00	226,67	230,83
30	201,67	210,28	205,97
60	215,63	211,46	213,54
Moyenne	217,43	216,13	
D = ns, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 13,44, CV % (M) = 15,97			
Nombre de grains par épi			
0	18,31	20,54	19,42
30	19,14	21,30	20,22
60	20,66	20,55	20,60
Moyenne	19,37	20,80	
D = ns, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 14,82, CV % (M) = 16,50			
Poids de mille grains (g)			
0	42,20	43,20	42,70
30	42,87	43,82	43,34
60	42,36	44,17	43,26
Moyenne	42,48	43,73	
D = ns, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 4,49, CV % (M) = 7,64			
Rendement en grain (q ha ⁻¹)			
0	18,3	19,8	19,1
30	16,6	21,2	18,9
60	18,8	19,0	18,9
Moyenne	17,9	20,0	
D = ns, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 2,19, CV % (M) = 1,79			
Rendement en matière sèche (q ha ⁻¹)			
0	68,5	70,5	69,5
30	66,4	72,2	69,3
60	69,1	69,4	69,3
Moyenne	68,0	70,7	
D = ns, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 0,76, CV % (M) = 0,62			

NB : D = dose d'engrais, M = mode d'apport d'engrais, ns = non significatif à P<0,05. CV % = coefficient de variation.

Tableau 27 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur la teneur en P dans le grain et la paille et son exportation totale par la culture de blé dur conduite en monoculture durant l'année 2019-2020.

Doses d'engrais (D)	Mode d'application (M)		Moyenne
	P localisé	P non-localisé	
Teneur en P dans la graine (g kg ⁻¹)			
0	3,99	3,94	3,96
30	4,16	4,06	4,11
60	4,16	4,10	4,13
Moyenne	4,10	4,03	
D = ns, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 7,15, CV % (M) = 4,70			
Teneur en P dans la paille (g kg ⁻¹)			
0	0,52	0,54	0,53
30	0,50	0,53	0,51
60	0,53	0,52	0,53
Moyenne	0,51	0,53	
D = ns, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 22,70, CV % (M) = 16,45			
Exportation de la plante en P (kg ha ⁻¹)			
0	9,81	10,52	10,17
30	9,32	11,17	10,24
60	10,48	10,42	10,45
Moyenne	9,87	10,70	
D = ns, M = ns, D*M = ns CV % (D) = 19,19, CV % (M) = 12,47			

NB : D = dose d'engrais, M = mode d'apport d'engrais, ns = non significatif à P<0,05. CV % = coefficient de variation.

Aucune comparaison statistique de l'effet des précédents et de l'année sur les différents paramètres mesurés sur le blé dur dans cette étude n'a été réalisée. Cependant, il est clair que le précédent légumineuse (lentille) a augmenté le poids de mille grains et ainsi que le rendement en grain et en biomasse sèche de la culture de blé par rapport au blé conduit en monoculture. Cela, grâce à une utilisation plus efficace des éléments minéraux tels que l'azote et le phosphore rendus plus disponibles par la culture de lentille. L'effet du climat est aussi remarquable. En effet, une chute importante du nombre de grains produits par épi et du poids de mille grains a été notée durant la deuxième année qui était plus sèche et plus chaude, cela a affecté le rendement de la culture de blé dur durant la campagne 2019-2020 qui a baissé d'environ 10 q ha⁻¹ pour tous les traitements dans les deux systèmes de culture.

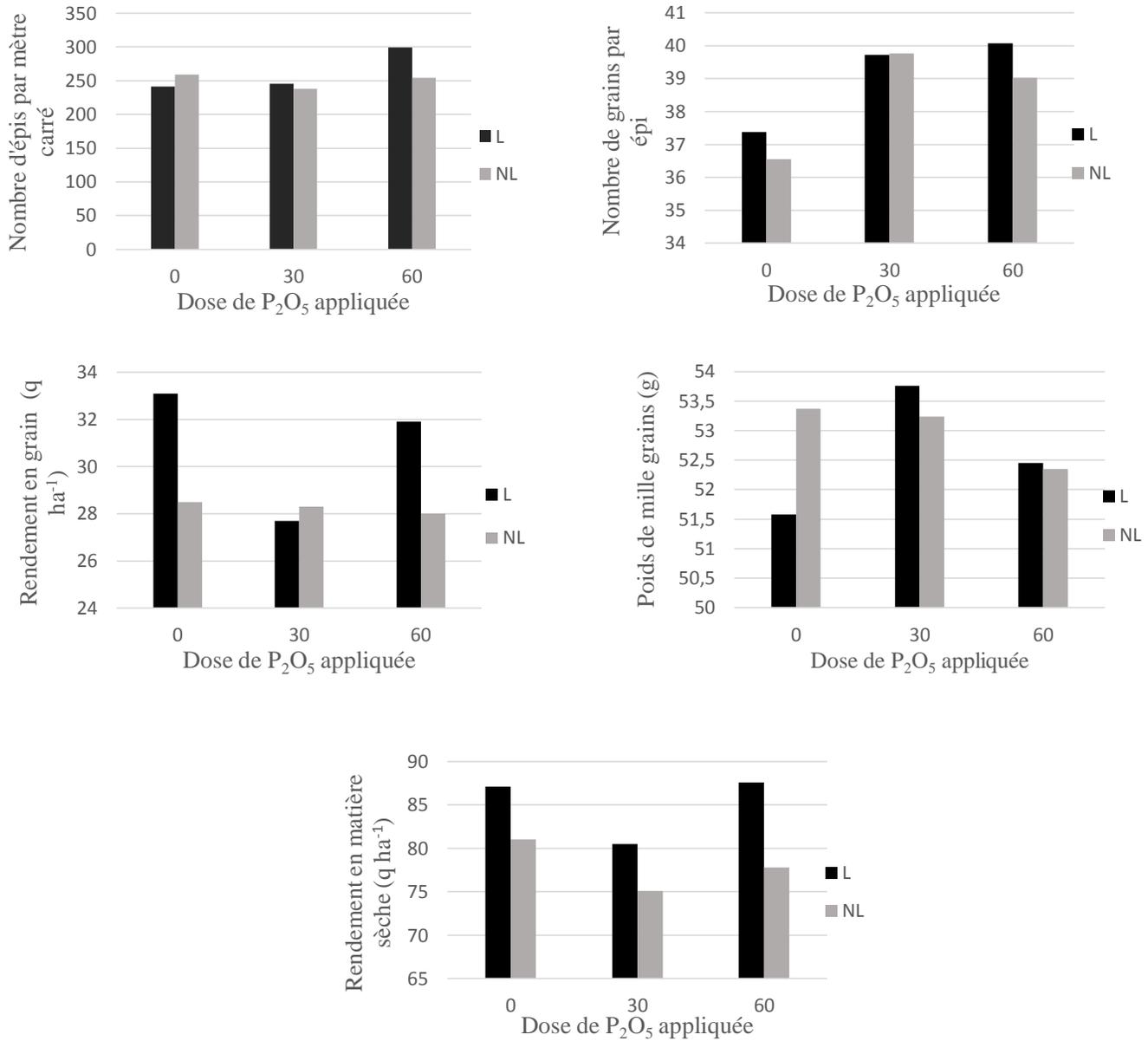


Figure 37 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur les composantes du rendement et le rendement en grain et en biomasse sèche de la culture de blé dur conduite en monoculture durant l'année 2018-2019.

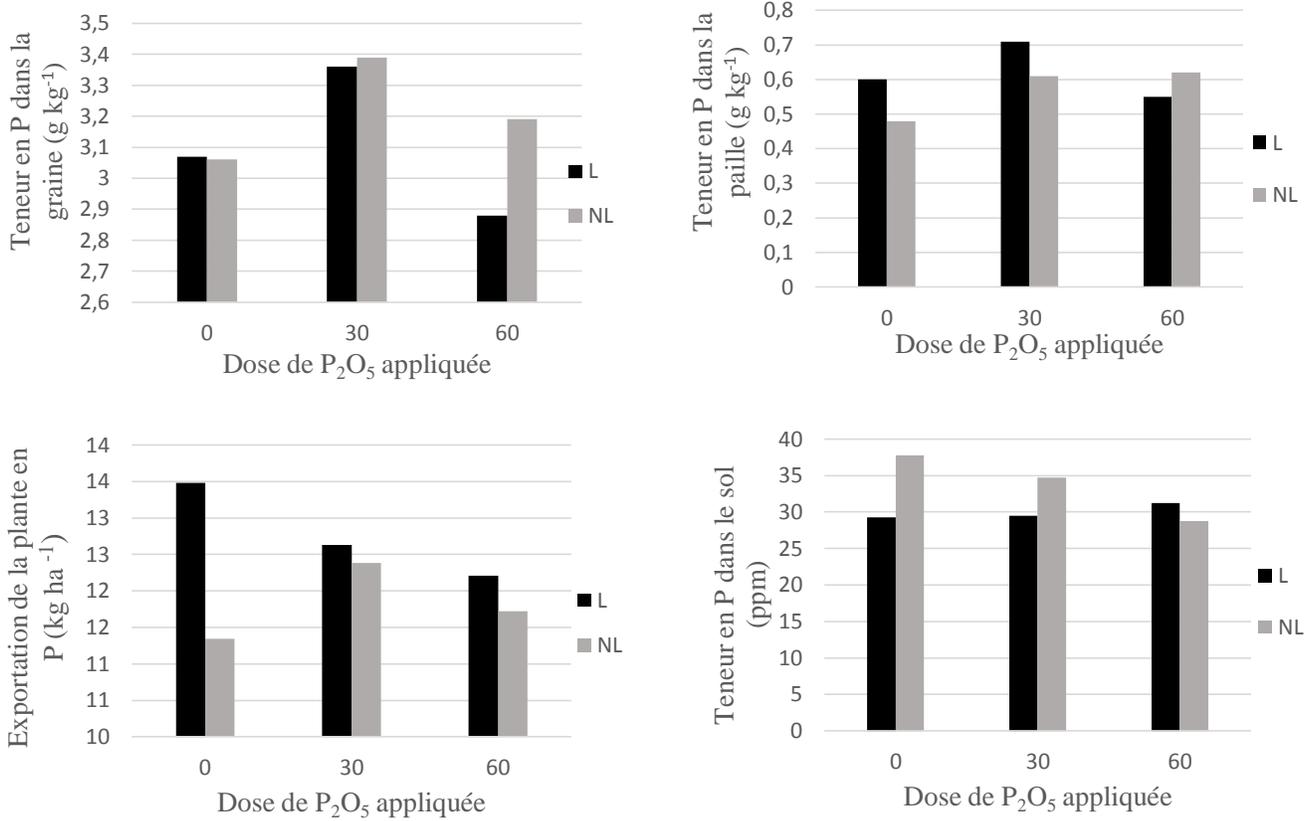


Figure 38 : Effet des doses et des modes d’apport de l’engrais P sur la teneur en P dans le sol et la nutrition phosphatée de la culture de blé dur conduite en monoculture durant l’année 2018-2019.

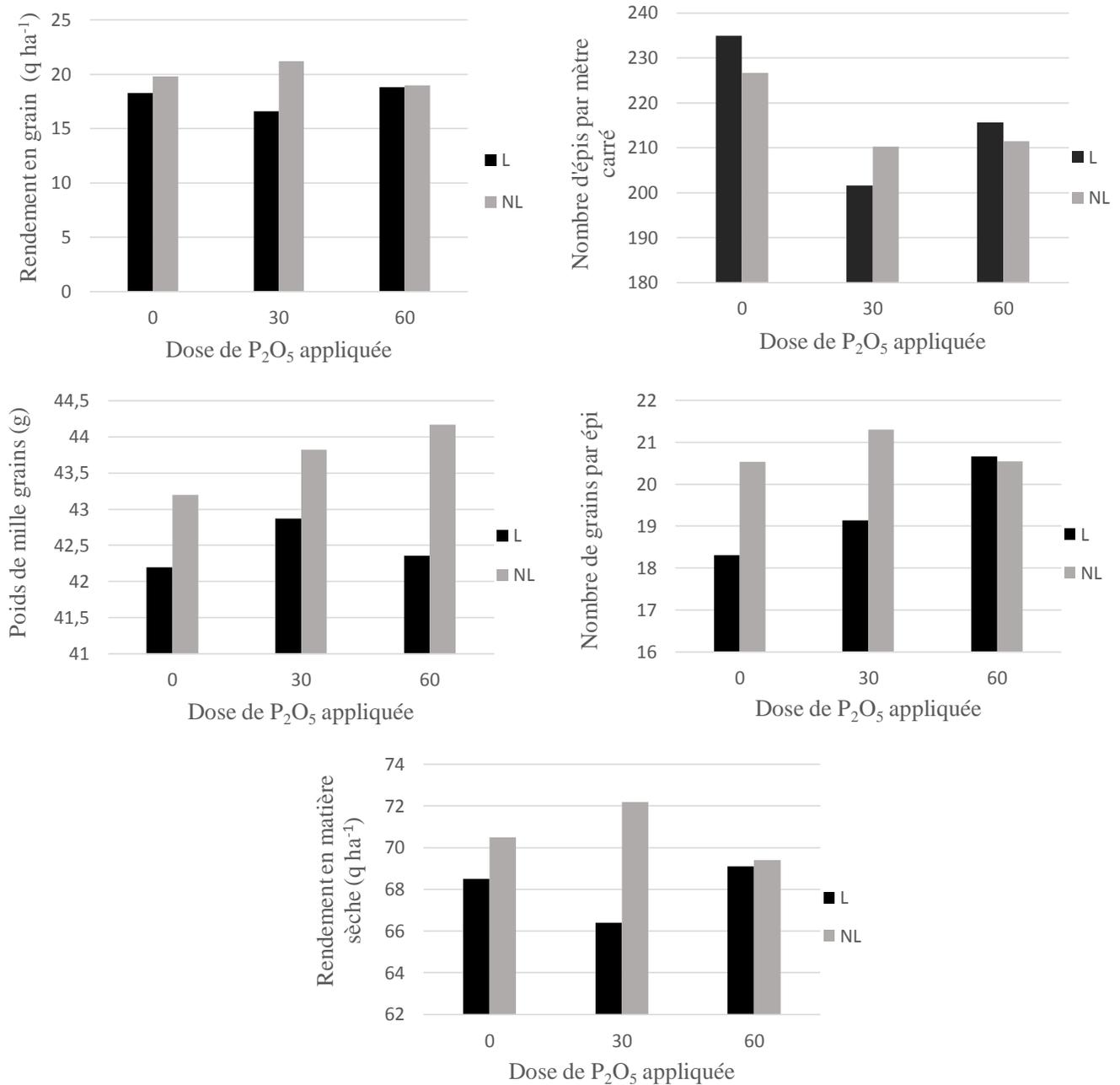


Figure 39 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur les composantes du rendement et le rendement en grain et en biomasse sèche de la culture de blé dur conduite en monoculture durant l'année 2019-2020.

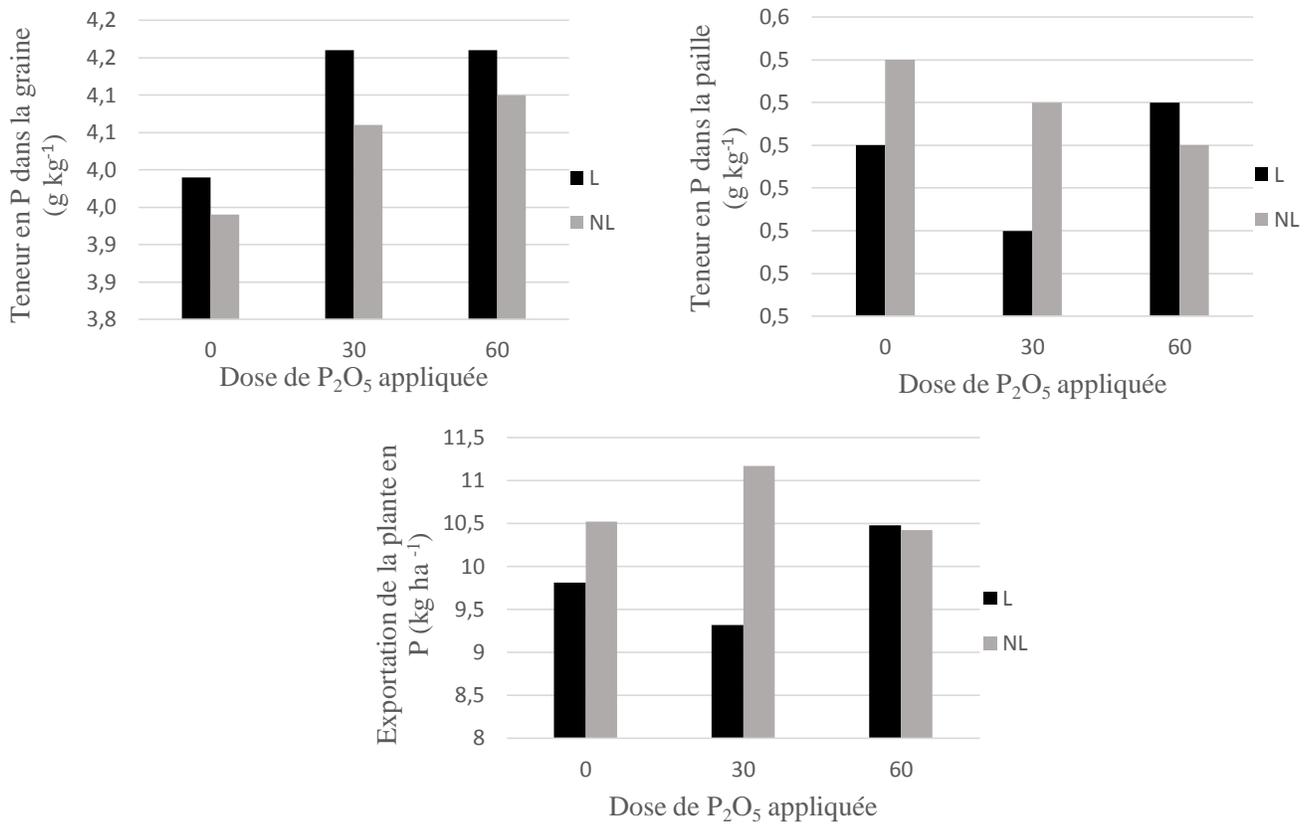


Figure 40 : Effet des doses et des modes d'apport de l'engrais P sur la nutrition phosphatée de la culture de blé dur conduite en monoculture durant l'année 2019-2020.

Discussion

Les résultats obtenus dans cette étude montrent qu'une application de 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ augmente le nombre de gousses produites par plante et au mètre carré par la culture de la lentille, ce qui affecte positivement son rendement en grain. Ceci est en accord avec les résultats de Singh *et al.* (2016) qui trouvent un nombre de gousses plus important chez la lentille avec l'augmentation de la dose de P. Le nombre de gousses qui est un paramètre important pour la formation du rendement chez les légumineuses est significativement affecté par la présence de fortes doses en P, et ce grâce à l'effet positif de cet élément sur la floraison des plantes, notamment, sur le nombre de fleurs produites et la date de la floraison. Selon Maqsood *et al.* (2000), la fertilisation phosphatée stimule la floraison et la fructification des plantes. Ma *et al.* (2002) ont rapporté un nombre de fleurs significativement plus faible et une floraison retardée d'environ 18 jours suite à une réduction de la dose de P appliquée. Les mêmes observations ont été faites par Keatinge *et al.* (1985) qui trouvent que l'application d'engrais phosphaté réduisait le nombre de jours du semis à la floraison à plus de 50 % et Crafts-Brandner (1992) qui trouve que le nombre de gousses et de grains formés par la culture de soja sont fortement et

positivement corrélés avec les doses de P appliquées. Erman *et al.* (2009), qui trouvent une augmentation du nombre de gousses et du rendement d'une culture de légumineuse (*Pisum sativum* L.) avec une dose de 60 kg P ha⁻¹ par rapport à 30 et 0 kg P ha⁻¹ dans un sol déficient en P, suggèrent que cette augmentation est due à une amélioration de la fixation de N₂ suite à une augmentation du nombre de nodules formées. Car le P joue un rôle spécifique dans la nodulation chez les légumineuses (Bordeleau et Prévost 1994 ; Jin *et al.*, 2012). Selon, Qiao *et al.* (2007), le développement et le fonctionnement des nodules requièrent plus de P que la croissance de la plante hôte. En plus de leur rôle dans la fixation de N, ces nodules jouent le rôle de puits de P dans les sols déficients en cet élément (Erman *et al.* (2009).

La culture de blé dur qui suit la culture de lentille en 2020 est peu affectée par l'apport de phosphore. Le rendement en grain et ses composantes (nombre d'épis par mètre carré, nombre de grains par épi et poids de mille grains) n'ont pas été affectés par les apports de phosphore. Mais la biomasse sèche produite a été significativement améliorée par une application de 60 kg P ha⁻¹ par rapport à 30 kg P ha⁻¹ et au témoin sans fertilisation. En revanche, le blé cultivé en monoculture n'a pas montré de réponse aux apports de P ni sur sa productivité ni sur sa nutrition en phosphore pendant les deux années de l'expérience (2019 et 2020).

Cette différence dans la réponse des deux cultures à la fertilisation phosphatée est également signalée par Ryan *et al.* (2008) qui ont constaté que dans les mêmes conditions pédoclimatiques, la culture de lentille montre une meilleure réponse à la fertilisation phosphatée par rapport à la culture de blé dur dans un système de culture blé-lentille au nord de la Syrie. Cela peut être expliqué par la différence des systèmes racinaires des deux espèces. Selon Lynch (1995), les systèmes racinaires qui ont un rapport surface/volume plus élevé sont plus efficaces dans l'exploration de plus grands volumes du sol. Par conséquent, les céréales avec leurs racines ramifiées peuvent explorer plus de volume de sol que les espèces à racines pivotantes moins ramifiées comme celles des légumineuses (Hinsinger *et al.*, 2015). Ainsi, une augmentation du P disponible à proximité des racines peu développées de la lentille affecte directement son rendement (Ryan *et al.*, 2008). De nombreux auteurs rapportent une réponse significative et positive de différentes espèces de légumineuses à la fertilisation en P. Singh *et al.* (2016) ont constaté que le nombre de branches secondaires, le nombre de gousses par plante et le poids de 100 grains de la culture de lentille augmentent de manière significative avec l'augmentation de la dose de P appliquée. Ma *et al.* (2002) ont observé une amélioration de tous les paramètres de rendement d'un lupin blanc en raison d'une augmentation de la dose de phosphore appliquée. De même,

Kamara *et al.* (2008) et Matusso et Cabo (2015) ont constaté de meilleurs rendements de soja avec des niveaux élevés de P (40 et 60 kg P ha⁻¹ respectivement).

D'autre part, le volume important des racines des céréales situées principalement dans la couche superficielle du sol les rend plus efficaces pour absorber les éléments présents dans le sol même en faibles concentrations. Par conséquent, une teneur en P assimilable de 15 ppm dans un sol donné est considérée comme étant suffisante pour un bon développement d'une culture de blé dur (FAO, 2006).

La réponse du blé dur à la fertilisation phosphatée ne dépend pas seulement de la disponibilité du P dans le sol, mais aussi des conditions climatiques et du niveau de productivité de la culture (FAO, 2006). Ainsi, les rendements en grain du blé dur qui tournaient autour de 30 q ha⁻¹ à la première année (2018-2019) relativement favorable, et qui ne dépassaient pas les 20 q ha⁻¹ à la deuxième année (2019-2020) qui est plus chaude et sèche, ne nécessitent pas d'apports importants de P. Cette faible productivité, qui a pour cause principale la déficience pluviométrique, a contribué en partie à la réponse négative de blé dur au P apporté lors de cette étude. D'autre part, la teneur en P dans le sol au début de l'expérience (48 ppm), qui est faible selon Allaire et Angers (2011), mais suffisante pour une culture de blé selon la FAO (2006), explique une autre partie des résultats obtenus.

Nos résultats sont en accord avec ceux obtenus par Grant et Bailey (1998) qui n'ont observé aucun changement dans la productivité du blé en appliquant différentes doses de P dans un sol limono-argileux contenant 40 ppm de P dans les plaines de Canada. Maltais-Landry (2015) ne constate également aucune réponse des céréales cultivées (seigle, avoine et blé) à la fertilisation organique et minérale en P dans un sol assez fourni en P. Cependant, de nombreuses études réalisées dans des sols déficients en phosphore ont rapporté une augmentation du rendement et des composantes du rendement d'un blé dur avec une augmentation des niveaux de P appliqués. Rashid *et al.* (2010) ont rapporté un rendement maximum avec 40 kg P ha⁻¹ dans un sol contenant 0,7 ppm de P assimilable au Pakistan. Rehim *et al.* (2012a) et Rehim *et al.* (2012b) ont obtenu des rendements plus élevés avec une application de 80 kg P ha⁻¹ dans un sol contenant 7,7 ppm de P assimilable. Tandis que Boukhalfa-Deraoui *et al.* (2015) trouvent qu'une dose de 30 kg P ha⁻¹ est suffisante pour atteindre un rendement maximum de blé dur dans un sol sableux qui contient 4 ppm de P au sud de l'Algérie.

L'introduction d'une culture de légumineuses dans la rotation a augmenté d'une manière significative la réponse du blé à la fertilisation phosphatée, induisant une meilleure production de biomasse sèche lorsque le P est appliqué à un taux de 60 kg ha⁻¹. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par Amrani *et al.* (2001) dans un système de culture blé-pois chiche dans les conditions semi-

arides du Maroc et Ryan *et al.* (2008) dans un système blé-lentille en Syrie. Cependant, des études sur des sols alcalins ont montré que lorsque des quantités suffisantes de P étaient fournies aux légumineuses, ces dernières pouvaient avoir un effet négatif (Mat Hassan *et al.*, 2012), ou neutre (Mat Hassan *et al.*, 2013) sur la croissance et l'absorption de P du blé suivant. Dans notre expérimentation, le prélèvement de P par la culture n'a pas été affecté par l'augmentation de la dose de P apportée, ce qui est en accord avec les observations de Mat Hassan *et al.* (2013) qui trouvent des niveaux d'absorption de P similaires par un blé cultivé en monoculture et un blé suivant une culture de lupin blanc. De ce fait, l'augmentation de la biomasse sèche observée dans le blé dur cultivé sur les parcelles ayant reçu 60 kg P ha⁻¹ par rapport à celui cultivé dans les parcelles ayant reçu 30 et 0 kg P ha⁻¹ dans le système lentille-blé dans notre étude, pourraient être attribuée à une meilleure accumulation de N dans ces parcelles par la culture de lentille précédente, grâce à une forte nodulation provoqué par une meilleure présence de P.

La mesure du phosphore assimilable dans le sol après la récolte au cours de la première année de cette étude montre que la teneur en P reste similaire avec les trois doses de P appliquées dans le système de monoculture du blé. Par contre, dans le système lentille-blé, l'application de 60 kg P ha⁻¹ a augmenté de manière significative le P disponible dans le sol. Cela peut être dû à une réduction du pH du sol par la culture de lentilles. Maltais-Landry (2015) trouve un pH du sol plus faible résultant d'une libération importante d'acides organiques par les racines des cultures de légumineuses. Une teneur en P plus élevée dans le sol après une culture de légumineuses est également signalée par Rose *et al.* (2016) qui suggèrent que l'augmentation du P mobilisé après la culture de légumineuses est principalement due à la minéralisation de leurs résidus racinaires (et des résidus de tiges lorsque celles-ci sont maintenues) qui contiennent une concentration importante de P plutôt qu'à des changements spécifiques de la rhizosphère. Certaines légumineuses, comme la féverole et le pois, se sont révélées capables de servir comme des puits de P pour les cultures suivantes, dans des essais de court terme menés en serre par Nuruzzaman *et al.* (2005a) et Nuruzzaman *et al.* (2005b) et Mat Hassan *et al.* (2012) on a montré que la minéralisation des résidus de ces cultures améliore significativement le statut du P du sol et son absorption par les céréales suivantes.

Les méthodes d'application de P n'ont pas affecté les deux cultures durant les deux années, sauf lorsque le blé dur a suivi la culture de lentilles en 2020, où l'application en bande a augmenté de manière significative la teneur en P dans le grain et la paille. La majorité des études réalisées sur l'effet des méthodes d'application d'engrais P sur le rendement et la nutrition phosphatée des cultures rapportent une amélioration des paramètres étudiés par l'application localisée de P en bande par rapport

à son épandage superficiel (Sander *et al.*, 1990 ; Singh *et al.*, 2005 ; Rashid *et al.*, 2010 ; Rehim *et al.*, 2012a ; Rehim *et al.*, 2012b ; Su *et al.*, 2015 ; Lu *et al.*, 2019), mais dans certaines conditions, les auteurs rapportent des réponses similaires des deux méthodes de fertilisation (Selles *et al.*, 2003 ; May *et al.*, 2008). Dans la présente étude, les conditions climatiques et le type de sol ont contribué aux résultats obtenus, les conditions sèches ont limité l'absorption de P par la culture de blé dur. Selon McLaughlin *et al.* (2011), dans des conditions sèches, la diffusion de P est réduite en raison du manque de pores remplis d'eau, ce qui réduit la disponibilité de P près de la zone des racines affectant négativement l'absorption de P par la culture cultivée.

La profondeur et la distance de l'application de l'engrais jouent un rôle clé dans l'efficacité de la fertilisation au phosphore. Dans une étude de Singh *et al.* (2005) menée dans des conditions semi-arides du nord de l'Australie, une augmentation significative du rendement du blé est constatée lorsque le P est appliqué en bande à une profondeur de 10-15 cm par rapport à une application en bande plus superficielle (5-7 cm) ou un épandage en surface ; de plus, une application distante du P, peut induire une carence en P dans les premiers stades de la croissance en raison de la faible prolifération des racines qui ne peuvent atteindre le P appliqué dont la mobilité est très faible. Lu *et al.* (2019) trouvent que l'application d'un engrais P en bande sous la ligne de semis augmente significativement le rendement en grain, le nombre d'épis par mètre carré, le volume des racines, le rendement en matière sèche et l'absorption de P de la culture de blé dur par rapport à l'application de P en bande à 5 et 12 cm de la ligne de semis et l'application de P à la volée, ce qui est en contradiction avec nos résultats.

Conclusion

La carence en phosphore constitue un des défis de l'agriculture dans le monde à cause de sa faible mobilité et son blocage rapide dans les sols acides comme dans les sols alcalins. Les apports en P sont souvent non maîtrisés à cause de la variabilité de sa disponibilité affectée par plusieurs facteurs : le type d'engrais apporté, sa dose, son mode d'application, les facteurs climatiques, le type de sol et le système de culture, notamment les rotations culturales. Le but de cette partie était d'étudier l'effet de l'application de différentes doses d'engrais phosphaté avec deux différentes méthodes (distribué superficiellement ou incorporé localement sous la graine au semis) sur le rendement et la nutrition phosphatée de la culture de blé dur conduite sous différents systèmes de culture (monoculture et rotation lentille-blé) dans les conditions semi-arides pluviales du Nord de l'Algérie.

Les résultats obtenus à partir de cette étude montrent que :

- La lentille est plus sensible à la carence en P que le blé, ainsi, une augmentation du P disponible via les apports d'engrais améliore significativement sa productivité.
- Aucun gain significatif du rendement du blé dur n'est obtenu avec l'augmentation des doses de l'engrais P appliqué. Cela nous permet de conclure que, dans les conditions de la zone d'étude et pour les niveaux de rendement actuels du blé dur, il y a peu ou pas du tout besoin d'une fertilisation phosphatée.
- L'application localisée et l'application superficielle de l'engrais P donnent les mêmes niveaux de production, ainsi, une fertilisation localisée n'est pas nécessaire pour augmenter les rendements et un épandage superficiel n'est pas une contrainte pour les agriculteurs de la région qui disposent rarement de semoirs combinés.
- Finalement, les résultats de cette étude montrent que dans un système de culture légumineuse-blé, les cultures de légumineuses laissent une quantité suffisante de P disponible dans le sol, donc une application de P une année sur deux (appliquée pendant l'année de la légumineuse) peut être suffisante pour maintenir les mêmes niveaux de productivité des deux cultures.

Conclusion générale

Conclusion générale

Afin de pouvoir mieux gérer les fluctuations des rendements des céréales, particulièrement le blé dur, dues essentiellement à la fluctuation des précipitations sous climat méditerranéen ; et afin de pouvoir faire face aux changements climatiques dont les effets commencent déjà à se manifester par des sécheresses de plus en plus fréquentes, et de préserver les ressources de production les plus importantes (eau, sol, éléments nutritifs), le système d'agriculture de conservation est adopté massivement dans certaines régions dans le monde, notamment aux Amériques et en Australie. Cependant, en Algérie, ce système reste inconnu pour beaucoup de nos agriculteurs, ce qui justifie son faible taux d'adoption par rapport aux pays développés et même par rapport à nos voisins maghrébins.

C'est dans le contexte de tester l'effet de système d'agriculture de conservation dans les conditions semi-arides algériennes, que s'est élaborée la première partie de cette thèse qui avait comme objectif de comparer l'AC aux systèmes de culture conventionnels, sur la production en quantité et en qualité, ainsi que sur la nutrition phosphatée de la culture de blé dur, qui est la culture la plus pratiquée dans le pays et dont l'importance est souvent associée à la sécurité alimentaire.

Basés sur les résultats des études précédentes, nos hypothèses suggéraient que, les systèmes de travail réduit du sol et de semis direct pratiqués sur les résidus de cultures précédentes, vont donner des rendements de blé dur plus importants que le labour conventionnel lorsque la pluviométrie est réduite. Par contre, dans les conditions suffisamment humides le travail conventionnel du sol devrait donner des rendements statistiquement meilleurs, en particulier, durant les premières années de transition. La nutrition minérale, notamment, la nutrition phosphatée serait améliorée par un travail du sol de conservation (TM et SD) grâce à une stratification de la matière organique et des éléments nutritifs en surface en l'absence d'une perturbation du sol. Nos hypothèses suggéraient aussi que le système de monoculture de blé aurait un effet négatif sur la qualité du grain de blé dur et sa nutrition phosphatée à cause d'un épuisement du sol, et sur sa productivité à cause de l'incidence des maladies fongiques.

Les résultats obtenus lors de cette étude, menée sur trois ans dans région d'El hachimia située dans la wilaya de Bouira, nous ont permis de vérifier certaines de ces hypothèses et d'ouvrir des perspectives pour vérifier les autres avec des études plus poussées et des essais de long termes.

D'après les résultats obtenus, le système de travail du sol affecte, effectivement, d'une façon significative le rendement durant l'année 2019-2020, où la pluviométrie n'a pas dépassé 249 mm durant le cycle de la culture de blé dur. Le SD donnant une meilleure levée, une meilleure densité d'épis au mètre carré, et ainsi de meilleurs rendements en grain et en biomasse sèche. Alors que, durant les années les plus humides (2017-2018 et 2018-2019), où la pluviométrie a dépassé 320 mm, les trois

systèmes de travail du sol ont donné des rendements statistiquement similaires et aucun avantage significatif n'a découlé d'un labour profond du sol.

Nos résultats démontrent aussi que l'interaction entre le travail du sol et le climat a un effet significatif sur la qualité du grain de blé dur. Le TC donne un pourcentage de mitadinage plus important dans les conditions humides à cause d'un lessivage de l'azote, tandis que, les systèmes de travail de conservation (TM et SD) préservent un aspect vitreux du grain de blé dur appréciable quelles que soient les conditions de l'année. Cela nous emmène à conclure que l'adoption de TM ou de SD peut être recommandée dans les conditions de la région d'étude avec tous les avantages de ces deux techniques sur la stabilité de la production de blé dur en quantité et en qualité.

Les résultats obtenus dans cette première partie de la thèse, nous permettent de conclure que la rotation légumineuse-blé est la plus adéquate dans la région d'étude. En plus du gain garanti de rendement, le précédent légumineuse (représenté par la culture de lentille dans cette étude) améliore la qualité semoulière et nutritive du blé suivant en améliorant sa teneur en protéines, son aspect vitreux, ainsi que sa teneur en phosphore.

Une réduction de pH pendant toute la durée de l'expérimentation est repérée dans le système de semis direct, cette réduction étant significative à la troisième année de l'essai (2018-2019), nous permet de déduire que le système de semis direct grâce à la couverture végétale permanente entraîne une acidification du sol, ce qui permettra à long terme d'améliorer la disponibilité du phosphore dans les horizons de surface. La nutrition phosphatée de la culture de blé et la teneur en P dans les 10 premiers centimètres du sol ne varient pas selon le type de travail du sol, au moins durant les premières années de transition (5 ans). Par contre, la rotation culturale affecte significativement ces paramètres, le précédent jachère entraînant des concentrations en P significativement réduites dans le grain et dans la paille de blé suivant, et ce à cause de l'érosion accentuée dans un sol nu.

La nutrition minérale, notamment la nutrition phosphatée, pourrait constituer un frein pour la production dans les zones semi-arides algériennes. La qualité calcaire des sols, le travail intensif du sol et sa vulnérabilité à l'érosion hydrique ainsi que l'application superficielle des engrais sont des facteurs qui menacent la disponibilité du phosphore pour les plantes cultivées, notamment le blé dur. Une stratégie de fertilisation réussie doit tenir compte du système de culture adopté, de la qualité du sol et de l'efficacité d'utilisation de P par la culture. En effet, la deuxième partie de cette thèse qui avait comme objectif de comparer l'effet de différentes doses d'engrais phosphatés apportés en surface ou incorporés avec la graine au semis sur la production et la nutrition phosphatée de la culture de blé dur conduite en monoculture où dans un système de culture lentille-blé montre que, ce dernier est plus

efficace en utilisation d'engrais P que le système de monoculture de blé dur. L'augmentation de la dose de P augmente significativement le rendement de la lentille, la teneur en P disponible dans le sol, et le rendement en matière sèche de la culture de blé dur suivante. Ce qui est dû probablement à une acidification du sol grâce à une forte sécrétion d'acides organiques par les cultures de légumineuses.

La durée des essais menés dans cette thèse (5 ans pour l'essai des systèmes de cultures et 2 ans pour les essais de fertilisation), n'est pas suffisante pour mettre en évidence tous les avantages du système d'agriculture de conservation, de l'apport localisé des engrais ou de l'effet de la rotation sur la mobilisation du P bloqué dans le sol. Par conséquent, les conclusions tirées ne peuvent encore être généralisées. Pour cela nous recommandons que des recherches supplémentaires soient envisagées afin de compléter ce travail qui pourrait servir à un probable programme de vulgarisation.

Comme perspectives à ce travail nous proposons :

- De poursuivre l'expérimentation à long terme afin d'apporter de nouvelles innovations et de mieux adapter les pratiques de l'agriculture de conservation aux conditions spécifiques de chaque région. Un point de départ pourrait être par exemple la gestion des résidus de culture, qui peuvent avoir une grande influence sur la productivité et la qualité du blé dur, mais aussi sur la fertilité du sol et ses conditions structurelles.
- D'étudier l'effet à long terme du système d'agriculture de conservation dans différents types de sol et dans différentes régions céréalières de l'Algérie, notamment, sur l'amélioration :
 - ✓ de la fertilité du sol, spécialement sur l'amélioration des taux de matière organique ;
 - ✓ de la structure du sol, en étudiant l'effet sur le compactage du sol et sa vulnérabilité à l'érosion ;
- D'étudier l'effet de ce système sur l'aspect sanitaire, notamment sur l'incidence des maladies fongiques ;
- Il serait très important aussi d'accompagner ce genre d'essais par une étude économique, cela implique la possibilité de montrer la rentabilité de l'agriculture de conservation d'un point de vue économique et environnemental, et pourrait aider les agriculteurs à adopter cette approche agronomique plutôt qu'une approche conventionnelle dont les limites sont rendues claires il y a déjà un bon nombre d'années, particulièrement dans les zones agricoles arides et semi-arides du bassin méditerranéen.
- Pour garantir une meilleure nutrition en P de la culture de blé dur, nous recommandons d'étudier l'effet à long terme des différentes cultures précédentes (notamment les légumineuses)

sur la mobilisation des résidus des engrais P précédemment appliqués pour une meilleure gestion de la fertilisation et une production agricole durable. Puis de faire une série d'études sur différents types de sol servant à déterminer selon les conditions de chaque région (type du sol, système de culture adopté, niveaux de production) les niveaux de P dans le sol pour lesquels la fertilisation phosphatée est économiquement rentable.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. Abdellaoui, Z., Tissekrat, H., Belhadj, A., Zeghouane, O. (2011). Etude comparative de l'effet du travail conventionnel, semis direct et travail minimum sur le comportement d'une culture de blé dur dans la zone sub-humide. Les actes des 4e Rencontres Méditerranéennes du Semis Direct. Sétif Algérie 3-5 mai 2010. *Recherche agronomique* (N° spécial): 68-82.
2. Acar, M.; Çelik, I.; Günal, H. (2017). Effects of long-term tillage systems on soil water content and wheat yield under Mediterranean conditions. *J. New Theory*, 17, 98–108. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/407742>
3. Acar, M., Çelik I., Günal H., (2018). Effects of long-term tillage systems on aggregate-associated organic carbon in the eastern Mediterranean region of Turkey. *Eurasian J Soil Sci.* 7 (1): 51 -58. <https://doi: 10.18393/ejss.335329>
4. Alessi, J., Power, J.F. (1980). Effects of banded and residual fertilizer phosphorus on dryland spring wheat yield in the northern plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:792-796.
5. Ali, S. A., Tedone, L., Verdini, L., Cazzato, E., De Mastro, G. (2019). Wheat response to no-tillage and nitrogen fertilization in a long-term faba bean-based rotation. *Agronomy*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/agronomy9020050>
6. Alijani, K., Bahrani, M.J., Kazemeini, S.A. (2012). Short-term responses of soil and wheat yield to tillage, corn residue management, and nitrogen fertilization. *Soil Tillage Res.* 124: 78–82.
7. Allaire, S., Angers, D. (2011). Guide de référence en fertilisation. 2^{ème} édition. CRAAQ (Québec). 519 P.
8. Alvaro, F., Isidro, J., Villegas, D., Garcia Del Moral, L.F., Royo, C. (2008). Breeding effects on grain filling, biomass partitioning and remobilization in Mediterranean durum wheat. *Agron. J.* 100:361—370. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0075>
9. Alvey, S., Bagayok, O.M., Neumann, G., Buerkert, A. (2001). Cereal/legume rotations affect chemical properties and biological activities in two West African soils. *Plant and Soil*, 231: 45–54. <https://doi.org/10.1023/A:1010386800937>
10. Amara, M., Feddal, M. A., Hamani, A. (2014). Analyse du comportement du sol sous l'action de trois techniques de mise en place d'un blé dur (*Triticum durum*). Effet sur le développement des racines et conséquences sur le rendement. *Nature Technology*, 12:130-141.

11. Amato, G., Ruisi, P., Frenda, A.S., Di Miceli, G., Saia, S., Plaia, A., Giambalvo, D. (2013). Long-Term Tillage and Crop Sequence Effects on Wheat Grain Yield and Quality. *Agron. J.*, 105: 1317–1327. <https://doi.org/10.2134/agronj2013.0019>
12. Amrani, M., Westfall, D.G. & Moughli, L. (2001). Phosphorus management in continuous wheat and wheat-legume rotations. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 59: 19–27. <https://doi.org/10.1023/A:1009886802088>
13. Angus, J.F.; Kirkegaard, J.A.; Hunt, J.R.; Ryan, M.H.; Ohlander, L.; Peoples, M.B. (2015). Break crops and rotations for wheat. *Crop Pasture Sci.*, 66: 523–552. <https://doi.org/10.1071/CP14252>
14. Anken, T., Stamp, P., Richner, W., Walther, U., Weisskopf, P. and Rek, J. (2006). Nitrate leaching and soil structural properties under conventionally cultivated and no-till crops. Proceedings of the 17th conference of the soil and tillage research organisation, 28.08.-01.09., Kiel, 6 p.
15. Anne, P. (1945). Sur le dosage du carbone organique des sols. *Ann. Agron.* 2: 161–166.
16. Arduini, I., Masoni, A., Ercoli, L., Mariotti, M. (2006). Grain yield, and dry matter and nitrogen accumulation and remobilization in durum wheat as affected by variety and seeding rate. *Eur. J. Agron.* 25: 309-318. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.06.009>
17. Arihara, J., Karasawa, T. (2000). Soil Science and Plant Nutrition Effect of previous crops on arbuscular mycorrhizal formation and growth of succeeding maize Effect of Previous Crops on Arbuscular Mycorrhizal Formation and Growth of Succeeding Maize. *Soil Science and Plant Nutrition*, 46:1, 43-51, <https://doi.org/10.1080/00380768.2000.10408760>
18. Arvidsson, J.; Westlin, A.; Sörensson, F. (2013). Working depth in non-inversion tillage Effects on soil physical properties and crop yield in Swedish field experiments. *Soil Tillage Res.*, 126, 259–266. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.08.010>
19. Atkinson, D. (1973). Some general effects of phosphorus efficiency on growth and development. *New phytol* (72): 101-111.
20. Aziz, T., Rahmatullah, Maqsood, M.A., Mansoor T. (2005). Differences in phosphorus absorption, transport, and utilization by twenty rice (*Oriza sativa* L.) cultivars. *Pak J Agric Sci*, 42:8-13.
21. Aziz, I., Mahmood, T., Islam, K. R. (2013). Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality. *Soil and Tillage Research*, 131: 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.03.002>

22. Baan, C.D., Grevers, M.C.J., Schoenau, J.J. (2009). Effects of a single cycle of tillage on long-term no-till prairie soils. *Can. J. Soil Sci.* 89: 521–530. <https://doi.org/10.4141/cjss08041>
23. Bado, B.V., Bationo, A., Cescas, M.P. (2006). Assesment of cowpea and groundnut contribution to soil fertility and succeeding sorghum yields in the Guinean savannah zone of Burkina Faso (West Africa). *Boil. fertil. soils* (43): 171-176. <https://doi.org/10.1007/s00374-006-0076-7>
24. Bai, Z., Caspari, T., Gonzalez, M. R., Batjes, N. H., Mäder, P., Bünemann, E. K., de Goede, R., Brussaard, L., Xu, M., Ferreira, C. S. S., Reintam, E., Fan, H., Mihelič, R., Glavan, M., Tóth, Z. (2018). Effects of agricultural management practices on soil quality: A review of long-term experiments for Europe and China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 265, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.05.028>
25. Barry, D.A.J., Miller, M.H. (1989). Phosphorus nutritional- requirement of maize seedlings for maximum yield. *Agron J.* (81):95–99.
26. Beaudin, I. (2008). « Revue de littérature : La mobilité du phosphore. Version finale », Québec, Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, 137 p.
27. Bell, L. C. (1968). Nature and transformation of crystalline phosphates produced by interaction of phosphate fertilizers with slightly acid and alkaline soils. Iowa State University. <https://doi:10.31274/rtd-180816-1694>
28. Ben Moussa-Machraoui, S., Errouissi, F., Ben-Hammouda, M., Nouira, S. (2010). Comparative effects of conventional and no-tillage management on some soilproperties under Mediterranean semi-arid conditions in northwestern Tunisia. *Soil and tillage*, 106: 247-253. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.10.009>
29. Bescansa, P., Imaz, M. J., Virto, I., Enrique, A., Hoogmoed, W. B. (2006). Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain. *Soil and Tillage Research*, 87(1), 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.028>
30. Bessam, F., Mrabet, R. (2003). Long-term changes in soil organic matter under conventional tillage and no-tillage systems in semiarid Morocco. *Soil Use and Management*, 19(2), 139–143. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2003.tb00294.x>
31. Betencourt, E., Duputel, M., Colomb, B., Desclaux, D., Hinsinger, P. (2012). Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus

- availability in a low P soil. *Soil Biol Biochem*, 46:21–33. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.11.015>
32. Bilal, H. M., Aziz, T., Maqsood, M. A., Muhammad, H., Aziz, T., Maqsood, M. A. (2019). Grain phosphorus and phytate contents of wheat genotypes released during last 6 decades and categorization of selected genotypes for phosphorus use efficiency. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(6): 727–740. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1521957>
33. Bittman, S., C.G. Kowalenko, D.E. Hunt, T.A. Forge, and X. Wu. (2006). Starter phosphorus and broadcast nutrients on corn with contrasting colonization by mycorrhizae. *Agron. J.* 98:394–401. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0093>
34. Bonetti, R., Montanheiro, M., Saito, S. (1984). The effects of phosphate and soil moisture on the nodulation and growth of *Phaseolus vulgaris*. *J. Agric. Sci.*, 103:95–102. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0021859600043367>
35. Bonny, S. (2011). L'agriculture écologiquement intensive :nature et défis. *Cahiers Agricultures*, 20(6) : 451-462. doi : 10.1684/agr.2011.0526
36. Bordeleau, L.M., Prévost, D. (1994). Nodulation and nitrogen fixation in extreme environments. *Plant Soil*, 161: 115–125. <https://doi.org/10.1007/BF02183092>
37. Borie, F., Redel, Y., Rubio, R., Rouanet, J.L., Barea, J.M., (2002). Interactions between crop residues application and mycorrhizal developments and some soil–root interface properties and mineral acquisition by plants in an acidic soil. *Biol. Fertil. Soils*, 36: 151–160. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0508-y>
38. Borie, F., Rubio, R., Morales, A., Castillo, C., (2000). Relationships between arbuscular mycorrhizal hyphal density and glomalin production with physical and chemical characteristics of soils under no-tillage. *Rev. Chil.Hist. Nat.* 73 : 749–756.
39. Boukhalfa-Deraoui, N., Hanifi-Mekliche, L., Mekliche, A., Mihoub, A., Daddibouhoun, M., (2015). Effect of phosphorus application on durum wheat in alkaline sandy soil in arid conditions of southern Algeria. *Asian journal of crop science*, 7 (1): 61-71.
40. Bouzerzour, H., Mahnane, S. (2006). Une association pour une agriculture de conservation sur les hautes plaines orientales semi-arides d'Algérie. *Options Méditerranéennes Série A*, 69, 107–111. <http://om.ciheam.org/om/pdf/a69/06600091.pdf>

41. Caesar-tonthat, T., Sainju, U. M. (2011). Long-term tillage and cropping effects on microbiological properties associated with aggregation in a semi-arid soil. *Biol Fertil Soils*, 47: 157–165. <https://doi.org/10.1007/s00374-010-0508-2>
42. Calzarano, F.; Stagnari, F.; D'Egidio, S.; Pagnani, G.; Galieni, A.; Di Marco, S.; Metruccio, E.G.; Pisante, M. (2018). Durum Wheat Quality, Yield and Sanitary Status under Conservation Agriculture. *Agriculture*, 8, 140. <https://doi.org/10.3390/agriculture8090140>
43. Campbell, C.A., R.P. Zentner, F. Selles, P.G. Jefferson, B.G. McConkey, R. Lemke, and B.J. Blomert. (2005). Long-term effect of cropping system and nitrogen and phosphorus fertilizer on production and nitrogen economy of grain crops in a Brown Chernozem. *Can. J. Plant Sci.* 85:81–93. <https://doi.org/10.4141/P03-215>
44. Campiglia, E., Mancinelli, R., De Stefanis, E., Pucciarmati, S., Radicetti, E. (2015). The long-term effects of conventional and organic cropping systems, tillage managements and weather conditions on yield and grain quality of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) in the Mediterranean environment of Central Italy. *Field Crops Res.*, 176, 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.02.021>
45. Carlesso, R., Spohr, R.B., Eltz, F.L.F., Flores, C.H., (2011). Runoff estimation in southern Brazil based on Smith's modified model and the Curve Number method. *Agric. Water Manag.* 98, 1020–1026. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.01.012>
46. Castellini, M., Fornaro, F., Garofalo, P., Giglio, L., Rinaldi, M., Ventrella, D., Vitti, C., Vonella, A.V. (2019). Effects of no-tillage and conventional tillage on physical and hydraulic properties of fine textured soils under winter wheat. *Water*, 11, 484. <https://doi.org/10.3390/w11030484>
47. Chaieb, N., Rezgui, M., Ayed, S., Bahri, H., Cheikh M'hamed, H., Rezgui, M., Annabi, M. (2020). Effects of tillage and crop rotation on yield and quality parameters of durum wheat in Tunisia. *J. Anim. Plant Sci.* 44 (2): 7654-7676. <http://m.elewa.org/Journals/about-japs/>
48. Chien, S. H., Prochnow, L. I., Tu, S., Snyder, C. S. (2011). Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility : an update review. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 89: 229–255. <https://doi.org/10.1007/s10705-010-9390-4>
49. CNCC. (2015). Bulletin des variétés de céréales autogames. 255p.
50. Colecchia, S.A.; Basso, B.; Cammarano, D.; Gallo, A.; Mastrangelo, A.M.; Pontieri, P.; Del Giudice, L.; Pignone, D.; De Vita, P. (2013). On the relationship between N management

- and grain protein content in six durum wheat cultivars in Mediterranean environment. *J. Plant Interact.*, 8, 271–279. [
51. Colecchia, S. A., De Vita, P., Rinaldi, M. (2015). Effects of tillage systems in durum wheat under rainfed mediterranean conditions. *Cereal Research Communications*, 43(4), 704–716. <https://doi.org/10.1556/0806.43.2015.015>
 52. Cordell, D., White, S. (2013). Sustainable Phosphorus Measures: Strategies and Technologies for Achieving Phosphorus Security. *Agronomy*, 3: 86-116. <https://doi.org/10.3390/agronomy3010086>
 53. Cosentino, S.L., Sanzone, E., Testa, G., Patanè, C., Anastasi, U., Scordia, D. (2019). Does post-anthesis heat stress affect plant phenology, physiology, grain yield and protein content of durum wheat in a semi-arid Mediterranean environment? *J. Agron. Crop. Sci.*, 205, 309–323. <https://doi.org/10.1111/jac.12323>
 54. Crafts-Brandner, S. J. (1992). Significance of leaf phosphorus remobilization in yield production in soybean. *Crop Sci.* 32: 420–424. <https://doi.org/10.2135/cropsci1992.0011183X003200020028x>
 55. De Almeida, W. S., Panachuki, E., de Oliveira, P. T. S., da Silva Menezes, R., Sobrinho, T. A., de Carvalho, D. F. (2018). Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. *Soil and Tillage Research*, 175, 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.009>
 56. 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 and Tillage Research*, 190: 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.012>
 57. De Sanctis, G., Roggero, P. P., Seddaiu, G., Orsini, R., Porter, C. H., Jones, J. W. (2012). Long-term no tillage increased soil organic carbon content of rain-fed cereal systems in a Mediterranean area. *European Journal of Agronomy*, 40, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.02.002>
 58. 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 and Tillage Research*, 92(1–2), 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.01.012>
 59. Del Moral, L.F.G., Rharrabti, Y., Martos, V., Royo, C. (2007). Environmentally induced changes in amino acid composition in the grain of durum wheat grown under different

- water and temperature regimes in a Mediterranean environment. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55: 8144-8151. DOI: 10.1021/jf063094q
60. Deraoui, N., Hanifi, L., Mekliche, A., Mihoub, A. (2016). Effect of Phosphorus Application on Durum Wheat in Alkaline Sandy Soil in Arid Condition of Southern Algeria. *Asian journal of crop science*, 7(1): 61-71. <https://doi.org/10.3923/ajcs.2015.61.71>
61. Derpsch, R. (1998). Historical review of no-tillage cultivation of crops. The 1st JIRCAS Seminar on Soybean Research. No-Tillage Cultivation and Future Research Needs. 13, 1–18.
62. Derpsch, R. (2008). No-tillage and conservation agriculture: a progress report. World Association of Soil and Water Conservation, 3, 7–39. <https://www.researchgate.net/publication/284459787>
63. Dinelli, G.; Marotti, I.; Di Silvestro, R.; Bosi, S.; Bregola, V.; Accorsi, M.; Di Loreto, A.; Benedettelli, S.; Ghiselli, L.; Catizone, P. (2013). Agronomic, nutritional and nutraceutical aspects of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars under low input agricultural management. *Ital. J. Agron.*, 8, 85–93.
64. Dick, W.A. (1983). Organic Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Concentrations and pH in Soil Profiles as Affected by Tillage Intensity. *Soil Science Society of America Journal*, 47: 102-107. <https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700010021x>
65. Dong, W., Hu, A. C. (2009). Tillage and residue management effects on soil carbon and CO₂ emission in a wheat–corn double-cropping system. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 83: 27–37. <https://doi.org/10.1007/s10705-008-9195-x>
66. Doolette, A., Armstrong, R., Tang, C., Guppy, C., Mason, S., McNeill, A., (2019). Phosphorus uptake benefit for wheat following legume break crops in semi-arid Australian farming systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 113(3), 247–266. <https://doi.org/10.1007/s10705-019-09977-0>
67. Doran, J.W., Elliott, E.T., Paustian K. (1998). Soil microbial activity, nitro-gen cycling, and long-term changes in organic carbon pools as related to fallow tillage management. *Soil Tillage Res.* 49:3–18. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00150-0](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00150-0)
68. DuPont, F.M., Altenbach, S.B. (2003). Molecular and biochemical impacts of environmental factors on wheat grain development and protein synthesis. *Journal of Cereal Science*, 38: 133-146. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(03\)00030-4](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(03)00030-4)

69. Durán, Z.V.H., Rodríguez, P.C.R., Francia, M.J.R., Cárceles, R.B., Martínez, R.A., Pérez, G.P. (2007). Harvest intensity of aromatic shrubs vs. soil-erosion: an equilibrium for sustainable agriculture (SE Spain). *CATENA*, 73(1): 107-116 <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.09.006>
70. Duràn, V. H. D., Pleguezuelo, C. R. R. (2008). Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 28 (1): 65–86. <https://doi.org/10.1051/agro:2007062>
71. Ehdaie, B., Waines, J.G. 2001. Sowing date and nitrogen rate effects on dry matter and nitrogen partitioning in bread and durum wheat. *Field Crops Res.* 73:47-61. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00181-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00181-2)
72. Engelstad OP., Patrick WH., Mikkelsen DS., Wells B.R., 1985. Plant Nutrient Behavior in Flooded Soil. *Fertilizer Technology and Use*. doi:10.2136/1985.fertilizer technology.c6
73. Ercoli, L, Arduini, I, Mariotti, M, Masoni, A. (2010). Post-anthesis dry matter and nitrogen dynamics in durum wheat as affected by nitrogen and temperature during grain filling. *Cereal Research Communications*, 38: 294-303. <https://doi.org/10.1556/CRC.38.2010.2.16>
74. Ercoli, L., Masoni, A., Mariotti, M., Pampana, S., Pellegrino, E., Arduini, I. (2017). Effect of preceding crop on the agronomic and economic performance of durum wheat in the transition from conventional to reduced tillage. *European Journal of Agronomy*, 82, 125–133. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.10.010>
75. Erman, M, Yildirim, B, Togay, N, Cig, F. (2009). Effect of phosphorus application and rhizobium inoculation on the yield, nodulation and nutrient uptake in field pea (*Pisum sativum* sp arvense L.). *J. Anim. Vet. Adv.* 8:301–304. <https://medwelljournals.com/abstract/?doi=javaa.2009.301.304>
76. ESDAC (2019). <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/resource-type/datasets>
77. FAO (2006). Nutrient management guidelines for some major field crops in Plant nutrition for food security. Rome. 348 p. <https://www.fao.org/3/a0443e/a0443e04.pdf>
78. FAO (2021). <https://www.fao.org/conservation-agriculture/overview/conservation-agriculture-principles/fr/>
79. Farmaha, B.S., F.G. Fernández, and E.D. Nafziger. (2012). Distribution of soybean roots, soil water, phosphorus and potassium concentrations with broadcast and subsurface-band fertilization. *Soil Sci. Soc. Am..J.* 76:1079–1089. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0202>

80. Farooq, M., Siddique, K. H. M. (2015). Conservation agriculture. *Conservation Agriculture*, 1–665. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11620-4>
81. Fellahi, Z., Chennafi, H., Makhlouf, M., Bouzerzour, H. (2013). Effets des résidus et du travail du sol sur la production de la biomasse et le rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf., variété MBB) en lien avec l'utilisation de l'eau dans les conditions semi-arides des Hautes Plaines Sétifiennes. *Revue Agriculture*. 06 : 03 – 11.
82. Ferreira, M. (2011). Dynamique d'assemblage des protéines de réserve et du remplissage du grain de blé dur. Thèse doctorat, Montpellier, SupAgro, Biochimie, Chimie et Technologie des Aliments. 283 p. www.secheresse.info/spip.php?article22179
83. Fixen, P. (1992). Optimum fertilizer products and practices for temperate-climate agriculture. In: J.J. Schultz, editor, Phosphorus and the environment. International Fertilizer Development Center, Tampa, FL. p. 77–85.
84. Flis, S. (2018). 4R history and recent phosphorus research. *Crops Soils*, 51:36–47. doi:10.2134/cs2018.51.0207
85. Friedrich, T., Derpsch, R., Kassam, A. (2017). Sustainable Development of Organic Agriculture. 6, 0–7. <https://doi.org/10.1201/9781315365800>
86. Frossard, E., Julien, P., Neyroud, J.A., Sinaj, S., (2004). Le phosphore dans les sols. État de la situation en Suisse. *Cahier de l'environnement*, 368. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne. 180 p.
87. Gaba, S., Lescourret, F., Boudsocq, S., Enjalbert J., Hinsinger, P., Journet E. P., Navas M.L., Wéry, J., Louarn G., Malézieux, E., Pelzer, E., Prudent, M., Ozier-Lafontaine, H., (2015). Multiple cropping systems as drivers for providing multiple ecosystem services: from concepts to design. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 607–623. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0272-z>
88. Gahoonia, T.S., Care, D., Nielsen, N.E., (1997). Root hairs and phosphorus acquisition of wheat and barley cultivars. *Plant and Soil*, 191, 181-188. <https://doi.org/10.1023/A:1004270201418>
89. Gawęda, D., Haliniarz, M. (2021). Grain Yield and Quality of Winter Wheat Depending on Previous Crop and Tillage System. *Agriculture*, 11, 133. <https://doi.org/10.3390/agriculture11020133>
90. Giambalvo, D., Ruisi, P., Saia, S. Di Miceli, G., Frenda A.S., Amato G. (2012) Faba bean grain yield, N₂ fixation, and weed infestation in a long-term tillage experiment under

- rained Mediterranean conditions. *Plant Soil*, 360: 215–227.
<https://doi.org/10.1007/s11104-012-1224-5>
91. Girma, K., K.L. Martin, K.W. Freeman, J. Mosali, R.K. Teal, W.R. Raun, S.M. Moges, and D.B. Arnall. (2007). Determination of optimum rate and growth stage for foliar-applied phosphorus in corn. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 38:1137–1154.
<https://doi.org/10.1080/00103620701328016>
92. Gooding, M.J., Ellis, R.H., Shewry, P.R., Schofield, J.D. (2003). Effects of restricted water availability and increased temperature on the grain filling, drying and quality of winter wheat. *Journal of Cereal Science*, 37, 295-309. <https://doi.org/10.1006/jcrs.2002.0501>
93. Graham, J.H., Abbott, L.K. (2000). Wheat responses to aggressive and non-aggressive arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil*, 220: 207–218.
<https://doi.org/10.1023/A:1004709209009>
94. Grant, C.A., Bailey, L.D., (1998). Nitrogen, phosphorus and zinc management effects on grain yield and cadmium concentration in two cultivars of durum wheat. *Can. J. Plant Sci.* 78: 63–70.
95. Grant, C.A., Flaten, D.N., Tomasiewicz, D.J., Sheppard, S.C. (2001). The importance of early season phosphorus nutrition. *Can. J. Plant Sci.* 81: 211–224.
<https://doi.org/10.4141/P00-093>
96. Grant, C.A., Monreal, M.A., Irvine, R.B., Mohr, R.M., McLaren, D.L., Khakbazan, M., Canada, A. (2009). Crop response to current and previous season applications of phosphorus as affected by crop sequence and tillage. *Can. J. Plant Sci.* 89:49-66.
<https://doi.org/10.4141/CJPS0717>
97. Grant, C. A., Flaten, D. N. (2019). 4R Management of Phosphorus Fertilizer in the Northern Great Plains. *Journal of Environmental Quality*. Special section.
<https://doi.org/10.2134/jeq2019.02.0061>
98. Grant, C., Bittman, S., Montreal, M., Plenchette, C., Morel, C. (2005). Soil and fertilizer phosphorus: Effects on plant P supply and mycorrhizal development. *Can. J. Plant Sci.* 85: 3–14. <https://doi.org/10.4141/P03-18>
99. Grant, C.A., Lafond G.P. (1994). The effects of tillage systems and crop rotations on soil chemical properties of a Black Chernozemic soil. *Can. J. Soil Sci.* 74:301–306.
<https://doi.org/10.4141/cjss94-04>

100. Hafsi, M., Akhter, J., Monneveux, P. (2007). Leaf senescence and carbon isotope discrimination in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) under severe drought conditions. *Cereal Res. Commun.* 35:71-80. DOI: 10.1556/CRC.35.2007.1.9
101. Henin, S., Gras, R. Monnier, G., 1969. Le profil cultural. Ed. Masson. 2ème édition. Paris. 323p.
102. Hernánz, J.L.; Girón, V.S.; Cerisola, C. (1995). Long-term energy use and economic evaluation of three tillage systems for cereal and legume production in central Spain. *Soil Tillage Res.*, 35, 183–198. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(95\)00490-4](https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00490-4)
103. Hernánz, J. L., Sánchez-Girón, V., Navarrete, L. (2009). Soil carbon sequestration and stratification in a cereal/leguminous crop rotation with three tillage systems in semiarid conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 133(1–2), 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.05.009>
104. Hernánz, J.L., R. López, L. Navarrete, and V. Sánchez-Girón. (2002). Long-term effects of tillage systems and rotations on soil structural stability and organic carbon stratification in semiarid central Spain. *Soil Tillage Res.* 66:129–141. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00021-1](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00021-1)
105. Hinsinger, P., Herrmann, L., Lesueur, D., Robin, A., Trap, J., Waithaisong, K., Plassard, C., (2015). Impact of roots, microorganisms, and microfauna on the fate of soil phosphorus in the rhizosphere. In: W. PLaxton, H. Lambers (eds), Phosphorus metabolism in plants in the post-genomic era: from gene to ecosystems. John Wiley and Sons, Ltd.
106. Hobbs, P. R., Sayre, K., Gupta, R. (2008). The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 543–555. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2169>
107. Holanda, F.S.R., D.B. Mengel, M.B. Paula, J.G. Carvaho, and J.C. Bertoni. (1998). Influence of crop rotations and tillage systems on phosphorus and potassium stratification and root distribution in the soil profile. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29:2383–2394. <https://doi.org/10.1080/00103629809370118>
108. Holford I.C.R. (1997). Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. *Aust J Soil Res*, 35: 227-239. <https://doi.org/10.1071/S96047>
109. Itoh, S., Barber, S.A. (1983). Phosphorus uptake by six plant species as related to root hairs. *Agron. J.*, 75: 457–461. <https://doi.org/10.2134/agronj1983.00021962007500030010x>

110. Jakobsen, I. (1985). The role of phosphorus in nitrogen fixation by young pea plants (*Pisum sativum*). *Physiol. Plant.* 64:190–196. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1985.tb02334.x>
111. Jansa, J. A. N., Wiemken, A., Frossard, E. (2006). The effects of agricultural practices on arbuscular mycorrhizal fungi. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2006.266.01.08>
112. Jaziri, S.; M'hamed, H.C.; Rezgui, M.; Labidi, S.; Souissi, A.; Rezgui, M.; Barbouchi, M.; Annabi, M.; Bahri, H., (2022). Long Term Effects of Tillage–Crop Rotation Interaction on Soil Organic Carbon Pools and Microbial Activity on Wheat-Based, System in Mediterranean Semi-Arid Region. *Agronomy*, 12, 953. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040953>
113. Jin, J., Tang, C., Armstrong, R., Sale, P. (2012). Phosphorus supply enhances the response of legumes to elevated CO₂ (FACE) in a phosphorus-deficient vertisol. *Plant and Soil*, 358(1-2), 91–104. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1270-z>
114. Jing, J., Zhang, F., Rengel, Z. Shen, J. (2012). Localized fertilization with P plus N elicits an ammonium-dependent enhancement of maize root growth and nutrient uptake. *Field Crops Res.* 133:176–185. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.04.009>
115. Johnston, A.E., Poulton, P.R., Fixen, P.E., Curtin, D., (2014). Phosphorus : Its Efficient Use in Agriculture. *Advances in Agronomy.* 12: 177-227. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420225-2.00005-4>
116. Kamara A.Y., Kwari J., Ekeleme F., Omoigui L., Abaidoo R., (2008). Effect of phosphorus application and soybean cultivar on grain and dry matter yield of subsequent maize in the tropical savannas of north-eastern Nigeria. *African Journal of Biotechnology*, 7(15):2593- 2599.
117. Kassam, A., Friedrich, T., Derpsch, R. (2019). Global spread of Conservation Agriculture. *International Journal of Environmental Studies*, 76(1), 29–51. <https://doi.org/10.1080/00207233.2018.1494927>
118. Kassam, A.H., Friedrich, T., Shaxson, F., Pretty, J. (2009). The spread of conservation agriculture: justification, sustainability and uptake. *International Journal of Agricultural Sustainability* 7(4), 292–320. doi: 10.3763/ijas.2009.0477
119. Kassam, A.H., Friedrich, T., Derpsch, R., Kienzle, J. (2014). Worldwide Adoption of Conservation Agriculture. 6th World Congress on Conservation Agriculture 22–27 June 2014, Winnipeg, Canada.

120. Kaurin, A., Miheli, R., Kastelec, D., Schloter, M. (2015). Consequences of minimum soil tillage on abiotic soil properties and composition of microbial communities in a shallow Cambisol originated from fluvioglacial deposits. *Biol Fertil Soils*, 51: 923–933. <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1037-9>
121. Keatinge, J.D.H., Dennett, M.D., Rodgers, J. (1985). The influence of precipitation regime on the management of three-course crop rotations in northern Syria. *J. Agric. Sci.*, 104: 281–287. <https://doi.org/10.1017/S0021859600043938>
122. Keller, T., Arvidsson, J., Dexter, A. R. (2007). Soil structures produced by tillage as affected by soil water content and the physical quality of soil. *Soil & Tillage Research*, 92: 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.01.001>
123. Khan, B. A., Hussain, A., Elahi, A., Adnan, M., Amin, M. M., Toor, M. D., Aziz, A., Sohail, M. K., Wahab, A., Ahmad, R. (2020). Effect of phosphorus on growth, yield and quality of soybean (*Glycine max* L.); A review. *Ijar*, 6(7), 540–545. <https://www.researchgate.net/publication/343485073>
124. Kitonyo, O. M., Sadras, V. O., Zhou, Y., & Denton, M. D. (2017). Evaluation of historic Australian wheat varieties reveals increased grain yield and changes in senescence patterns but limited adaptation to tillage systems. *Field Crops Research*, 206, 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.02.017>
125. Klik, A., Rosner, J. (2020). Long-term experience with conservation tillage practices in Austria: Impacts on soil erosion processes. *Soil and Tillage Research*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104669>
126. Kobata T., Palta J.A., Turner T.C. (1992). Rate of development of post-anthesis water deficits and grain filling of spring wheat. *Crop Sci.* 32, 1238–1242. <https://doi.org/10.2135/cropsci1992.0011183X003200050035x>
127. Kolawole, G. O., Kang, B. T. (1997). Effect of seed size and phosphorus fertilization on growth of selected legumes. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 28(13–14), 1223–1235. <https://doi.org/10.1080/00103629709369868>
128. Kong, A.Y., Fonte, S.J., van Kessel, C., Six, J. (2009). Transitioning from standard to minimum tillage: trade-offs between soil organic matter stabilization, nitrous oxide emissions, and N availability in irrigated cropping systems. *Soil Till.Res.* 104, 256–262. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.03.004>

129. Kopinski J., Jurga B. (2016). Managing Phosphorus in Polish Agriculture – Production and Environmental Aspects. *Polish J. Environ. Stud.*, 25:2461–2468. <https://doi.org/10.15244/pjoes/64159>
130. Kwabiah, A.B., Stoskopf, N.C., Palm, C.A., Voroney, R.P., Rao, M.R., Gacheru, E. (2003). Phosphorus availability and maize response to organic and inorganic fertilizer inputs in a short term study in western Kenya. *Agric. Ecosyst. Environ.* 95:49–59. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(02\)00167-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00167-6)
131. Kwabiah, A.B., Stoskopf, N.C., Voroney, R.P., Palm, C.A. (2001). Nitrogen and phosphorus release from decomposing leaves under sub-humid tropical conditions. *Biotropica* 33:229–240. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2001.tb00174.x>
132. Lahmar, R. (2006). Opportunités et limites de l’agriculture de conservation en Méditerranée. Les enseignements du projet KASSA. *Options Méditerranéennes Série A* 2006, 69, 11–18. <http://ressources.ciheam.org/om/pdf/a69/06600080.pdf>
133. Latati, M., Blavet, D., Alkama, N., Laoufi, H., Drevon, J.J., Gérard, F., Pansu, M., Ounane, S.M. (2014). The intercropping cowpea-maize improves soil phosphorus availability and maize yields in an alkaline soil. *Plant Soil*, 385:181–191. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2214-6>
134. Lenssen, A.W., Sainju, U.M., Hatfield, P.G. (2013). Integrating sheep grazing into wheat–fallow systems: Crop yield and soil properties. *Field crops research*, 146:75–85. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.03.010>
135. Li, Y.F.; Wu, Y.; Hernandez-Espinosa, N.; Peña, R.J. (2013). Heat and drought stress on durum wheat: Responses of genotypes, yield, and quality parameters. *J. Cereal Sci.*, 57, 398–404.
136. López-Bellido, L., Fuentes, M., Castillo, J. E., López-Garrido, F. J. (1998). Effects of tillage, crop rotation and nitrogen fertilization on wheat-grain quality grown under rainfed Mediterranean conditions. *Field Crops Research*, 57(3), 265–276. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00137-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00137-8)
137. Lopez-Bellido, L., Lopez-Bellido, R. J., Castillo, J. E., Lopez-Bellido, F. J. (2000). Effects of tillage, crop rotation, and nitrogen fertilization on wheat under rainfed Mediterranean conditions. *Agronomy Journal*, 92(6), 1054–1063. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00137-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00137-8)

138. Lopez-Bellido, R. J., Muñoz-Romero, V., Fuentes-Guerra, R., Fernandez-Garcia, P., Lopez-Bellido, L. (2017). No-till: A key tool for sequestering C and N in microaggregates on a Mediterranean Vertisol. *Soil and Tillage Research*, 166, 131–137. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.09.012>
139. López-Bellido, L., López-Bellido, R., Fernández-García, P., Muñoz-Romero, V., Lopez-Bellido, F. J. (2020). Carbon storage in a rainfed Mediterranean vertisol: Effects of tillage and crop rotation in a long-term experiment. *European Journal of Soil Science*, 71(3), 472–483. <https://doi.org/10.1111/ejss.12883>
140. Lu, D.Q., Chien, S.H., Henao, J., Sompongse, D. (1987). Evaluation of short-term efficiency of diammonium phosphate versus urea plus single superphosphate on a calcareous soil. *Agron J.*, 79:896–900. <https://doi.org/10.2134/agronj1987.00021962007900050028x>
141. Lu, D., Song, H., Jiang, S., Chen, X., Wang, H., Zhou, J. (2019). Integrated Phosphorus Placement and Form for Improving Wheat Grain Yield. *Soil Fertility And crop nutrition*, 111(4), 1998–2004. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.09.0559>
142. Lynch, J. 1995. Root architecture and plant productivity. *Plant Physiology*, 109(1), 7–13. <https://doi.org/10.1104/pp.109.1.7>
143. Ma, Q., Longnecker, N., Atkins, C. (2002). Varying phosphorus supply and development, growth and seed yield in narrow-leafed lupin. *Plant and Soil*, 239(1), 79–85. <https://doi.org/10.1023/A:1014988219743>
144. Mackay, A.D., Barber, S.A. (1985). Soil moisture effects on root growth and phosphorus uptake by corn. *Agron. J.*, 77: 519-523. <https://doi.org/10.2134/agronj1985.00021962007700040004xa>
145. MADR (2021). Statistiques du ministère d’agriculture et de développement durable.
146. Malavolta E. (1989). *Abc of fertilization*. Agronômica Ceres, São Paulo. 304p.
147. Malhotra, H., Vandana, Sharma, S., Pandey, R. (2018). Phosphorus Nutrition: Plant Growth in Response to Deficiency and Excess. *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance* : 171–190. https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8_7
148. Mallarino, A.P., and R. Borges. (2006). Phosphorus and potassium distribution in soil following long-term deep-band fertilization in different tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:702–707. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0129>

149. Mal, P., Schmitz, M., Hesse, J.W. (2015). Economic and environmental effects of conservation tillage with glyphosate use: A case study of Germany. *Outlooks on Pest Management*, 26: 24-27. https://doi.org/10.1564/v26_feb_07
150. Maltais-Landry, G. (2015). Legumes have a greater effect on rhizosphere properties (pH, organic acids and enzyme activity) but a smaller impact on soil P compared to other cover crops. *Plant soil*. 394 (1-2), 139–154. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2518-1>
151. Maqsood, M., Zamir, M. S. I., Ali, R., Wajid, A., Yousaf, N. (2000). Effect of different phosphorus levels on growth and yield performance of lentil (*Lens culinaris medic*). *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 3(3), 523-524. 10.3923/pjbs.2000.523.524
152. Mat Hassan, H. M., Hasbullah, H., Marschner, P. (2013). Growth and rhizosphere P pools of legume – wheat rotations at low P supply. *Biol Fertil Soils*, 49: 41–49. <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0695-0>
153. Mat Hassan, H. M., Marschner, P., Mcneill, A. (2012). Grain legume pre-crops and their residues affect the growth, P uptake and size of P pools in the rhizosphere of the following wheat. *Biol Fertil Soils*, 48: 775–785. <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0671-8>
154. Matusso, M.J.M., Cabo, D.F. (2015). Response of Soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) to Phosphorus Fertilizer Rates in Ferralsols. *Academic Research Journal of Agricultural Science and Research*, 3(10): 281- 288. <https://doi.org/10.1155/2021/6686957>
155. May, W.E., Fernandez, M.R., Holzapfel, C.B., Lafond, G.P. (2008). Influence of phosphorus, nitrogen, and potassium chloride placement and rate on durum wheat yield and quality. *Agronomy Journal*, 100(4): 1173. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0076>
156. Mazzoncini, M., Antichi, D., Di Bene, C., Risaliti, R., Petri, M., Bonari, E. (2016). Soil carbon and nitrogen changes after 28 years of no-tillage management under Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*, 77: 156–165. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.02.011>
157. Mazzoncini, M., Di Bene, C., Coli, A., Antichi, D., Petri, M., Bonari, E. (2008). Rainfed wheat and soybean productivity in a long-term tillage experiment in Central Italy. *Agronomy Journal*, 100(5) : 1418–1429. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0173>
158. McBeath, T.M., McLaughlin, M.J., Kirby, J.K., Armstrong, R.D. (2012). The effect of soil water status on fertilizer, topsoil and subsoil phosphorus utilization by wheat. *Plant Soil*, 358: 337–348. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1177-8>

159. McGonigle, T.P., Miller, M.H., Young, D. (1999). Mycorrhizae, crop growth, and crop phosphorus nutrition in maize soybean rotations given various tillage treatments. *Plant Soil*. 210: 33–42. <https://doi.org/10.1023/A:1004633512450>
160. Mclaughlin, M.J., Mcbeath, T.M., Smernik, R., Stacey, S. P., Ajiboye, B. (2011). The chemical nature of P accumulation in agricultural soils — implications for fertiliser management and design: an Australian perspective. *Plant Soil*, 394: 69–87. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0907-7>
161. Mehmeti, A., Pacanoski, Z., Fetahaj, R., Kika, A., Kabashi, B. (2018). Weed control in wheat with post-emergence herbicides. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 24: 74–79.
162. Mekhlouf, A., Makhlof M., Achiri A., Ait ouali A.et Kourougli S. (2011). Etude comparative de l’effet des systèmes de travail du sol et des précédents culturaux sur le sol et le comportement du blé tendre (*Triticum aestivum* L.) en conditions semi-arides. *Agriculture*, 2: 25-65. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/5941>
163. Melero, S., López-Bellido R. J., López-Bellido L., Muñoz-Romero V., Moreno F., Murillo J.M. (2011). Long-term effect of tillage, rotation and nitrogen fertiliser on soil quality in a Mediterranean Vertisol. *Soil and tillage research*, 114 (2) : 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.04.007>
164. Miller, M.H. (2000). Arbuscular mycorrhizae and the phosphorus nutrition of maize: A review of Guelph studies. *Can. J. Plant Sci.* 80:47–52. doi:10.4141/P98-130
165. Miller, M.H., McGonigle, T.P. Addy, H.D. (1995). Functional ecology of vesicular–arbuscular mycorrhizas as influenced by phosphate fertilization and tillage in an agricultural ecosystem. *Critical Reviews in Biotechnology*, 15, 241–255. <https://doi.org/10.3109/07388559509147411>
166. Mimura T, Sakano K, Shimmen T. (1996). Studies on the distribution, re- translocation and homeostasis of inorganic phosphate in barley leaves. *Plant Cell Environ.* 19: 311–20. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1996.tb00253.x>
167. Mollier, A., Pellerin, S. (1999). Maize root system growth and development as influenced by phosphorus deficiency. *Journal of Experimental Botany*, 50(333): 487–49. <https://doi.org/10.1093/jxb/50.333.487>
168. Morris, N.L.; Miller, P.C.H.; Orson, J.H.; Froud-Williams, R.J. (2010). The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil,

- crops and the environment—A review. *Soil Tillage Res.* : 108, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.03.004>
169. Mosali, J., K. Desta, R.K. Teal, K.W. Freeman, K.L. Martin, J.W. Lawles, and W.R. Raun. (2006). Effect of foliar application of phosphorus on winter wheat grain yield, phosphorus uptake, and use efficiency. *J. Plant Nutr.* 29: 2147–2163. <https://doi.org/10.1080/01904160600972811>
170. Mozafar, A., Anken, T., Ruh, R., Frossard, E. (2000). Tillage Intensity, Mycorrhizal and Nonmycorrhizal Fungi, and Nutrient Concentrations in Maize, Wheat, and Canola. *Agron. J.*, 92: 1117–1124. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.9261117x>
171. Murua J.R., Laajimi A. (1995). Transition de l'agriculture conventionnelle vers l'agriculture durable : quelques réflexions. In: Zekri S. (ed.), Laajimi A. (ed.). *Agriculture, durabilité et environnement*. Zaragoza : CIHEAM, 1995. p. 75-86. <http://om.ciheam.org/om/pdf/c09/96605581.pdf>
172. Nachimuthu, G., Guppy, C., Kristiansen, P., Lockwood, P. (2009). Isotopic tracing of phosphorus uptake in corn from ³³P labelled legume residues and ³²P labelled fertilisers applied to a sandy loam soil. *Plant and Soil*, 314(1–2), 303–310. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9730-1>
173. Nadeem, M., Mollier, A., Morel, C., Vives, A., Prud'homme, L., Pellerin, S. (2011). Relative contribution of seed phosphorus reserves and exogenous phosphorus uptake to maize (*Zea mays* L.) nutrition during early growth stages. *Plant and Soil*, 346(1), 231–244. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0814-y>
174. Nkebiwe, P.M., Weinmann, A., Bar-Tal, Müller T. (2016). Fertilizer placement to improve crop nutrient acquisition and yield: A review and meta-analysis. *Field Crops Res.* 196: 389–401. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.018>
175. Noirfalise, A., Lecomte, R., Droeven, G., Bernard, J., Rixhon, L., Crohain A., Darcheville, M. Tahon, J., Martens, P., Sine, L., Leclercq, J., Calembert, J., Caussin, R., Dendas, J., Saive, R. (1974). Informations internes sur l'agriculture. Commission des communautés européennes. 459 p.
176. Nuruzzaman, M., Lambers, H., Bolland, M. D. A., Veneklaas, E. J. (2005a). Phosphorus benefits of different legume crops to subsequent wheat grown in different soils of Western Australia. *Plant and Soil*, 270:175–187. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-2386-6>

177. Nuruzzaman, M., Lambers, H., Bolland, M.D.A., Veneklaas E.J. (2005b). Phosphorus uptake by grain legumes and subsequently grown wheat at different levels of residual phosphorus. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56: 1041-1047. <https://doi.org/10.1071/AR05060>
178. Nze Memiaghe, Jeff D., Athyna N. Cambouris, Noura Ziadi, Antoine Karam. (2022). Tillage Management Impacts on Soil Phosphorus Variability under Maize–Soybean Rotation in Eastern Canada. *Soil Systems* 6(2): 45. <https://doi.org/10.3390/soilsystems6020045>
179. Oehl, F., Oberson, A., Tagmann, H. U., Besson, J. M., Dubois, D., Mader, P., Roth, H.R., Frossard, E. (2002). Phosphorus budget and phosphorus availability in soils under organic and conventional farming. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 62 : 25-35. <https://doi.org/10.1023/A:1015195023724>
180. ONM, 2020. Données recueillies.
181. Ouattara, B., Coulibaly, K., Kohio, E., Doumbia, S., Ouédraogo, S., Nacro, H. B. (2018). Effets du Système de Culture sous couverture Végétale (SCV) sur les flux hydriques d'un sol ferrugineux à l'Ouest du Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 12(4): 1770-1783. DOI: 10.4314/ijbcs.v12i4.20
182. Pagliai, M., Vignozzi, N., Pellegrini, S. (2004). Soil structure and the effect of management practices. *Soil and Tillage Research*, 79: 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.07.002>
183. Pagnani, G., Galieni, A., D'Egidio, S., Visioli, G., Stagnari, F., Pisante, M. (2019). Effect of Soil Tillage and Crop Sequence on Grain Yield and Quality of Durum Wheat in Mediterranean Areas. *Agronomy*, 9: 488. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090488>
184. Pala, M.; Harris, H.C.; Ryan, J.; Makboul, R. (2000). Tillage systems and stubble management in a Mediterranean-type environment in relation to crop yield and soil moisture. *Expl. Agric.*, 36: 223–242. <https://doi:10.1017/S0014479700002052>
185. Peigné, J., Védie, H., Demeusy, J., Gerber, M., Vian, J.F., Gautronneau, Y., Cannavacciuolo, M., Aveline A., Giteau L.L., Berry D. (2009). Techniques sans labour en agriculture biologique. *Innovations Agronomiques*, INRAE, 4: 23-32.
186. Peigné, J., Vian, J., Payet, V., Saby, N. P. A. (2018). Research Soil fertility after 10 years of conservation tillage in organic farming. *Soil and Tillage Research*, 175: 194–204. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.008>

187. Phiri, S., Amezquita, E., Rao, I.M., Singh, B.R., (2001). Disc harrowing intensity and its impact on soil properties and plant growth of agropastoral systems in the Llanos of Colombia. *Soil and Tillage Research*, 62: 131–143. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00223-9](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00223-9)
188. Piegholdt, C., Geisseler, D., Koch, H. J., Ludwig, B. (2013). Long-term tillage effects on the distribution of phosphorus fractions of loess soils in Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 176(2), 217–226. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200393>
189. Qiao, Y.F., Tang, C.X., Han, X.Z., Miao, S.F. (2007). Phosphorus deficiency delays the onset of nodule function in soybean. *J. Plant Nutr.*, 30:1341–1353. <https://doi.org/10.1080/01904160701555325>
190. Quinton, J.N., Catt, J.A., Hess, T.M. (2001). The Selective Removal of Phosphorus from Soil: Is Event Size Important?. *J. Environ. Qual.*, 30: 538-545. <https://doi.org/10.2134/jeq2001.302538x>
191. Raghothama, K. G. (1999). Phosphate acquisition. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 50(6) :65-93.
192. Rashid, A., Awan, Z. I., Ryan, J. L. (2005). Diagnosing Phosphorus Deficiency in Spring Wheat by Plant Analysis: Proposed Critical Concentration Ranges. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36: 609-622. <https://doi.org/10.1081/CSS-200043299>
193. Rashid, A, Awan, Z. I., Ryan, J., Rafique, E. (2010). Strategies for Phosphorus Nutrition of Dryland Wheat in Pakistan. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 41: 2555–2567. <https://doi.org/10.1080/00103624.2010.514374>
194. Redel, Y. D., Rubio, R., Rouanet, J. L., Borie, F. (2007). Phosphorus bioavailability affected by tillage and crop rotation on a Chilean volcanic derived Ultisol. *Geoderma*, 139 (3–4): 388–396. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.02.018>
195. Rehim A., Hussain M., Abid M., Zia-ul-haq M., Ahmad S. (2012 a). Phosphorus use efficiency of *Triticum aestivum* L. as affected by band placement of phosphorus and farmyard manure on calcareous soils. *Pak. J. Bot.*, 44(4): 1391-1398
196. Rehim, A., Farooq M., Ahmad F., Hussain M. (2012 b). Band placement of phosphorus improves the phosphorus use efficiency and wheat productivity under different irrigation regimes. *Int. J. Agric. Biol.*, 14: 727-733

197. Robertson, F., Armstrong, R., Partington, D., Perris, R., Oliver, I., Aumann, C., Rees, D. (2015). Effect of cropping practices on soil organic carbon: evidence from long-term field experiments in Victoria. *Australia. Soil Research*, 53(6): 636-646.
198. Rose, T., Hardiputra, B., Rengel, Z. (2010). Wheat, canola and grain legume access to soil phosphorus fractions differs in soils with contrasting phosphorus dynamics. *Plant Soil*, 326: 159–170. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9990-4>
199. Rose, T.J., Wood, R.H., Gleeson, D.B., Rose, M.T. (2016). Removal of phosphorus in residues of legume or cereal plants determines growth of subsequently planted wheat in a high phosphorus fixing soil. *Biology and Fertility of Soils*, 52(8): 1085–1092. <https://doi.org/10.1007/s00374-016-1143-3>
200. Ruisi, P., Giambalvo, D., Di Miceli, G., Frenda, A.S., Saia, S. and Amato, G. (2012), Tillage Effects on Yield and Nitrogen Fixation of Legumes in Mediterranean Conditions. *Agronomy Journal*, 104: 1459-1466. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0070>
201. Ruisi, P., Giambalvo, D., Saia, S., Di Miceli, G., Frenda, A. S., Plaia, A., Amato, G. (2014). Conservation tillage in a semiarid Mediterranean environment: Results of 20 years of research. *Italian Journal of Agronomy*, 9(1) : 1–7. <https://doi.org/10.4081/ija.2014.560>
202. Ruisi, P., Saia, S., Badagliacca, G., Amato, G., Frenda, A. S., Giambalvo, D., Di Miceli, G. (2016). Long-term effects of no tillage treatment on soil N availability, N uptake, and 15N-fertilizer recovery of durum wheat differ in relation to crop sequence. *Field Crops Research*, 189: 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.02.009>
203. Ryan, J. L., Ibricci, H., Singh, M., Masri, S. (2008). Response to residual and currently applied phosphorus in dryland cereal / legume rotations in three Syrian Mediterranean agroecosystems. *Europ. J. Agronomy*, 28: 126-137. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.06.001>
204. Sah, R.N., Mikkelsen, D.S., Hafez, A.A., (1989). Phosphorus Behavior in Flooded-Drained Soils. III. Phosphorus Desorption and Availability. *Soil Science Society of America Journal*, 53(6), 1729. doi:10.2136/sssaj1989.03615995005300060020
205. Sainju, U. M., Singh, B.P., Whitehead, W.F., Wang, S. (2006). Carbon supply and storage in tilled and nontilled soils as influenced by cover crops and nitrogen fertilization. *Journal of environmental quality*, 35 (4): 1507-1517. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0189>

206. Sander, D.H., Penas, E.J., Eghball, B., (1990). Residual Effects of Various Phosphorus Application Methods on Winter Wheat and Grain Sorghum. *Soil Science Society of America Journal*, 54(5): 1473. <https://doi.org/10.2136/sssaj1990.03615995005400050043x>
207. Santín-Montanyá, M.I., Fernández-Getino, A.P., Zambrana, E., Tenorio, J.L. (2017). Effects of tillage on winter wheat production in Mediterranean dryland fields. *Arid Land Research and Management*, 31(3): 269-282, <https://doi.org/10.1080/15324982.2017.1307289>
208. Schachtman, D. P., Reid, R. J., Ayling, S. M. (1998). Phosphorus Uptake by Plants: From Soil to Cell. *Plant Physiology*, 116(2): 447–453. <https://doi.org/10.1104/pp.116.2.447>
209. Seitz, S., Goebes, P., Puerta, V. L., Pereira, E. I. P., Wittwer, R., Six, J., van der Heijden, M. G. A., Scholten, T. (2019). Conservation tillage and organic farming reduce soil erosion. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(1). <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0545-z>
210. Selles, F., McConkey B.G., Campbell. C.A. (1999). Distribution and forms of P under cultivator- and zero-tillage for continuous- and fallow-wheat cropping systems in the semi-arid Canadian prairies. *Soil Tillage Res.* 51: 47–59. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00027-6](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00027-6)
211. Selles F., Clarke J.M., Zentner, R.P., Campbell C.A., (2003). Effects of source and placement of phosphorus on concentration of cadmium in the grain of two durum wheat cultivars. *Canadian Journal of Plant Science*, 83(3): 475–482. <https://doi.org/10.4141/P02-116>
212. Shi, Y., Lalande, R., Hamel, C. (2013). Seasonal variation of microbial biomass, activity, and community structure in soil under different tillage and phosphorus management practices. *Biol Fertil Soils*, 49: 803–818. <https://doi.org/10.1007/s00374-013-0773-y>
213. Sieber, A.N.; Würschum, T.; Longin, C.F.H. (2015). Vitreosity, its stability and relationship to protein content in durum wheat. *J. Cereal Sci.*, 61: 71–77. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.10.008>
214. Sieling, K.; Christen, O. (2015). Crop rotation effects on yield of oilseed rape, wheat and barley and residual effects on the subsequent wheat. *Arch. Agron. Soil Sci.*, 61: 1531–1549. <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1017569>

215. Singh, D., Sale, P., Routley, R., (2005). Increasing phosphorus supply in subsurface soil in northern Australia: Rationale for deep placement and the effects with various crops. *Plant Soil*, 269: 35–44. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-2475-6>
216. Singh, N., Singh, G., Khanna, V., (2016). Growth of lentil (*Lens culinaris Medicus*) as influenced by phosphorus, rhizobium and plant growth promoting rhizobacteria. *Indian J. Agri. Res.*, 50 (6): 567-572.
217. Smith, S.E., Jakobsen, I., Grønlund, M., Smith. F.A. (2011). Roles of arbuscular mycorrhizas in plant phosphorus nutrition: Interactions between pathways of phosphorus uptake in arbuscular mycorrhizal roots have important implications for understanding and manipulating plant phosphorus acquisition. *Plant Physiol.* 156: 1050–1057. <https://doi.org/10.1104/pp.111.174581>
218. Soane, B.D.; Ball, B.C.; Arvidsson, J.; Basch, G.; Moreno, F.; Roger-Estrade, J. (2012). No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil Tillage Res.*, 118 : 66–87. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.015>
219. Souissi, A., Bahri, H., M'Hamed, H. C., Chakroun, M., Benyoussef, S., Frija, A., Annabi, M. (2020). Effect of tillage, previous crop, and N fertilization on agronomic and economic performances of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) under rainfed semi-arid environment. *Agronomy*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/agronomy10081161>
220. Su, W., Liu, B., Liu, X., Li, X., Ren, T., Cong, R., (2015). Effect of depth of fertilizer banded placement on growth, nutrient uptake, and yield of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Eur. J. Agron.*, 62:38–45. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.09.002>
221. Sun, B., Jia, S., Zhang, S., Mclaughlin, N. B., Liang, A. (2016). No tillage combined with crop rotation improves soil microbial community composition and metabolic activity. *Environ Sci Pollut Res*, 23: 6472–6482. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5812-9>
222. Syers, J. K., Johnston, A. E., Curtin, D. (2008). Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin* (FAO), 18: 108p.
223. Talukder, A.S.M.H.M.; McDonald, G.K.; Gill, G.S. (2014). Effect of short-term heat stress prior to flowering and early grain set on the grain yield of wheat. *Field Crops Res.*, 160: 54–63.

224. Taner, A.; Arısoy, R.Z.; Kaya, Y.; Gültekin, I.; Partigöç, F. (2015). The effects of various tillage systems on grain yield, quality parameters and energy indices in winter wheat production under the rainfed conditions. *Fresenius Environ. Bull.*, 24: 1463–1473.
225. 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 and Tillage Res.*, 94: 295–304. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.08.005>
226. Tiessen, K. H. D., Elliott, J. A., Yarotski, J., Lobb, D. A., Flaten, D. N., Glozier, N. E. (2010). Conventional and Conservation Tillage: Influence on Seasonal Runoff, Sediment, and Nutrient Losses in the Canadian Prairies. *Journal of Environmental Quality*, 39(3): 964–980. <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0219>
227. Touré, A. A., Tidjani, A., Rajot, J.-L., Bouet, C., Garba, Z., Marticorena, B., Ambouta, K. (2017). Impacts de la variabilité spatiale de l'occupation des sols sur l'érosion éolienne et les transports de nutriments dans le terroir de Banizoumbou (sud-ouest du Niger). *Algerian journal of arid environment*, 7(2): 52-62.
228. Vadon, B.; Lamouchi, L.; Elmay, S.; Maghfour, A.; Mahnane, S.; Benaouda, H.; Elgharras, O. (2006). Organisations paysannes: Un levier pour développer l'agriculture de conservation au Maghreb. *Options Méditerranéennes* (Série A), 69, 87–99.
229. Veneklaas E.J., Lambers H., Bragg J., Finnegan P.M., Lovelock C.E., Plaxton W.C., Price C.A., Scheible W.R., Shane M.W., White P.J., Raven J.A., (2012). Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants. *New Phytol.*, 195: 306–320. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04190.x>
230. Venkatesh, M. S., Hazra, K. K., Ghosh, P. K., Khuswah, B. L., Ganeshamurthy, A.N., Ali, M., Mathur R. S., 2017. Long-term effect of crop rotation and nutrient management on soil-plant nutrient cycling and nutrient budgeting in Indo-Gangetic plains of India. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(14): 2007-2022. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1320392>
231. Verstraete, W., Mertens, B. (2005.). The key role of soil microbes. *Developments in Soil Science*, 29: 127–157. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(04\)80009-6](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(04)80009-6)
232. Wang, H., Wang, S., Yu, Q., Zhang, Y., Wang, R., Li, J., Wang, X. (2020). No tillage increases soil organic carbon storage and decreases carbon dioxide emission in the crop residue-returned farming system. *Journal of Environmental Management*, 261: 2–8. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110261>

233. White, PJ, Veneklaas, E.J. (2012). Nature and nurture: the importance of seed phosphorus content. *Plant and Soil*, 357: 1–8. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1128-4>
234. Woźniak, A. (2019). Effect of Crop Rotation and Cereal Monoculture on the Yield and Quality of Winter Wheat Grain and on Crop Infestation with Weeds and Soil Properties. *International Journal of Plant Production*, 3(13): 1-6. <https://doi.org/10.1007/s42106-019-00044-w>
235. Woźniak, A., Stępniewska, A. (2017). Yield and quality of durum wheat grain in different tillage systems. *J. Elem.*, 22(3): 817-829. DOI: 10.5601/jelem.2016.21.4.1304
236. Woźniak A., et 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: 3087–3096. http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1603_30873096
237. Woźniak, A. Makarski, B., Stępniewska, A. (2014). Effect of tillage system and previous crop on grain yield, grain quality and weed infestation of durum wheat. *Rom. Agric. Res.*, 31, 129–137. Available online: <http://www.incda-fundulea.ro/rar/nr31/rar31.17.pdf>
238. Wright, S.F. Starr, J.L., Paltineanu, I.C. (1999). Changes in aggregate stability and concentration of glomalin during tillage management transition. *Soil Science Society of America Journal*, 63, 1825–1829. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6361825x>
239. Yalcin, H.; Cakir, E. (2006). Tillage effects and energy efficiencies of subsoiling and direct seeding in light soil on yield of second crop corn for silage in Western Turkey. *Soil Tillage Res.*, 90, 250–255. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.10.003>
240. Zentner, R.P., K. Brandt, C.A. Campbell, H. Wang, B. Cade-Menun, R. Lemke, Y. Gan, B.G. McConkey. (2010). Long-term response of spring wheat to N and P fertilization in southwestern Saskatchewan. Saskatchewan Soils and Crops Workshop. 24 Feb. 2010. University of Saskatchewan, Saskatoon, SK, Canada.
241. Zhao, C.-X., He, M.-R., Wang, Z.-L., Wang, Y.-F., & Lin, Q. (2009). Effects of different water availability at post-anthesis stage on grain nutrition and quality in strong-gluten winter wheat. *Comptes Rendus Biologies*, 332(8), 759–764. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2009.03.003>
242. Zhu, Y. G., Smith, S. E. (2001). Seed phosphorus (P) content affects growth, and P uptake of wheat plants and their association with arbuscular mycorrhizal (AM) fungi. *Plant and Soil*, 231(1), 105–112. <https://doi.org/10.1023/A:1010320903592>

243. Ziadi, N., Whalen, J. K., Messiga, A. J., Morel, C. (2013). Assessment and Modeling of Soil Available Phosphorus in Sustainable Cropping Systems. *Advances in Agronomy*, 85–126. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417187-9.00002-4>
244. Zibilske, L. M., Bradford, J. M. and Smart, J. R. (2002). Conservation tillage induced changes in organic carbon, total nitrogen and available phosphorus in a semi-arid alkaline subtropical soil. *Soil Tillage Res.* 66: 153-163. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00023-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00023-5)
245. Zikeli, S., Gruber, S., Teufel, C.-F., Hartung, K., Claupein, W. (2013). Effects of Reduced Tillage on Crop Yield, Plant Available Nutrients and Soil Organic Matter in a 12-Year Long-Term Trial under Organic Management. *Sustainability*, 5(9), 3876–3894. <https://doi.org/10.3390/su5093876>

Annexes

Annexe I

Tableau 1 : Carrés moyens de l'analyse de la variance de l'effet du travail du sol sur les paramètres de la production de la culture de blé dur durant l'année 2017-2018.

Caractères	TS (<i>ddl</i> = 2)	Bloc (<i>ddl</i> = 2)	Erreur (<i>ddl</i> = 4)	CV %
Rdt	16,29ns	118,81	12,23	8,93
BS	940,40ns	86,70	172,20	10,63
Paille	715,68ns	96,59	134,32	13,75
IR	0,00 ns	0,01	0,00	10,33
NPM	36128,00**	632,80	1262,00	10,95
NEM	18262,00 ns	3522,00	3653,00	16,07
NGE	115,49 ns	7,22	17,22	13,02
PMG	22,77 ns	2,00	5,96	5,23

NB : TS = travail du sol, Rdt = Rendement en grain ($q\ ha^{-1}$), BS = Rendement en biomasse sèche ($q\ ha^{-1}$), Paille = Rendement en paille ($q\ ha^{-1}$), IR = Indice de récolte, NPM = Nombre de plantes/m², NEM = Nombre d'épis/m², NGE = Nombre de grains par épi, PMG = Poids de mille grains (g), ns = non significatif à $P < 0,05$, * = significatif à $P < 0,05$, ** = significatif à $P < 0,01$. CV % = coefficient de variation.

Tableau 2 : Carrés moyens de l'analyse de la variance de l'effet du travail du sol sur les paramètres de la qualité de la graine et de la nutrition phosphatée de la culture de blé dur durant l'année 2017-2018.

Caractères	TS (<i>ddl</i> = 2)	Bloc (<i>ddl</i> = 2)	Erreur (<i>ddl</i> = 4)	CV %
Protéines (%)	0,36 ns	2,38	1,39	8,50
BS floraison	529,30 ns	151,10	103,80	9,61
P floraison	0,05 ns	0,10	0,14	12,75
Exp floraison	26,61 ns	51,50	13,13	11,84
P Grain	0,10 ns	0,85	0,80	2,69
P paille	0,40**	0,01	0,02	12,38
Exp totale	4,20*	29,32	0,48	2,45

NB : TS = travail du sol, BS floraison = Rendement en matière sèche au stade floraison $q\ ha^{-1}$, P floraison = Teneur en P dans la plante au stade floraison ($g\ kg^{-1}$), Exp floraison = Exportation totale en P au stade floraison ($kg\ ha^{-1}$), P Grain = Teneur en P dans le grain au stade maturité ($g\ kg^{-1}$), P paille = Teneur en P dans la paille au stade maturité ($g\ kg^{-1}$), Exp totale = Exportation totale en P au stade maturité ($kg\ ha^{-1}$), ns = non significatif à $P < 0,05$, * = significatif à $P < 0,05$, ** = significatif à $P < 0,01$. CV % = coefficient de variation.

Tableau 3 : Carrés moyens de l'analyse de la variance de l'effet du travail du sol sur les composantes du rendement et les rendements en matière sèche, en grain et en paille durant l'année 2018-2019.

Caractères	TS (<i>ddl</i> = 2)	Bloc (<i>ddl</i> = 2)	Erreur (<i>ddl</i> = 4)	CV %
Rdt	31,86 ns	8,911	11,44	17,78
BS	350,74 ns	235,82	55,13	11,24
Paille	578,44*	153,07	32,18	12,07
IR	0,04*	0,00	0,00	14,94
NPM	688,90 ns	130,70	189,30	7,25
NEM	153,90 ns	933,40	121,80	4,66
NGE	35,27 ns	6,33	5,74	5,92
PMG	8,60 ns	11,67	15,02	8,83

NB : Légende : se référer au tableau 1.

Tableau 4 : Carrés moyens de l'analyse de la variance de l'effet du travail du sol sur les paramètres de la qualité de la graine et de la nutrition phosphatée de la culture de blé dur durant l'année 2018-2019.

Caractères	TS (<i>ddl</i> = 2)	Bloc (<i>ddl</i> = 2)	Erreur (<i>ddl</i> = 4)	CV %
Protéines (%)	1,05 ns	7,34	1,32	9,81
PS	0,08 ns	4,51	1,73	1,57
VI%	150,58**	14,40	7,42	2,96
BS floraison	116,18 ns	127,51	56,67	13,58
P floraison	0,03 ns	0,01	0,02	4,47
Exp floraison	7,66 ns	13,87	5,09	14,14
P Grain	0,016 ns	0,23	0,06	6,59
P paille	0,014 ns	0,03	0,01	8,94
Exp totale	0,47 ns	11,75	3,43	15,44

NB : Légende : se référer au tableau 2. PS = poids spécifique (kg hl⁻¹), VI % = taux de vitrosité (%)

Tableau 5 : Carrés moyens de l'analyse de la variance de l'effet du travail du sol sur les composantes du rendement et les rendements en matière sèche, en grain et en paille durant l'année 2019-2020.

Caractères	TS (<i>ddl</i> = 2)	Bloc (<i>ddl</i> = 2)	Erreur (<i>ddl</i> 4)	CV %
Rdt	52,89**	5,06	2,678	12,97
BS	439,90*	88,82	36,19	12,27
Paille	196,07 ns	153,07	32,18	14,15
IR	0,00 ns	0,00	0,00	13,13
NPM	3533,70 ns	61,90	683,80	15,61
NEM	9834,50*	1038,30	1288,70	14,19
NGE	15,03 ns	10,08	16,62	20,28
PMG	1,25 ns	16,86	1,28	2,89

NB : Légende : se référer au tableau 1.

Tableau 6 : Carrés moyens de l'analyse de la variance de l'effet du travail du sol sur les paramètres de la qualité de la graine et de la nutrition phosphatée de la culture de blé dur durant l'année 2019-2020.

Caractères	TS (<i>ddl</i> = 2)	Bloc (<i>ddl</i> = 2)	Erreur (<i>ddl</i> = 4)	CV %
Protéines (%)	0,81 ns	1,44	0,28	3,79
PS	0,08 ns	5,78	0,61	1,01
VI%	0,00 ns	8,04	0,93	1,00
P Grain	0,39 ns	0,80	0,48	13,16
P paille	0,00 ns	0,00	0,00	2,54
Exp totale	17,16 ns	3,46	4,16	18,40

NB : Légende : se référer aux tableaux 2 et 4.

Tableau 7 : Carrés moyens de l'analyse de la variance pluriannuelle des paramètres de la production de la culture de blé dur durant les trois années 2018-2020.

Caractères	TS <i>ddl</i> = 2	Année <i>ddl</i> = 2	Bloc (dans année) <i>ddl</i> = 6	TS×année <i>ddl</i> = 4	TS×bloc (dans année) <i>ddl</i> = 12
Rdt	25,96 ns	1 728,73***	44,26	37,54*	8,78
BS	228,99 ns	12 136,17***	150,06	751,02**	91,04
Paille	404,39*	4 736,70***	112,83	542,90**	67,56
IR	0,02***	0,02***	0,00	0,01**	0,00
NPM	9 013,66***	64 713,99***	275,16	15 668,49***	711,70
NEM	865,44 ns	52 191,10***	1 831,33	13 692,62**	1 687,73
NGE	3,58 ns	940,14***	7,88	81,10**	13,19
PMG	19,77 ns	134,94***	10,18	6,42	7,42

NB : TS = travail du sol, Rdt = Rendement en grain ($q\ ha^{-1}$), BS = Rendement en biomasse sèche ($q\ ha^{-1}$), Paille = Rendement en paille ($q\ ha^{-1}$), IR = Indice de récolte, NPM = Nombre de plants/m², NEM = Nombre d'épis/m², NGE = Nombre de grains par épi, PMG = Poids de mille grains (g), ns = non significatif à $P < 0,05$, * = significatif à $P < 0,05$, ** = significatif à $P < 0,01$, *** = significatif à $P < 0,001$.

Tableau 8 : Carrés moyens analyse de la variance pluriannuelle de l'effet de travail du sol et de l'année sur la teneur en protéines dans le grain et la nutrition phosphatée de la culture de blé dur au stade maturité durant les trois années 2018-2020.

Caractères	TS <i>ddl</i> = 2	Année <i>ddl</i> = 2	Bloc (dans année) <i>ddl</i> = 6	TS×année <i>ddl</i> = 4	TS×bloc (dans année) <i>ddl</i> = 12
Protéines (%)	0,13 ns	13,93***	3,72	1,04 ns	0,99
BS floraison	443,01*	11 493,89***	139,29	202,41 ns	80,22
P floraison	0,08 ns	0,00	0,05	0,01 ns	0,08
Exp floraison	15,50 ns	966,72***	32,69	18,77 ns	9,11

NB : TS = travail du sol, BS floraison = Rendement en matière sèche au stade floraison $q\ ha^{-1}$, P floraison = Teneur en P dans la plante au stade floraison ($g\ kg^{-1}$), Exp floraison = Exportation totale en P au stade floraison ($kg\ ha^{-1}$), ns = non significatif à $P < 0,05$, * = significatif à $P < 0,05$, ** = significatif à $P < 0,01$, *** = significatif à $P < 0,001$.

Tableau 9 : Carrés moyens de l'analyse de la variance pluriannuelle de poids spécifique et de taux de vitrosité durant les deux années 2018-2019 et 2019-2020.

Caractères	TS <i>ddl</i> = 2	Année <i>Ddl</i> = 1	Bloc (dans année) <i>ddl</i> = 4	TS×année <i>ddl</i> = 2	TS×bloc (dans année) <i>ddl</i> = 8
PS	0,00 ns	156,06***	5,14	0,16 ns	1,17
VI%	75,29**	56,89***	11,22	75,29***	4,17
P Grain	0,04 ns	4,90**	0,63	0,23 ns	0,42
P paille	0,17***	0,02	0,01	0,12***	0,01
Exp totale	4,79 ns	847,06***	14,84	8,53 ns	2,69

NB : TS = travail du sol, PS = poids spécifique ($kg\ hl^{-1}$), VI % = taux de vitrosité (%), P Grain = Teneur en P dans le grain au stade maturité ($g\ kg^{-1}$), P paille = Teneur en P dans la paille au stade maturité ($g\ kg^{-1}$), Exp totale = Exportation totale en P au stade maturité ($kg\ ha^{-1}$), ns = non significatif à $P < 0,05$, * = significatif à $P < 0,05$, ** = significatif à $P < 0,01$, *** = significatif à $P < 0,001$.

Tableau 10 : Carrés moyens de l'analyse de la variance de l'effet du travail du sol et des rotations sur les paramètres de la production de la culture de blé dur durant l'année 2018-2019.

Caractères	TS <i>ddl</i> = 2	Rotation <i>Ddl</i> = 3	Bloc <i>Ddl</i> = 2	TS×rotation <i>ddl</i> = 6	Erreur 1 <i>ddl</i> = 4	Erreur 2 <i>ddl</i> = 18
Rdt	39,22 ns	122,26***	65,94	14,03 ns	12,13	9,24
BS	579,47ns	243,45 ns	854,16	223,95 ns	153,08	149,66
Paille	826,59 ns	52,23 ns	474,13	253,38 ns	161,23	135,46
IR	0,02 ns	0,01 ns	0,01	0,00 ns	0,01	0,00
NPM	2 087,18 ns	1 220,77 ns	440,55	547,63 ns	307,82	387,29
NEM	1 498,92 ns	1 617,58 ns	13,82	772,72 ns	735,40	527,18
NGE	2,58 ns	16,98 ns	137,33	32,10 ns	22,64	14,05
PMG	100,35*	19,35*	24,16	3,77 ns	14,20	5,17

NB : TS = travail du sol, Rdt = Rendement en grain ($q\ ha^{-1}$), BS = Rendement en biomasse sèche ($q\ ha^{-1}$), Paille = Rendement en paille ($q\ ha^{-1}$), IR = Indice de récolte, NPM = Nombre de plants/m², NEM = Nombre d'épis/m², NGE = Nombre de grains par épi, PMG = Poids de mille grains (g), ns = non significatif à $P<0,05$, * = significatif à $P<0,05$, ** = significatif à $P<0,01$, *** = significatif à $P<0,001$.

Tableau 11 : Carrés moyens analyse de la variance de l'effet du travail du sol et des rotations sur les paramètres de la qualité du grain de la culture de blé dur durant l'année 2018-2019.

Caractères	TS <i>ddl</i> =2	Rotation <i>ddl</i> = 3	Bloc <i>ddl</i> = 2	TS×rotation <i>ddl</i> = 6	Erreur 1 <i>ddl</i> = 4	Erreur 2 <i>ddl</i> = 18
Protéines (%)	41,46 ns	20,34 ns	16,84	19,08 ns	19,69	15,39
PS	0,33 ns	4,78**	16,49	0,83 ns	5,50	0,88
VI%	31,34***	46,68***	5,30	41,91 ns	1,54	5,45

NB : TS = travail du sol, PS = poids spécifique ($kg\ hl^{-1}$), VI % = taux de vitrosité (%), ns = non significatif à $P<0,05$, * = significatif à $P<0,05$, ** = significatif à $P<0,01$, *** = significatif à $P<0,001$.

Tableau 12 : Carrés moyens analyse de la variance de l'effet du travail du sol et des rotations sur les paramètres de la nutrition phosphatée de la culture de blé dur durant l'année 2018-2019.

Caractères	TS <i>ddl</i> =2	Rotation <i>ddl</i> =3	Bloc <i>ddl</i> = 2	TS×rotation <i>ddl</i> = 6	Erreur 1 <i>ddl</i> = 4	Erreur 2 <i>ddl</i> = 18
BS floraison	316,65 ns	457,97*	905,86	238,28 ns	456,76	139,08
P floraison	0,02 ns	0,16 ns	0,15	0,04 ns	0,01	0,06
Exp floraison	15,53 ns	12,38 ns	84,12	14,27 ns	38,30	8,81
P Grain	0,03 ns	0,26 ns	1,60	0,07 ns	0,24	0,06
P paille	0,02 ns	0,11***	0,08	0,05 ns	0,06	0,01
Exp totale	0,84 ns	3,85 ns	48,86	2,43 ns	4,17	3,62

NB : TS = travail du sol, BS floraison = Rendement en matière sèche au stade floraison $q\ ha^{-1}$, P floraison = Teneur en P dans la plante au stade floraison ($g\ kg^{-1}$), Exp floraison = Exportation totale en P au stade floraison ($kg\ ha^{-1}$), P Grain = Teneur en P dans le grain au stade maturité ($g\ kg^{-1}$), P paille = Teneur en P dans la paille au stade maturité ($g\ kg^{-1}$), Exp totale = Exportation totale en P au stade maturité ($kg\ ha^{-1}$), ns = non significatif à $P<0,05$, * = significatif à $P<0,05$, ** = significatif à $P<0,01$, CV % = coefficient de variation.

Tableau 13 : Carrés moyens analyse de la variance de l'effet du travail du sol et des rotations sur la teneur en P assimilable et le pH du sol durant l'année 2018-2019.

Caractères	TS <i>ddl = 2</i>	Rotation <i>ddl = 3</i>	Bloc <i>ddl = 2</i>	TS×rotation <i>ddl = 6</i>	Erreur 1 <i>ddl = 4</i>	Erreur 2 <i>ddl = 18</i>
P assimilable	101,37 ns	34,34 ns	466,67	23,77 ns	116,42	29,37
pH	0,00 ns	0,00 ns	0,09	0,00 ns	0,00	0,00

NB : TS = travail du sol, ns = non significatif à $P < 0,05$.

Tableau 14 : Carrés moyens analyse de la variance de l'effet du travail du sol et des rotations sur la teneur en P assimilable et le pH du sol durant l'année 2018-2019.

Caractères	TS <i>ddl = 2</i>	Rotation <i>ddl = 3</i>	Bloc <i>ddl = 2</i>	TS×rotation <i>ddl = 6</i>	Erreur 1 <i>ddl = 4</i>	Erreur 2 <i>ddl = 18</i>
P assimilable	33,97 ns	153,68 ns	244,87	76,34 ns	136,93	77,21
pH	0,01**	0,00 ns	0,11	0,00 ns	0,00	0,00

NB : TS = travail du sol, ns = non significatif à $P < 0,05$, ** = significatif à $P < 0,01$.

Tableau 15 : Carrés moyens analyse de la variance de l'effet du travail du sol et des rotations sur la teneur en P assimilable et le pH du sol durant l'année 2019-2020.

Caractères	TS <i>ddl = 2</i>	Rotation <i>ddl = 3</i>	Bloc <i>ddl = 2</i>	TS×rotation <i>ddl = 6</i>	Erreur 1 <i>ddl = 4</i>	Erreur 2 <i>ddl = 18</i>
P assimilable	143,68 ns	7,64 ns	250,45	35,58 ns	120,53	35,41
pH	0,11 ns	0,01 ns	0,11	0,00 ns	0,077	0,013

NB : TS = travail du sol, ns = non significatif à $P < 0,05$.

Annexe II

Tableau 1 : Carrés moyens de l'analyse de la variance de l'effet de la dose et de mode d'application d'engrais P sur la culture de lentille durant l'année 2018-2019.

Caractères	D <i>ddl = 2</i>	M <i>ddl = 1</i>	Bloc <i>ddl = 3</i>	D × M <i>ddl = 2</i>	Erreur 1 <i>ddl = 6</i>	Erreur 2 <i>ddl = 9</i>
Rdt	43,23**	11,37 ns	21,81	16,93 ns	2,81	20,70
NGP	514,50*	5,61 ns	116,82	8,17 ns	70,00	64,61
NGG	0,01 ns	0,01 ns	0,04	0,07 ns	0,03	0,05
PMG	6,46 ns	16,25 ns	10,84	1,14 ns	3,46	4,50
P assimilable	239,09 ns	8,64 ns	124,76	89,79 ns	16,89	29,91

NB : D = dose d'engrais P, M = mode d'application de l'engrais P, Rdt = rendement en grain (ha^{-1}), NGP = nombre de gousses par plant, NGG = nombre de grains par gousse, PMG = poids de mille grains (g), ns = non significatif à $P < 0,05$, * = significatif à $P < 0,05$, ** = significatif à $P < 0,01$.

Tableau 2 : Carrés moyens de l'analyse de la variance de l'effet de la dose et de mode d'application d'engrais P sur les composantes du rendement et le rendement en grain et en matière sèche de la culture de blé dur conduite sur la lentille durant l'année 2019-2020.

Caractères	D <i>ddl = 2</i>	M <i>ddl = 1</i>	Bloc <i>ddl = 3</i>	D × M <i>ddl = 2</i>	Erreur 1 <i>ddl = 6</i>	Erreur 2 <i>ddl = 9</i>
Rdt	0,09 ns	0,23 ns	0,01	0,01 ns	0,10	0,10
BS	3,78*	0,92 ns	0,51	0,24 ns	0,37	0,61
NEM	514,09 ns	1570,86 ns	595,40	265,83 ns	126,13	417,81
NGE	113,23 ns	78,84 ns	97,89	63,93 ns	56,69	28,82
PMG	2,54 ns	0,06 ns	8,93	2,88 ns	12,54	3,83

NB : D = dose d'engrais P, M = mode d'application de l'engrais P, Rdt = Rendement en grain (q ha^{-1}), BS = Rendement en biomasse sèche (q ha^{-1}), NEM = Nombre d'épis/ m^2 , NGE = Nombre de grains par épi, PMG = Poids de mille grains (g), ns = non significatif à $P < 0,05$, * = significatif à $P < 0,05$, ** = significatif à $P < 0,01$, *** = significatif à $P < 0,001$.

Tableau 3 : Carrés moyens de l'analyse de la variance de l'effet dose et de mode d'application d'engrais P sur la nutrition phosphatée de la culture de blé dur conduite sur la lentille durant l'année 2019-2020.

Caractères	D <i>ddl = 2</i>	M <i>ddl = 1</i>	Bloc <i>ddl = 3</i>	D × M <i>ddl = 2</i>	Erreur 1 <i>ddl = 6</i>	Erreur 2 <i>ddl = 9</i>
P Grain	0,06 ns	0,30**	0,81	0,04 ns	0,27	0,02
P paille	0,00 ns	0,00***	0,00	0,00 ns	0,00	0,00
Exp totale	4,31 ns	1,04 ns	5,17	0,73 ns	5,08	2,48

NB : D = dose d'engrais P, M = mode d'application de l'engrais P, P Grain = Teneur en P dans le grain (g kg^{-1}), P paille = Teneur en P dans la paille (g kg^{-1}), Exp totale = Exportation totale en P (kg ha^{-1}), ns = non significatif à $P < 0,05$, * = significatif à $P < 0,05$, ** = significatif à $P < 0,01$.

Tableau 4 : Carrés moyens de l'analyse de la variance de l'effet de la dose et de mode d'application d'engrais P sur les composantes du rendement et le rendement en grain et en matière sèche de la culture de blé dur conduite en monoculture durant l'année 2018-2019.

Caractères	D <i>ddl = 2</i>	M <i>ddl = 1</i>	Bloc <i>ddl = 3</i>	D × M <i>ddl = 2</i>	Erreur 1 <i>ddl = 6</i>	Erreur 2 <i>ddl = 9</i>
Rdt	16,36 ns	42,44 ns	131,77	16,04 ns	19,62	34,90
BS	86,07 ns	304,00 ns	259,51	11,48 ns	194,98	374,29
NEM	2682,65 ns	782,99 ns	2900,08	1972,23 ns	3139,90	1520,76
NGE	19,14 ns	2,26 ns	10,79	0,66 ns	4,26	2,40
PMG	3,03 ns	0,91 ns	31,12	3,01 ns	11,00	3,30

NB : Légende : se référer au tableau 2.

Tableau 5 : Carrés moyens de l'analyse de la variance de l'effet dose et de mode d'application d'engrais P sur la nutrition phosphatée de la culture de blé dur conduite en monoculture durant l'année 2018-2019.

Caractères	D <i>ddl = 2</i>	M <i>ddl = 1</i>	Bloc <i>ddl = 3</i>	D × M <i>ddl = 2</i>	Erreur 1 <i>ddl = 6</i>	Erreur 2 <i>ddl = 9</i>
P Grain	0,29 ns	0,08 ns	0,90	0,06 ns	0,38	0,08
P paille	0,03 ns	0,02 ns	0,03	0,02 ns	0,02	0,05
Exp totale	0,66 ns	5,52 ns	11,05	2,12 ns	9,20	7,96
P assimilable	24,88 ns	84,38 ns	44,38	63,88 ns	144,71	84,38

NB : Légende : se référer au tableau 3.

Tableau 6 : Carrés moyens de l'analyse de la variance de l'effet de la dose et de mode d'application d'engrais P sur les composantes du rendement et le rendement en grain et en matière sèche de la culture de blé dur conduite en monoculture durant l'année 2019-2020.

Caractères	D <i>ddl = 2</i>	M <i>ddl = 1</i>	Bloc <i>ddl = 3</i>	D × M <i>ddl = 2</i>	Erreur 1 <i>ddl = 6</i>	Erreur 2 <i>ddl = 9</i>
Rdt	0,00 ns	0,27 ns	0,23	0,10 ns	0,17	0,11
BS	0,00 ns	0,44 ns	0,36	0,16 ns	0,28	0,18
NEM	1299,16 ns	10,08 ns	705,05	155,92 ns	848,53	1198,23
NGE	2,90 ns	12,20 ns	9,34	3,56 ns	8,86	10,98
PMG	0,97 ns	9,43 ns	3,68	0,47 ns	3,75	10,84

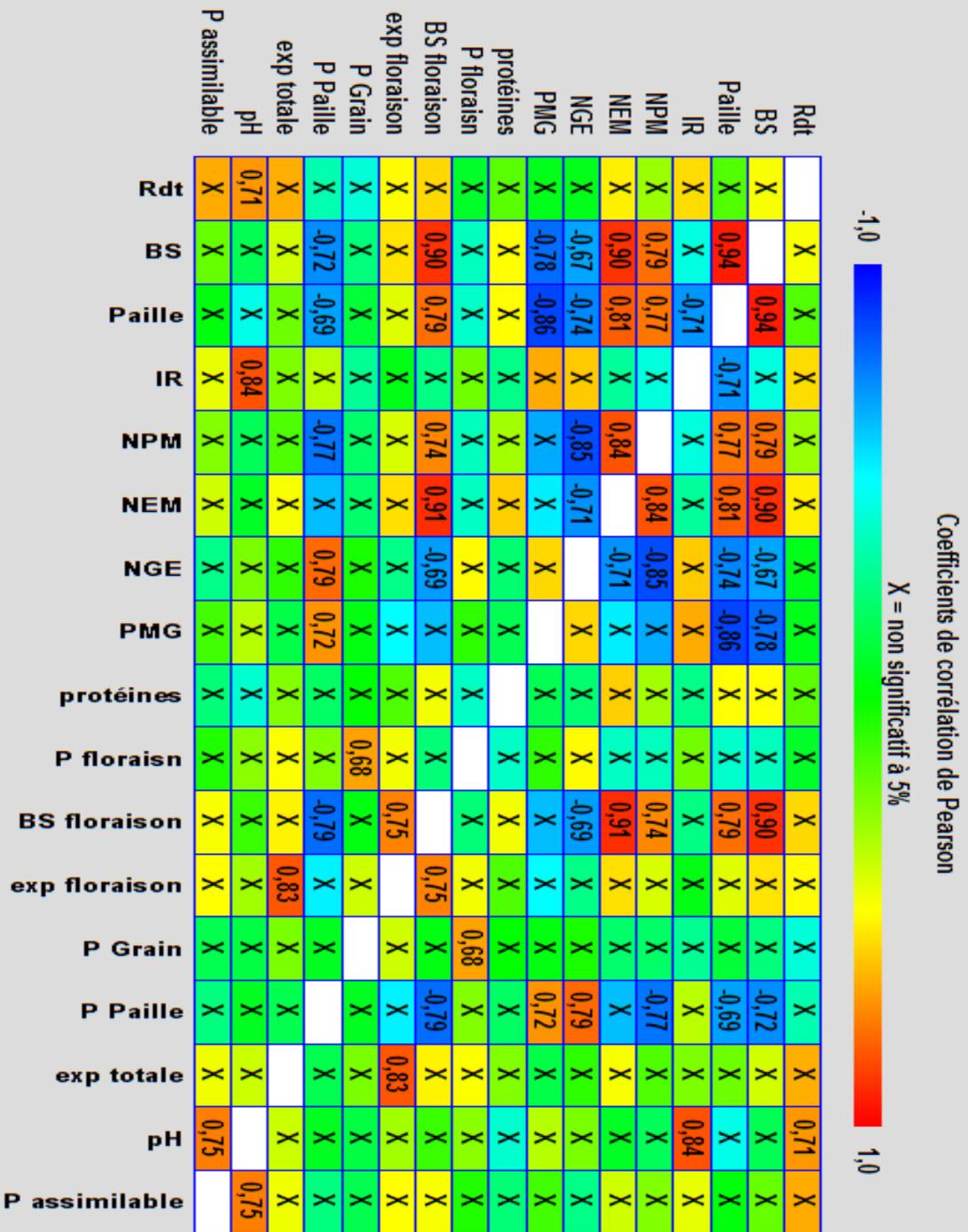
NB : Légende : se référer au tableau 2.

Tableau 7 : Carrés moyens de l'analyse de la variance de l'effet dose et de mode d'application d'engrais P sur la nutrition phosphatée de la culture de blé dur conduite en monoculture durant l'année 2019-2020.

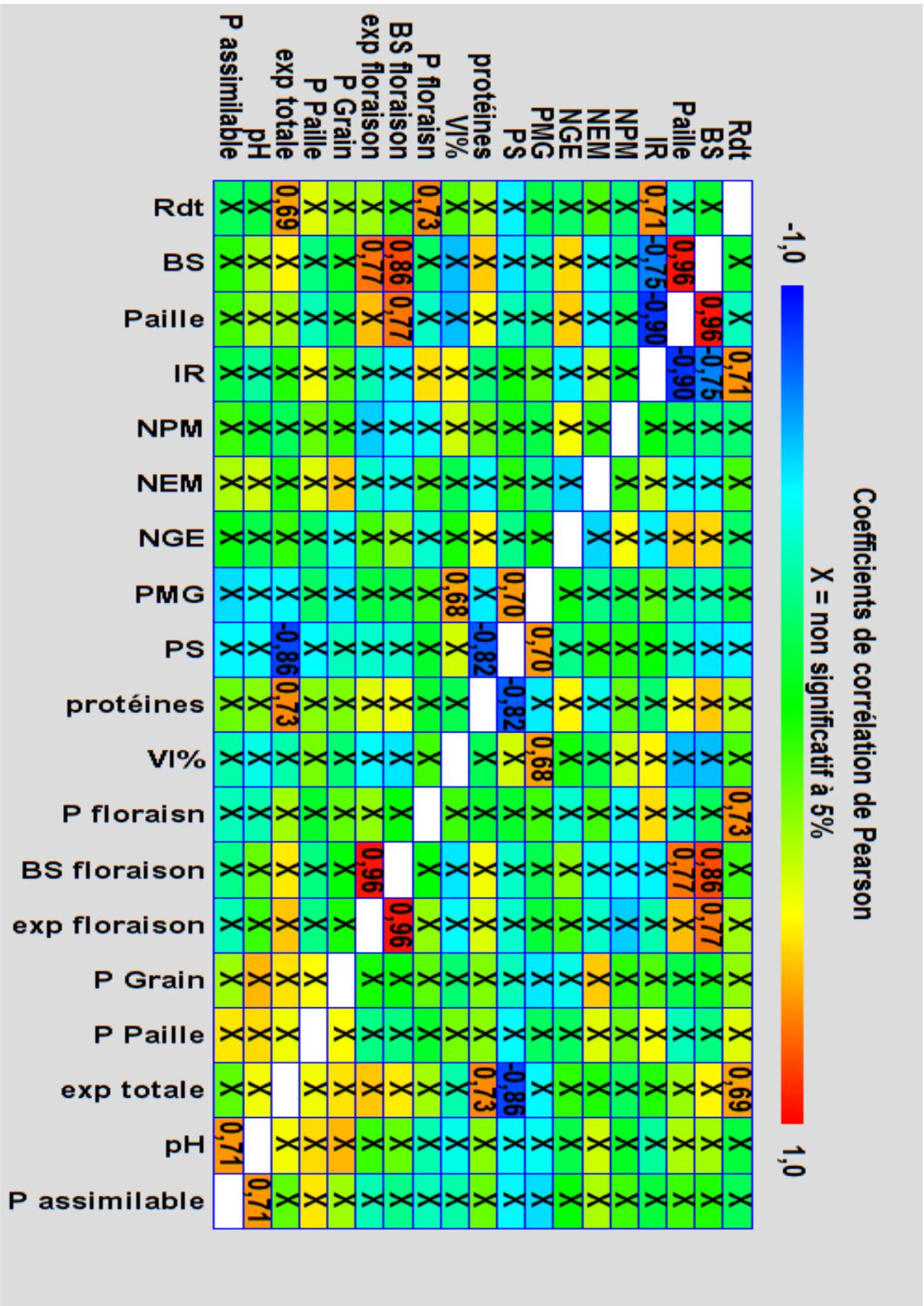
Caractères	D <i>ddl = 2</i>	M <i>ddl = 1</i>	Bloc <i>ddl = 3</i>	D × M <i>ddl = 2</i>	Erreur 1 <i>ddl = 6</i>	Erreur 2 <i>ddl = 9</i>
P Grain	0,07 ns	0,03 ns	0,39	0,00 ns	0,08	0,04
P paille	0,00 ns	0,00 ns	0,05	0,00 ns	0,01	0,01
Exp totale	0,17 ns	4,17 ns	3,79	1,83 ns	3,90	1,64

NB : Légende : se référer au tableau 3.

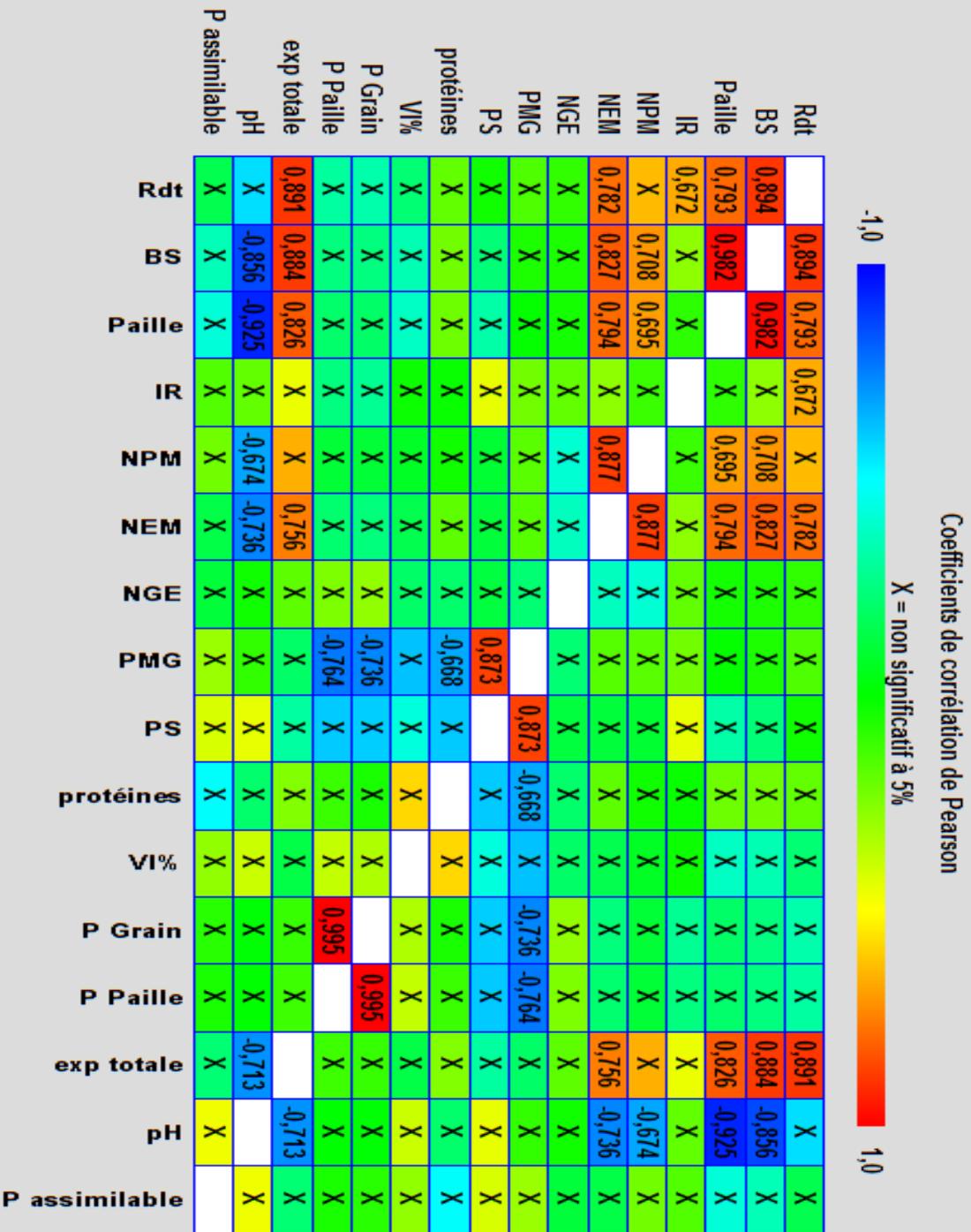
Matrice de corrélation des paramètres mesurés sur la culture de blé dur durant l'année 2017-2018



Matrice de corrélation des paramètres mesurés sur la culture de blé dur durant l'année 2018-2019



Matrice de corrélation des paramètres mesurés sur la culture de blé dur durant l'année 2019-2020





Photos 1 : Opérations culturales réalisées dans le système de TC : A : labour avec une charrue bisocs, B : reprise de labour par un cover-crop, C : hersage et roulage.



Photos 2 : Opérations culturales réalisés dans le système de TM : à gauche ouverture du sol par cultivateur à dents pattes d'oie, et à droite hersage et roulage.



A



B



C

Photos 3 : Images des semoirs utilisés dans l'étude, A : le semoir direct Sola, B : le semoir direct combiné John Chaerer, C : le semoir coventionnel combiné Gaspardo.



A



B



Photos 4 : Comportement de la culture de blé dur dans les trois systèmes de travail du sol, A : TC, B : TM, C : SD.



Photo 5 : Stade début tallage dans l'essai de la fertilisation 2018-2019.



Photo 6 : Vue générale de l'essai des systèmes de culture en 2019.

Publication