

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l'enseignement

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



Université Ibn Khaldoun de Tiaret Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences
agronomiques

Thème

**Evaluation de l'état nutritionnel potassique des cultures
annuelles : Cas du blé sous climat Méditerranéen**

Soutenue publiquement le : 07 / 03 /2024

Présentée par : **Messaoudi Amina**

Membres de jury :

Pr. HASSANI A. (*Professeur, Université de Tiaret*)

Président

Pr. LABDELLI F. (*Professeure, Université de Tiaret*)

Directeur de thèse

Pr. DJERBAOUI M. (*Professeure, Université de Tiaret*)

Co directeur de thèse

Pr. MEKLICH A. (*Professeur, ENSA Alger*)

Examineur

MCA. MEHDEB D. (*MCA, Ecole Supérieur d'Agronomie Mostaganem*)

Examinatrice

Pr. LATATI M. (*Professeur, ENSA Alger*)

Invité

Année universitaire **2023/2024**

REMERCIEMENTS

Avant tout je remercie DIEU le tout puissant qui m'a donné force, courage, et volonté pour entreprendre et achever ce travail et que le grand salut soit sur notre prophète MOHAMED.

C'est avec beaucoup de respect que je remercie infiniment Monsieur **DAOUD Y.**, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie El Harrach Alger à qui j'exprime ma reconnaissance pour m'avoir autant aidée pendant la période de la réalisation de ce travail jusqu'à la fin, et spécialement lors de la rédaction de l'article et de la thèse. Ses corrections, sa rapidité de réflexion et sa volonté de me voir réussir ont été essentielles pour l'aboutissement de ce travail.

Je souhaite remercier particulièrement Monsieur **LATATI M.**, Professeur à l'université de skikda, pour son investissement sans faille, le partage de son expérience et ses conseils m'ont fait progresser. Je vous remercie sincèrement pour tout le soutien que vous m'aviez accordé au cours de cette thèse.

Mes remerciements et mon respect à Madame **LABDELLI F.**, Professeur à l'Université Ibn Khaldoun Tiaret, mon encadrante pour son aide durant les quatre années de réalisation de cette recherche et également ma Co-encadrante Madame **DJERBAOUI M.**

Aussi mes vifs remerciements à Monsieur le professeur **HASSANI A** pour avoir bien voulu présider le jury.

Mes remerciements vont également aux professeurs **MEKLICH A** et **MEHDEB D**, pour avoir acceptés d'être membres du jury.

En fin je remercie les enseignants du département de botanique et phytotechnie de l'ENSA le professeur **BOUZENAD Z**, **MEKLICH A** pour leurs aides au terrain et au laboratoire.

Mes vifs remerciements aux personnels du laboratoire de l'école supérieure d'agronomie El Harrech, surtout les ingénieurs des deux départements pédologie et phytotechnie : **Radouane** et **Asma**, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail

À mes très chers parents que Dieu les bénisse inchallah.

*À mon mari : **Mohamed.***

*A mon petit ange, mon fils : **Ayoub.***

*À mes sœurs et à mes frères : **Imane, Maroua, Lakhdar, Mehdi.***

*À mes adorables nièces et neveu : **Farah et Eline et Samy.***

À toute la famille Messaoudi et la famille Tairi.

A toutes mes amies et collègues.

Résumé

Il est bien connu qu'une fertilisation minérale équilibrée et optimale (azote, phosphore et potassium) peut augmenter le rendement et améliorer la qualité du blé. Cependant, il existe peu de connaissances scientifiques sur l'effet spécifique de la fertilisation potassique (K) sur les caractéristiques morphologiques et qualitatives du blé dur pluvial en conditions méditerranéennes, en particulier dans le contexte de l'agriculture algérienne. Par conséquent, l'objectif principal de cette étude est de fournir des informations cruciales sur ce type important de nutrition minérale du blé dur pour les agriculteurs et les chercheurs travaillant dans des domaines similaires. L'étude de terrain a été menée dans la région de la Mitidja, dans le nord de l'Algérie, au cours des saisons de croissance 2020-2021 et 2021-2022. L'effet de la fertilisation en K a été évalué dans le cadre de cinq taux contrastés de K : 0 kg k_2O ha⁻¹, 100 kg k_2O ha⁻¹, 200 kg k_2O ha⁻¹, 300 kg k_2O ha⁻¹ et 400 kg k_2O ha⁻¹, qui ont été appliqués sur l'un des cultivars du blé dur les plus couramment cultivés (Simeto). Les résultats ont montré que l'augmentation des niveaux de potassium avait un impact positif et significatif uniquement sur le rendement en grains, la longueur des épis, le col des épis et la matière sèche. Ainsi, le rendement en grains le plus élevé du blé dur (2,58 t ha⁻¹) a été démontré avec une faible application de K (100 kg k_2O ha⁻¹). Ce taux conduit à une augmentation du rendement en grains de plus de 0,6 t ha⁻¹ par rapport au témoin non fertilisé. En outre, le poids de mille grains du blé dur a été significativement augmenté de 4,11 g et de 1,96 g, respectivement, sous une fertilisation K faible et modérée (100 et 200 kg k_2O ha⁻¹) par rapport au témoin. En terme de qualité du rendement en grains, l'application d'une faible quantité de K a permis d'augmenter la teneur en protéines de 1,21 % par rapport à celle mesurée dans le cadre du traitement de contrôle. Les principaux résultats confirment que les indicateurs de croissance et du rendement du blé dur ont été globalement optimisés par l'application d'une faible quantité de K. Sur la base du rendement en grains et des caractéristiques agronomiques évaluées, cette recherche a révélée qu'un taux d'application de K de 100 kg k_2O ha⁻¹ est recommandé comme la dose la plus efficace pour maximiser le rendement et la qualité du blé dur dans les conditions subhumides algériennes.

Mots clés : blé dur ; traits morphologiques ; caractéristiques qualitatives ; fertilisation potassique ; conditions subhumides algériennes.

الخلاصة

من المعروف أن التسميد المعدني المثالي والمتوازن (النيتروجين والفسفور والبوتاسيوم) يمكن أن يزيد من المحصول ويحسن من جودة القمح. ومع ذلك ، هناك القليل من المعرفة العلمية حول التأثير المحدد للتخصيب بالبوتاسيوم للخصائص المورفولوجية والنوعية للقمح الصلب في المرتفعات في ظروف البحر الأبيض المتوسط ، لا سيما في سياق الزراعة الجزائرية. لذلك، فإن الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو توفير معلومات مهمة عن هذا النوع المهم من التغذية المعدنية للقمح الصلب للمزارعين والباحثين العاملين في مجالات مماثلة. أجريت الدراسة الميدانية بمنطقة متيجة شمال الجزائر خلال موسمي النمو 2021/2020 و 2022/2021. تم تقييم تأثير الإخصاب بالبوتاسيوم تحت خمسة قيم متباينة من البوتاسيوم في الهكتار: 0 كغ 100 كغ 200 كغ 300 كغ 400 كغ التي تم تطبيقها على أحد أصناف القمح القاسي الأكثر شيوعاً (سيميتو) المزروعة.

أظهرت النتائج أن زيادة مستويات البوتاسيوم كان لها تأثير إيجابي على محصول الحبوب وطول السنبلية وعنق السنبلية والمادة الجافة. ومن ثم ، تم توضيح ان أعلى محصول حبوب للقمح الصلب (2.58 طن هكتار) تحت تطبيق منخفض البوتاسيوم ب 100 كغ في الهكتار يؤدي هذا المعدل إلى زيادة محصول الحبوب بأكثر من 0.6 طن هكتار مقارنةً بالأراضي التي لا تحتوي على اضافة في البوتاسيوم علاوة على ذلك ، زاد وزن الألف حبة من القمح الصلب بمقدار 4.11 جم و 1.96 جم على التوالي تحت التسميد المنخفض والمتوسط ب 100 و 200 كغ بوتاسيوم بالمقارنة مع الشاهد. فيما يتعلق بجودة محصول الحبوب ، يوفر تطبيق منخفض البوتاسيوم زيادة بنسبة 1.21% في محتوى البروتين مقارنة بتلك تحت الأراضي الشاهدة. أكدت النتيجة الرئيسية أن كلا من مؤشرات النمو والإنتاج للقمح الصلب تم تحسينها عامة في ظل تطبيق منخفض ب 100 كغ بوتاسيوم في الهكتار. بناءً على محصول الحبوب والصفات الزراعية المقيمة ، أظهر هذا البحث أن معدل 100 كغ موصى به باعتباره الجرعة الأكثر فعالية لتعظيم محصول وجودة القمح القاسي في ظل الظروف الجوية الرطبة.

الكلمات المفتاحية: خصائص الجودة الصفات المورفولوجية ،القمح الصلب ؛ الإخصاب بالبوتاسيوم ؛ الظروف الجوية الرطبة ؛

Abstract

It is well known that balanced and optimal mineral fertilization (i.e., nitrogen, phosphorus, and potassium) can increase yield and improve wheat quality. However, there is little scientific knowledge on the specific effect of potassium (K) fertilization on the morphological and qualitative characteristics of rainfed durum wheat under Mediterranean conditions, especially in the context of Algerian agriculture. Therefore, the main objective of this study is to provide crucial information on this important type of durum wheat mineral nutrition for farmers and researchers working in similar areas. The field study was conducted in the Northern Algerian region of Mitidja during the 2020-2021 and 2021-2022 growing seasons. The effect of K fertilization was evaluated within five contrasted rates of K: 0 kg $\text{k}_2\text{O ha}^{-1}$, 100 kg $\text{k}_2\text{O ha}^{-1}$, 200 kg $\text{k}_2\text{O ha}^{-1}$, 300 kg $\text{k}_2\text{O ha}^{-1}$, and 400 kg $\text{k}_2\text{O ha}^{-1}$, which were applied on one of the most common cultivated cultivars of durum wheat (Simeto). Results showed that increasing potassium levels had a positive and significant impact only on grain yield, spike length, spike neck, and dry matter. Hence, the highest grain yield of durum wheat (2.58 t ha^{-1}) was demonstrated under low K application (100 kg $\text{k}_2\text{O ha}^{-1}$). This rate leads to an increase in grain yield by more than 0.6 t ha^{-1} as compared to the unfertilized control. Moreover, the thousand-grain weight of durum wheat was significantly increased by 4.11 g and 1.96 g, respectively under low and moderate (100 and 200 kg $\text{k}_2\text{O ha}^{-1}$) K-fertilization as compared to control. In terms of grain yield quality, low K application provides an increase of 1.21% in protein content as compared to that measured under the control treatment. The major finding confirmed that both growth and yield indicators of durum wheat were globally optimized under low K application. Based on grain yield and evaluated agronomic traits, this research revealed that an applied K rate of 100 kg $\text{k}_2\text{O ha}^{-1}$ is recommended as the most effective dose to maximize durum wheat yield and quality under Algerian sub-humid conditions.

Keywords: durum wheat; morphological traits; quality characteristics; potassium fertilization; Algerian sub-humid conditions

Liste des abréviations

Rdt	Rendement en grain
LE	Longueur d'épis
PMG	Poids de mille grains
qx	quintaux en hectare
ha	hectare
USDA	Le département de l'Agriculture des États-Unis
MADR	Ministère de l'agriculture et du développement rural
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
ARVALIS	Institut technique agricole français
UNIFA	Union Uni des industries de la fertilisation
IPI	International Potash Institut
IPNI	International Plant Nutrition Institut
K	Potassium
K₂O	Oxyde de potassium
N	Azote
P	Phosphore
CEC	Capacité d'Echange Cationique
ITGC	Institut technique des grandes cultures

Liste des tableaux

Tableau 1. Propriétés physiques et chimiques du sol étudié.....	39
Tableau 2. Effet des niveaux de potassium sur les caractéristiques morphologiques du blé dur.....	45
Tableau 3. Effet de l'augmentation des niveaux de potassium sur les caractéristiques de rendement.....	49
Tableau 4. Effet de l'augmentation des niveaux de potassium sur la teneur en protéines (%) du blé dur.....	52
Tableau 5. Teneur en potassium (mg kg^{-1}) et en azote (%) des feuilles de blé au stade de la floraison.....	57
Tableau 6. Teneur en potassium disponible après la récolte ($\text{meq}/100 \text{ g}$ de sol).....	58

Listes des Figures

Figure 1. Champ de blé dur – Adobe stock février 2021.....	17
Figure 02. Schéma d'une coupe d'un grain de blé.....	18
Figure 03. Les stades phénologiques de blé, par l'échelle BBCH	19
Figure 04. L'origine géographique des blés cultivés.....	20
Figure 05. Surplus et déficit de blé dans le monde (source USDA, janvier 2018).....	21
Figure 06. Production de blé par pays (FAO stats 2019).....	23
Figure 07. Les besoins de blé en éléments fertilisants au cours de différents stades de croissance Source : Centre de recherches d'Aspach, Ministère de l'agriculture (Site Unifa).....	25
Figure 08. Schéma simplifié des stades et phases de développement de blé tendre d'hiver : période de formation des composantes du rendement et l'élaboration du rendement (D'après Arvalis, Institut du végétal, 2016).....	27
Figure 09. Carte du monde : production de potasse par État en (2017), Source (Atlasocio.com).....	30
Figure 10. Les compartiments du potassium dans le sol.....	31
Figure 11. Schéma récapitulatif de la réponse des plantes lors d'une déficience en potassium.....	33
Figure 12. Représentation schématique de la fabrication d'engrais potassiques. Source : http://www.unifa.fr/nourrir-les-plantes/engrais-et-amendements	35
Figure 13. L'étendue de la plaine de la Mitidja dans le nord de l'Algérie.....	38
Figure 14. Echantonnage du sol avant l'installation de la culture (photo Messaoudi).....	38
Figure 15. Températures et précipitations mensuelles de deux campagnes agricoles ("2020- 2021"/"2021-2022") et de la période de (1990-2020) pour le site	

expérimental.....	40
Figure 16. Photo réelle d'installation de dispositif expérimental.....	41
Figure 17. Mesure de stade premier épis (cm).....	41
Figure 18. Mesure de la hauteur épis (cm).....	42
Figure 19. Mesure de la teneur en matière sèche (%)......	42
Figure 20. Mesure du poids mille grains (g).....	43
Figure 21. Relation entre la surface foliaire (cm ²) et les doses croissantes du potassium.....	46
Figure 22. Relation entre la densité des peuplement en unité de surface et les doses croissantes du potassium.....	46
Figure 23. Relation entre le nombre des talles en unité de surface et les doses croissantes du potassium.....	47
Figure 24. Relation entre la biomasse aérienne et les doses croissantes du potassium.....	50
Figure 25. Relation entre le rendement en paille (t ha ⁻¹) et les doses croissantes du potassium.....	50
Figure 26. Relation entre l'indice de récolte et les doses croissantes du potassium.....	51
Figure 27. Relation entre le taux de mitadinage (%) et les doses croissantes du potassium.....	53
Figure 28. Relation entre le taux de la vitrosité (%) et les doses croissantes du potassium.....	54
Figure 29. Relation entre le taux de la moucheture(%) et les doses croissantes du potassium.....	54
Figure 30. Relation entre le parametre indice de jaune et les doses croissantes du potassium.....	55
Figure 31. Relation entre le paramètre indice de brun et les doses croissantes du potassium.....	56
Figure 32. Relation entre le rendement en grains (Rdt), la longueur des épis (LE) et le poids de mille grains (PMG).....	59

SOMMAIRE

Résumé.....	4
الخلاصة.....	5
Abstract.....	6
Liste des abréviations.....	7
Liste des tableaux.....	8
Liste des Figures.....	9
Introduction.....	14
CHAPITRE I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
1. CLASSIFICATION, ORIGINE ET GEOGRAPHIE DU BLE.....	17
1.1. Classification taxonomique du blé dur.....	17
1.2. Structure de grain de blé.....	17
1.3. Les stades phénologiques de blé.....	18
1.4. Origine génétique du blé.....	20
1.5. L'origine géographique de blé dur.....	20
1.6. La distribution géographique de blé dans le monde.....	21
2. LE BLE DANS LE MONDE.....	21
3. PRODUCTION DU BLE EN ALGERIE.....	23
3.1. Production de blé dans la zone subhumide d'Algérie.....	24
4. EXIGENCE DE BLE EN ELEMENTS MINERAUX ESSENTIELS.....	24
4.1. Exigence en Azote.....	25
4.2. Exigence en Phosphore.....	26

4.3. Exigence en Potassium.....	26
5. LES COMPOSANTES DU RENDEMENT DE BLE.....	26
5.1. Nombre de plantes /m ²	27
5.2. Nombre des épis/ plante.....	27
5.3. Nombre des grains / épi.....	28
5.4. Poids de mille grains (PMG).....	28
6. PROTEINES DU BLE DUR.....	28
7. LE POTASSIUM.....	29
7.1. L'origine de potassium.....	30
7.2. Les formes de potassium dans le sol.....	31
7.3. Dynamique du K dans les sols.....	31
7.4. Rôle de potassium dans la plante.....	32
7.5. Effet de la carence en potassium sur les plantes.....	32
8. ENGRAIS POTASSIQUE.....	33
8.1. La production des différentes formes de l'engrais potassique.....	34
8.1.1. Chlorure de potassium.....	34
8.1.2. Sulfate de potassium.....	35
9. EFFET DE LA FERTILISATION POTASSIQUE SUR LE BLE DUR.....	35

CHAPITRE II. MATERIELS ET METHODES

1. PRESENTATION DE LA REGION ET DU SOL D'ETUDE.....	37
2. CONDITIONS ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX.....	39
3. ANALYSES STATISTIQUES.....	43

CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION

1. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU BLE DUR.....	44
2. REPRESENTATION GRAPHIQUE DE QUELQUES TRAITES MORPHOLOGIQUES.....	45

2.1. La surface foliaire (cm ²).....	45
2.2. La densité des Plantes.....	46
2.3. Nombre des talles en m ²	47
3. RENDEMENT EN GRAINS ET CARACTERISTIQUES DU RENDEMENT	
3.1. Rendement en grain (t ha ⁻¹).....	47
3.2. Matière sèche (%).....	48
3.3. Poids de mille grains (g).....	48
4. REPRESENTATION GRAPHIQUE DE QUELQUES PARAMETRES DE RENDEMENT.....	49
4.1. La biomasse (t ha ⁻¹).....	49
4.2. Rendement en paille (t ha ⁻¹).....	50
4.3. L'indice de récolte.....	51
5. TENEUR EN PROTEINES DES GRAINS DE BLE.....	51
6. REPRESENTATION GRAPHIQUE DE QUELQUES PARAMETRES DE QUALITE.....	53
6.1 Le mitadinage.....	53
6.2. La vitrosité.....	53
6.3. Taux de la moucheture.....	54
6.4. Indice de jaune et l'indice de brun.....	55
6.4.1. Indice de jaune.....	55
6.4.2. Indice de brun.....	55
7. ÉTAT NUTRITIONNEL DES PLANTES.....	56
8. POTASSIUM RESIDUEL DU SOL.....	57
9. RENDEMENT ET ANALYSES DE CORRELATION AVEC LA LONGUEUR DES EPIS ET LE POIDS DE MILLE GRAINS.....	59
DISCUSSION.....	60
CONCLUSION.....	64
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	66

INTRODUCTION

Le blé dur (*Triticum Durum Desf*) est une culture stratégique essentielle et un secteur important pour la sécurité alimentaire mondiale, car il constitue une source principale de protéines qui fournit le gluten nécessaire à la fabrication du pain (Arif et al., 2017). En Algérie, l'augmentation de la production des céréales est la préoccupation majeure par l'état et surtout le blé dur pour atteindre l'autosuffisance, qui est un produit qu'on le sait, largement consommé sous différentes formes : pâte, pain et couscous (Ladraa., 2012 ; Rebouh et al., 2018). Au niveau national, c'est la céréale la plus cultivée et son rendement actuel est de l'ordre de 1800 Kg ha⁻¹ (M.A.D.R, 2021). Des études antérieures ont montré qu'un rendement de 4000 Kg ha⁻¹ serait nécessaire pour répondre aux besoins de la population, malgré de notables progrès dans la production du blé dur dans le pays pendant certaines années, il se trouve que le plus souvent cette spéculation n'arrive pas à couvrir les besoins d'une population parmi les plus consommatrice dans le Maghreb et dans le monde (Haddad., 2021 et Baghdali., 1991).

Ces dernières années, de gros efforts ont été faits par le secteur public pour soutenir la production nationale du blé dur, notamment en portant le prix à 6 000 DA le quintal, en subventionnant l'achat de machines agricoles et d'engrais, et en augmentant la disponibilité des semences pour les cultures à haut rendement, et aussi le développement de système d'irrigation, par les instituts spécialisés. Le blé dur est une principale culture vivrière dans notre pays, sa productivité est restreinte par les facteurs biotiques et abiotiques, Cependant, plusieurs facteurs tels que le déficit hydrique, la qualité des semences, la date de semis et l'utilisation inadéquate d'engrais influencent la productivité de la culture du blé (Daoud et Etournaud., 1995 ; Zargar et al., 2017). Parmi ces facteurs, la sécheresse est un stress abiotique très important qui limite la production de blé (Ould Amer et al., 2023 ; Sedri et al., 2022). Selon un rapport publié par le ministère américain de l'agriculture (USDA), le déficit hydrique a entraîné une baisse de la production de blé, ce qui a conduit à des importations d'environ 8 millions de tonnes pour l'année 2021 (Kourat and al., 2022). Par conséquent, les systèmes de culture pluviale devraient être considérés comme l'un des principaux moyens d'accroître et de stabiliser la production céréalière, en particulier dans les régions algériennes subhumides (Houssaine et al., 2019), étant donné que la superficie cultivée en blé dur couvre en moyenne 22 496 ha, dans lesquels le blé dur est généralement cultivé en rotation avec des légumineuses ou en jachère (MADR., 2022 ; Latati et al., 2019 ; Kherif et al., 2021).

Le potassium est le cation le plus abondant dans les plantes (Dhillon et al., 2019). Dans le sol, le potassium se trouve sous quatre formes : échangeable, constitutive, rétrograde et soluble (Kaur., 2019). Les formes échangeables et solubles constituent le compartiment disponible pour les plantes. La capacité du sol à fournir du potassium dépend de sa teneur totale en potassium et des caractéristiques de libération des différentes formes, qui sont influencées par les propriétés physico-chimiques du sol (Wani et al., 2014). Son absorption par la plante diminue avec la baisse de la teneur en eau du sol (Akhtar et al., 2022). En effet, il a de multiples fonctions qui affectent le fonctionnement physiologique des plantes, notamment l'amélioration de la qualité des plantes, le processus de photosynthèse, la régulation osmotique, l'activité enzymatique, la stimulation et le transport des assimilats, la synthèse des protéines et la tolérance au stress (Hartati et ., 2018 ; Wihardjaka et al., 2022). Les engrais azotés et phosphatés sont les principaux engrais utilisés dans la production de blé, tandis que les engrais potassiques sont rarement appliqués (Gu et al., 2021), et leur carence réduit le rendement qualitatif et quantitatif des cultures de blé (Malakouti et al., 2019). En outre, en l'absence d'une fertilisation potassique adéquate, une importante carence en K se produit dans le sol (Wani et al., 2014).

Halillat (2004) et Belaid (2017) ont montré que la fertilisation potassique a un effet favorable sur le comportement agronomique, notamment sur certaines caractéristiques du blé dur telles que le rendement et le poids de mille grains.

Malgré l'importance du rôle du potassium dans la formation du rendement, la pratique de la fertilisation potassique sur la culture du blé reste très limitée en Algérie (Daoud et al., 1985). L'objectif principal de la présente étude est d'identifier la dose optimale d'engrais potassique susceptible de stabiliser et d'améliorer la croissance et les composantes du rendement du blé dur, en particulier dans le cadre d'une gestion biologique de la culture sous un climat subhumide. Nous émettons l'hypothèse qu'une application faible ou modérée du potassium maintiendra simultanément le rendement et l'acquisition du potassium par le blé dur.

Les objectifs spécifiques de cette étude étaient :

- (i) d'évaluer l'influence de différents taux d'application d'engrais K sur le rendement du blé,
 - (ii) de comprendre la réaction de la culture à la variation de l'utilisation de K sur les traits morphologiques avec différents taux d'engrais potassique,
 - (iii) de déterminer l'influence des taux de potassium sur la qualité du grain du blé.
- L'expérience sur le terrain a été menée dans les mêmes conditions de gestion des cultures et

des sols que celles couramment pratiquées par les agriculteurs locaux dans des conditions de culture pluviale.

Ce manuscrit débute par une introduction générale qui présente les défis généraux de la production du blé dur en Algérie et l'importance des engrais potassique pour l'amélioration quantitative et qualitative du blé et le but de ce travail de recherche sur l'effet de K sur la culture du blé dur, puis une synthèse bibliographique composée d'un seul chapitre :

Le premier chapitre porte sur des généralités sur le blé dur, son importance comme culture, et l'importance de la pratique de la fumure dans la formation du rendement, en particulier la fumure potassique. Le deuxième chapitre porte sur l'approche expérimentale. Les résultats et la discussion feront l'objet du troisième chapitre.

Le document est clôturé par une conclusion.

CHAPITRE I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. CLASSIFICATION, ORIGINE ET GEOGRAPHIE DU BLE

1.1. Classification taxonomique du blé dur

Embranchement: Spermaphytes ; **Sous embranchement :** Angiospermes ; **Classe :** Monocotylédone ; **Ordre :** Poales ; **Famille :** Poaceae ; **Sous famille :** Festucoideae ; **Genre :** Triticum ; **Espèce :** Triticum durum Desf (Feillet P., 2000).

Le blé est un groupe de plantes qui appartient à la famille des Poacées, de genre Triticum, qui est un genre très fréquent dans la nature, cette famille végétale comprend environ 2500 espèces réparties sur la quasi-totalité de la surface du continent (Mosiniak et al., 2005). Des milliers d'années plus tard, il reste la première plante cultivée au monde. La superficie plantée sur tous les continents se mesure en millions d'hectares et les rendements en millions de tonnes.



Figure 1. Champ de blé dur – Adobe stock février 2021

1.2. Structure de grain de blé

Le grain de blé (ou caryopse de blé) est entouré de deux enveloppes continues : le péricarpe (paroi ovarienne) et le tégument de la graine (paroi de l'ovule). Il abrite l'embryon et le tissu végétatif, l'albumen (Mosiniak et al., 2005).

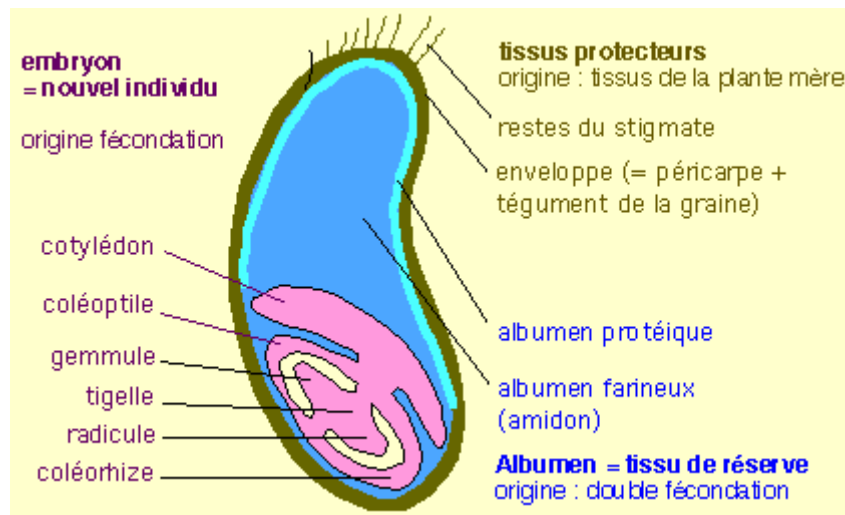


Figure 2. Schéma d'une coupe d'un grain de blé (Mosiniak et al., 2005).

1.3. Les stades phénologiques de blé

Au cours de la période de croissance et du développement, le blé dur passe par plusieurs stades végétatifs, au cours desquelles la plante développe de nouveaux organes d'un stade à l'autre.

Le cycle évolutif du blé se divise en trois périodes (Belagrouz., 2021), chacune comporte des phases caractérisées par des stades repères, les périodes de croissance de blé sont:

- Période végétative : On distingue trois phases :
 - La germination : cette période correspond à la mise en place de la surface foliaire de la culture, elle est sous la dépendance étroite de la température et de la photopériode, elle correspond à la mise en place de l'appareil foliaire (feuilles talles) (Abdelliche et Ferkhi., 2018).
 - Phase germination –levée : cette phase est sensible aux excès d'eau en zones littorales et sublittoral et au gel en zones des hautes plaines.
 - Phase Tallage: le tallage est favorisé par les baisses des températures et les jours courts, et la formation des premiers talles se fait au stade de 3 feuilles (Ait Slimane., 2008). Le tallage chez le blé s'arrête à l'épiaison.

- Période reproductrice : cette période se caractérise par :
 - La phase montaison-floraison : cette période correspond au plein développement des talles. Elle marque chez le blé le passage de la phase végétative vers la phase reproductrice (Belagrouz., 2021). Elle est sous le contrôle de la photopériode et de la température.
 - La phase épisaison : l'épi sort de la dernière feuille, la floraison et la pollinisation peuvent avoir lieu quelques jours après (Tayebet Rebai., 2014). La floraison chez le blé aura lieu quand le jour s'allonge et les nuits se raccourcissent, et le nombre définitif ou réel de grain /épi est fixé durant cette période (Hamadache., 2013).
- Période remplissage et maturité du grain : le remplissage du grain, après la floraison, se fait de deux façons (Hamadache., 2013) :
 - Par la migration d'une partie des réserves de la tige.
 - Par la photosynthèse des parties de plante encore verte (feuilles, épis, barbes).

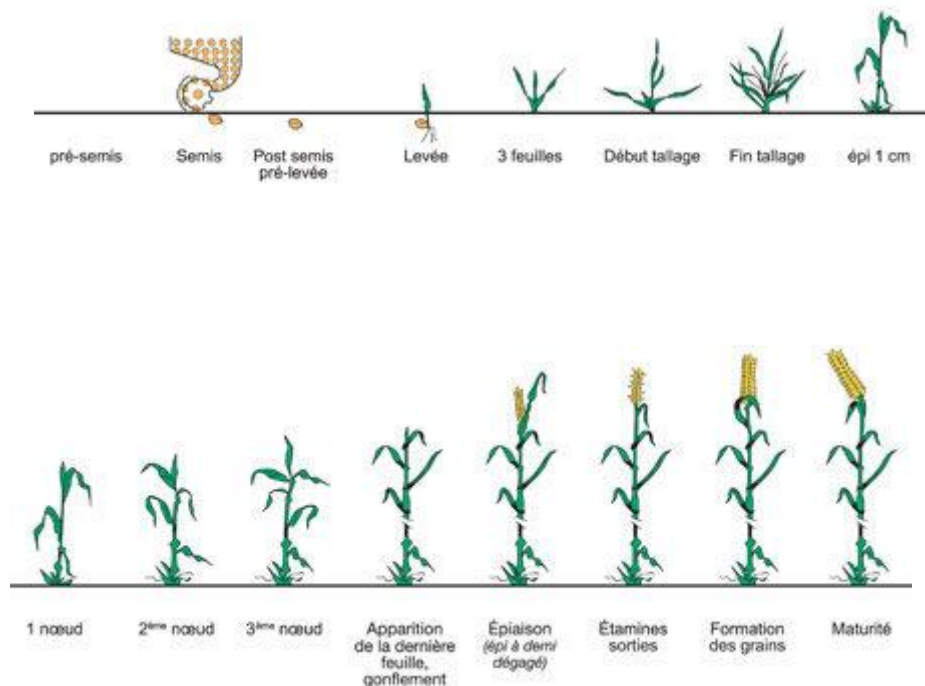


Figure 3. Les stades phénologiques de blé s, par l'échelle BBCH, Source site (Syngenta.,2015).

1.4. Origine génétique de blé

Il existe actuellement trois types de blés produits dans le monde : blé tendre (*Triticum aestivum*), blé dur (*Triticum turgidum*) et épeautre (*Triticum monococcum*), et les caryotypes de ces trois espèces de blé sont constitués respectivement de 42, 28 et 14, et aussi les diverses variétés de blé sauvage que l'on trouve encore dans certaines parties du monde possèdent 14 chromosomes ; Ainsi, le caryotype du blé représente une lignée avec des nombres de chromosomes multiples de 7, indiquant que le blé tendre et le blé dur sont respectivement polypléides, hexaploïdes et tétraploïdes chromosomes (Doussinault et al., 2001). Selon les mêmes auteurs, diverses études sur l'histoire du blé ont montré que le blé dur est le résultat d'un croisement entre deux espèces de blé sauvage contenant des monocoques sauvages, et que le blé tendre est le résultat d'un croisement entre le blé dur et une autre espèce de blé sauvage. Ces croisements et le doublement subséquent du nombre de chromosomes sont à l'origine du blé polypléide.

1.5. L'origine géographique de blé dur

Selon la figure 4, la distribution approximative des formes sauvages d'amidonniér (*T. turgidum* spp dicoccoïdes) et d'*Aegilops tauschii* est représentée par des points, et la distribution de l'engrain est représentée par des zones jaunes. Les zones encadrées correspondent aux origines probables des formes cultivées d'amidonniér, de blé dur, d'engrain et de blé tendre. (Tiré par Dubcovsky and Dvorak., 2007 et Cité par Bonnot., 2016).

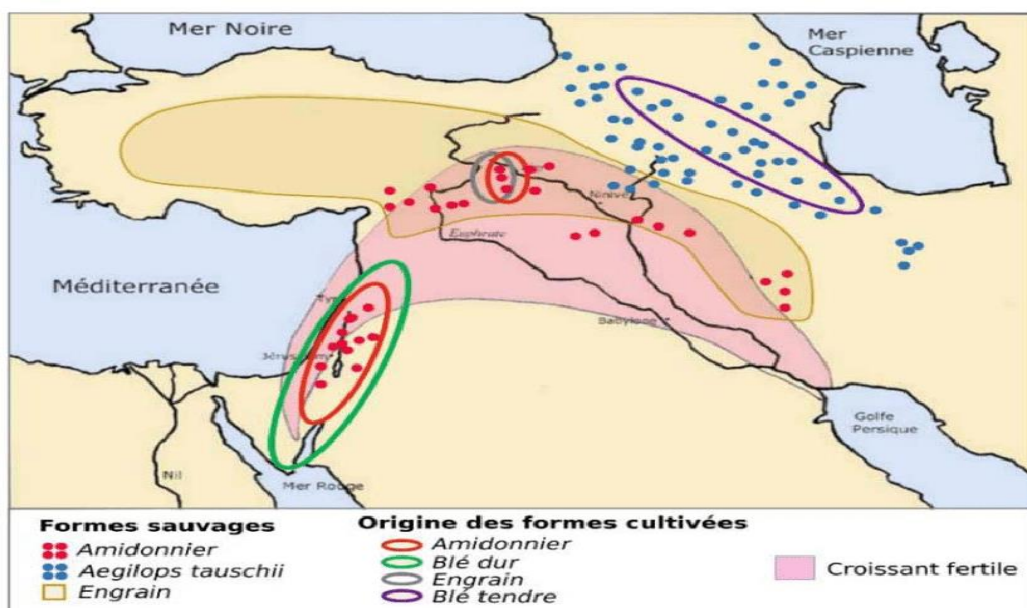


Figure 4. L'origine géographique des blés cultivés par (Dubcovsky and Dvorak (2007).

1.6. La distribution géographique de blé dans le monde

En effet on rencontre actuellement la culture du blé dans les régions au climat de type méditerranéen comme l'Afrique du nord (Maroc, Algérie, Tunisie, Egypte), le sud de l'Europe (Espagne, France, Italie, Grèce), le Moyen Orient (Turquie, Syrie, Palestine), les plaines intérieures des USA, le Canada, le nord du Mexique, la Russie, Ukraine, le Kazakhstan, l'Australie, l'Inde, la chine et l'Argentine (Elias et Manthey, 2005 ; Ammar, 2015, cité par Rabti., 2021).

2. LE BLE DANS LE MONDE

Le rapport mensuel de l'USDA (département États-Unis de l'agriculture) du 12 mai prévoit que la production mondiale de blé atteindra 774,83 millions de tonnes en 2022/2023, contre 779,29 millions de tonnes en 2021/2022. Cela s'explique principalement par le fait que la production ukrainienne a été considérablement révisée à la baisse et devrait atteindre 21,5 millions de tonnes contre 33,01 millions de tonnes en 2021/2022. Par conséquent, une baisse de la production est attendue non seulement en Ukraine, mais également en Australie, dans l'UE et au Maroc. Toutefois, ces baisses de rendement ont été contrebalancées par des hausses au Canada, en Russie et aux États-Unis. Les stocks mondiaux en 2022/2023 ont diminué par rapport à 2021/2022, passant de 279,72 millions de tonnes à 267,02 millions de tonnes.

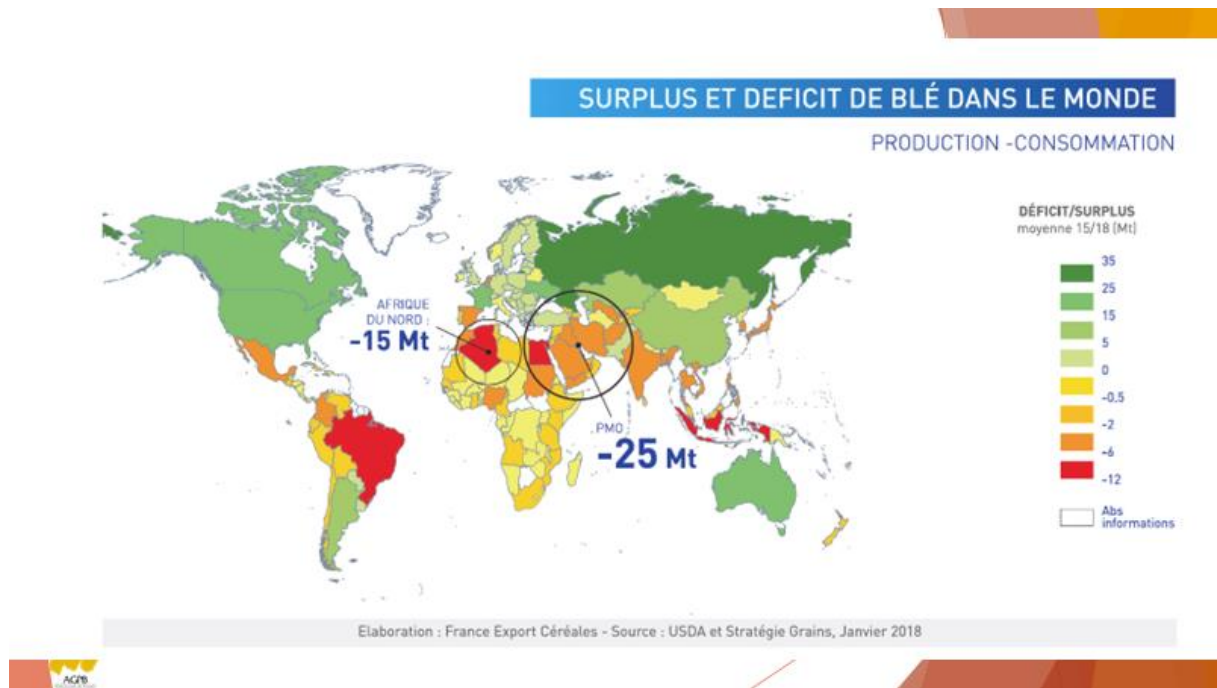


Figure 5. Surplus et déficit de blé dans le monde. Source USDA et stratégie grains, (janvier.,2018).

Selon le rapport de la FAO en 2022, Les dix principaux pays producteurs de blé au cours des années de commercialisation 2018/2019 à 2022/2023, en milliers de tonnes sont :

- La Chine : Le plus grand producteur de blé au monde La Chine, produisant plus de 130 millions de tonnes de blé chaque année. .
- L'Inde : L'Inde est le deuxième plus grand producteur de blé avec environ 100 millions de tonnes de blé pour une superficie de 29,5 millions d'hectares sont alloués à la culture du blé.
- La Russie 72 millions de tonnes de blé par an. Selon les estimations, 26,5 millions d'hectares sont alloués à la culture de blé en Russie. Néanmoins, le rendement est faible seulement de 2,7 tonnes de blé par hectare.
- Les Etats-Unis : La production américaine de blé est de 51 millions de tonnes pour 16 millions d'hectares qui sont alloués à la culture du blé.
- La France est le premier producteur européen de blé. Avec environ 36 millions de tonnes produites, et c'est l'un des plus grands producteurs mondiaux de blé. En France, la surface cultivée en blé est estimée à 5,2 millions d'hectares pour un rendement moyen de 6,8 tonnes du blé par hectare. .
- Le Canada : Au Canada, environ 31,8 millions de tonnes du blé qui sont récoltés sur près de dix millions d'hectares. Le rendement en blé par hectare est de 3,2 tonnes
- Le Pakistan récolte 25 millions de tonnes de blé par an. Cependant, ce volume de production n'est pas suffisant pour le marché intérieur. .
- L'Ukraine : ce pays produit un peu moins de 25 millions de tonnes de blé chaque année. En ce pays 6,6 millions d'hectares sont dédiés à la culture du blé pour un rendement moyen de 3,7 tonnes par hectare.
- L'Allemagne : Ce pays produit 22 millions de tonnes par an. Le rendement du blé est d'un peu moins de 6,7 tonnes par hectare. Actuellement, la superficie agricole totale en Allemagne est d'environ 17 millions d'hectares.
- L'Australie : L'Australie récolte en moyenne 21 millions de tonnes du blé chaque année. Le blé australien est cultivé sur environ 11 millions d'hectares. Les rendements sont très faibles, seulement 1,9 tonne par hectare.

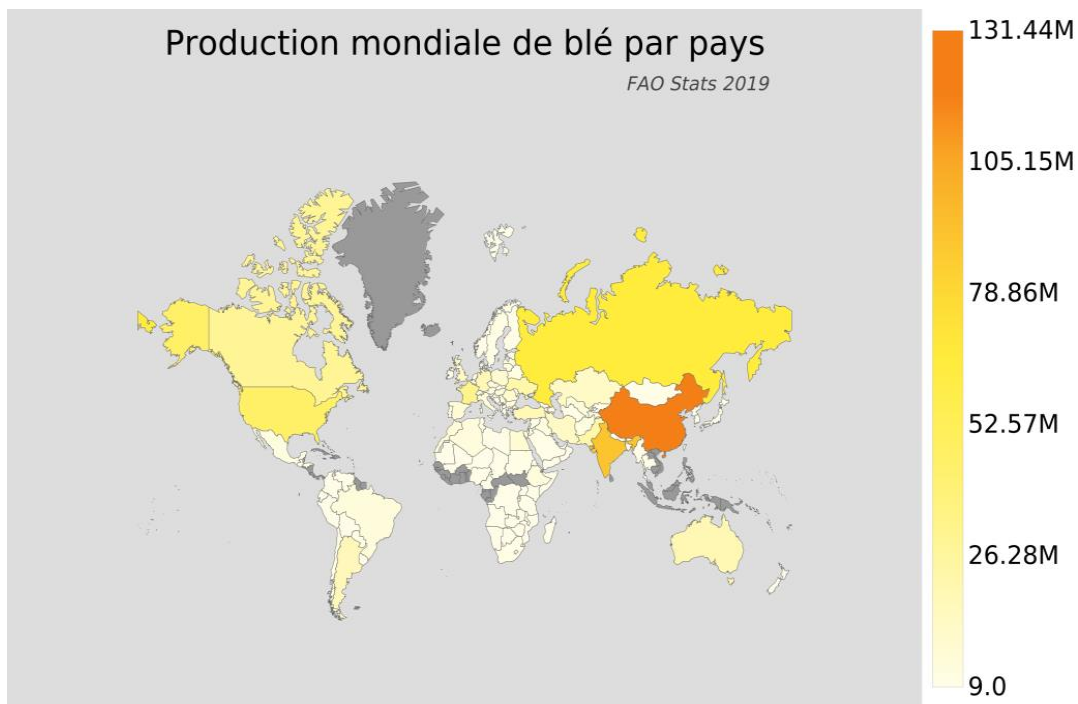


Figure 6. Production de blé par pays (FAO stats., 2019).

3. PRODUCTION DU BLE EN ALGERIE

En Algérie, le blé dur (*Triticum turgidum* L. var. durum) est cultivé dans les trois zones les plus favorables : la zone côtière (600 mm), les plaines intérieures (450 à 600 mm) et le nord des hauts plateaux (350 à 450 mm) : il est cultivé en culture pluviale et est conditionné par les aléas climatiques, dont le déficit hydrique et les températures élevées en fin de cycle sont les plus prépondérants (Amokrane et al., 2002 ; Mekhlouf et al., 2006, Cités par Laala., 2018).

Selon les données de l'USDA d'Index mundi sur la production annuelle estimée du blé pour chaque pays en 2022, l'Algérie figure parmi les 20 premiers producteurs du blé avec une production annuelle du blé estimée à 3,7 millions de tonnes en 2022.

3.1. Production de blé dans la zone subhumide d'Algérie

Une zone subhumide est une zone caractérisée par des étés secs et chauds et par des hivers doux et humides. Dans ces zones, les céréaliculteurs peuvent choisir le blé précoce. En raison du changement climatique, le blé doit supporter une chaleur extrême, la sécheresse et le gel. En plus des maladies comme : la fusariose, les rouilles, le blé des zones semi-humides doit être résistant également aux ravageurs qui pondent des larves sur les épis (Arvalis, 2017).

Dans la zone littorale subhumide, c'est-à-dire en dessous de 300 mètres d'altitude et avec des précipitations annuelles supérieures à 600 mm, la culture du blé présente encore quelques inconvénients techniques, en effet, malgré le potentiel naturel offert par le milieu physique (précipitations adéquates, sols fertiles, absence d'accidents climatiques majeurs), le potentiel génétique des variétés actuellement cultivées dans la région atteint seulement 30 ~40% (Hamadache et al., 2022). Selon les mêmes auteurs, les rendements moyens de ces cultivars dans les cinq Wilaya de la côte centrale varient de 14 à 21 q ha⁻¹, et avec les rendements les plus élevés de 40 à 50 q ha⁻¹ quand les itinéraires techniques sont préconisés. "

Les facteurs des principaux itinéraires qui assurent en zone littorale une productivité élevée ; soit en moyenne 30 à 50 q ha⁻¹ sont : le bon choix des variétés du blé qui s'adaptent à ce climat, le meilleur choix de date de semis, et la préparation correcte du lit de semences, le semis en lignes, le désherbage chimique, la fertilisation raisonnée et la lutte contre les maladies fongiques et les ravageurs, et l'irrigation d'appoint en période de déficit hydrique, en particulier à certains stades critiques de développement de blé.

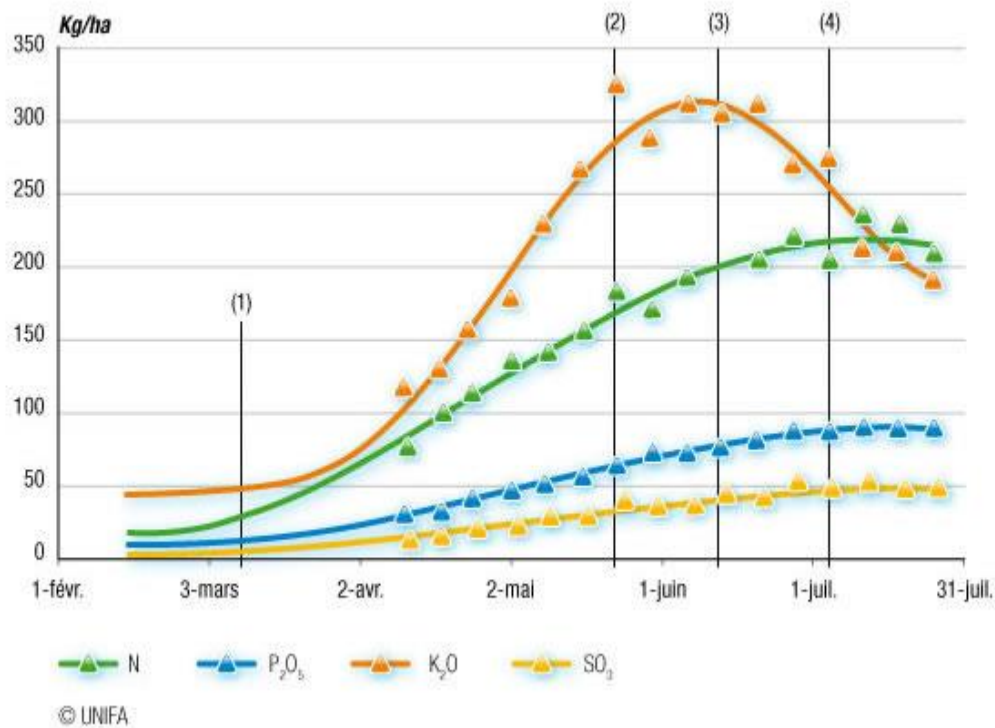
4. EXIGENCE DU BLE EN ELEMENTS MINERAUX ESSENTIELS

Un apport équilibré en azote, phosphore, potassium et oligo-éléments est une condition préalable à une bonne qualité et à un bon rendement des plantes, pour cela l'application d'engrais dans l'agriculture moderne est liée aux exigences d'une nutrition adéquate des différentes cultures et variétés (Panayotova et al., 2014).

Sur les sols algériens, la fertilisation actuelle reste l'un des moyens les plus efficaces pour améliorer le rendement et la qualité en matière de production de blé dur. Pour cette raison, il est important de bien gérer et justifier la contribution des engrais minéraux à l'augmentation

de rendement des cultures dans des conditions de stress environnementales (Abdelliche et Ferghi., 2018).

Les besoins du blé dur en éléments fertilisants majeurs se varient en fonction du stade de croissance de la plante (Figure 7).



1) épi 1cm (2) épiaison (3) floraison (4) grain laiteux

Figure 7. Les besoins de blé en éléments fertilisants au cours de différents stades de croissance Source : Centre de recherches d'Aspach, Ministère de l'agriculture (Site Unifa).

4.1. Exigence en Azote

L'une des principales raisons de la limitation du rendement et de la qualité des grains est le manque de connaissances dans la pratique de la fertilisation azotée (N) (Boulelouah et al., 2022).

L'azote est un élément indispensable à la croissance du blé pour la synthèse de protéines végétales, des enzymes et de la chlorophylle (Hamadache., 2013). En effet, c'est le pivot de la production de biomasse, du rendement et de la qualité des produits récoltés, et La meilleure façon d'appliquer la fumure azotée est la technique fractionnée, c'est-à-dire diviser les besoins de toute la culture dans les étapes clés de croissance telles que: la levée, le tallage et le début floraison (Nedjah., 2015).

4.2. Exigence en phosphore

Le blé est connu pour sa réponse positive à la fertilisation phosphatée en sols à faible teneur en phosphore assimilable (Hamadache., 2013). Le phosphore est une composante importante parmi les trois éléments majeurs (N, P, K) apportés par les engrais. Ceci est important pour la croissance des plantes de blé, favorisant le développement des racines, le tallage et la floraison précoce, et l'accélération de la maturité des grains, il complète également d'autres fonctions telles que l'activité métabolique, en particulier la synthèse des protéines (Tanwar et Shaktawat, 2003 ; d'après Boukhalfa., 2016).

4.3. Exigence en potassium

Le potassium (K) est un élément nutritif essentiel pour la croissance des plantes est prélevé dans la solution du sol par les racines des plantes sous la forme d'ions potassium (K+) (Awaad et al., 2016).

Le blé est considéré comme culture peu exigeante en potassium, et le maximum d'absorption par le blé pluvial de cet élément se fait au stade « l'épiaison-floraison », et la carence en ce dernier à des effets négatifs sur le rendement et la qualité du blé (Pettigrew., 2008).

5. LES COMPOSANTES DU RENDEMENT DU BLE

Chez le blé, les programmes d'amélioration variétale ciblent principalement pour l'augmentation de potentiel de rendement. Le blé dur d'hiver est semé dès la fin septembre à fin novembre et récolté de début juillet à mi-août. Le schéma de la figure 8 montre différentes étapes du développement de la culture au cours desquelles se développent des éléments de rendement successifs : Peuplements mis en place (nombre de plantes par unité de surface), nombre de tiges, puis d'épis par plante (nombre de épis par unité de surface) et en même temps le nombre de grains par épis (et donc par unité de surface nombre de grains produits par an).), Et enfin, le poids moyen de grain depuis la floraison (donc le poids de grain produit par unité de surface est égal au rendement).

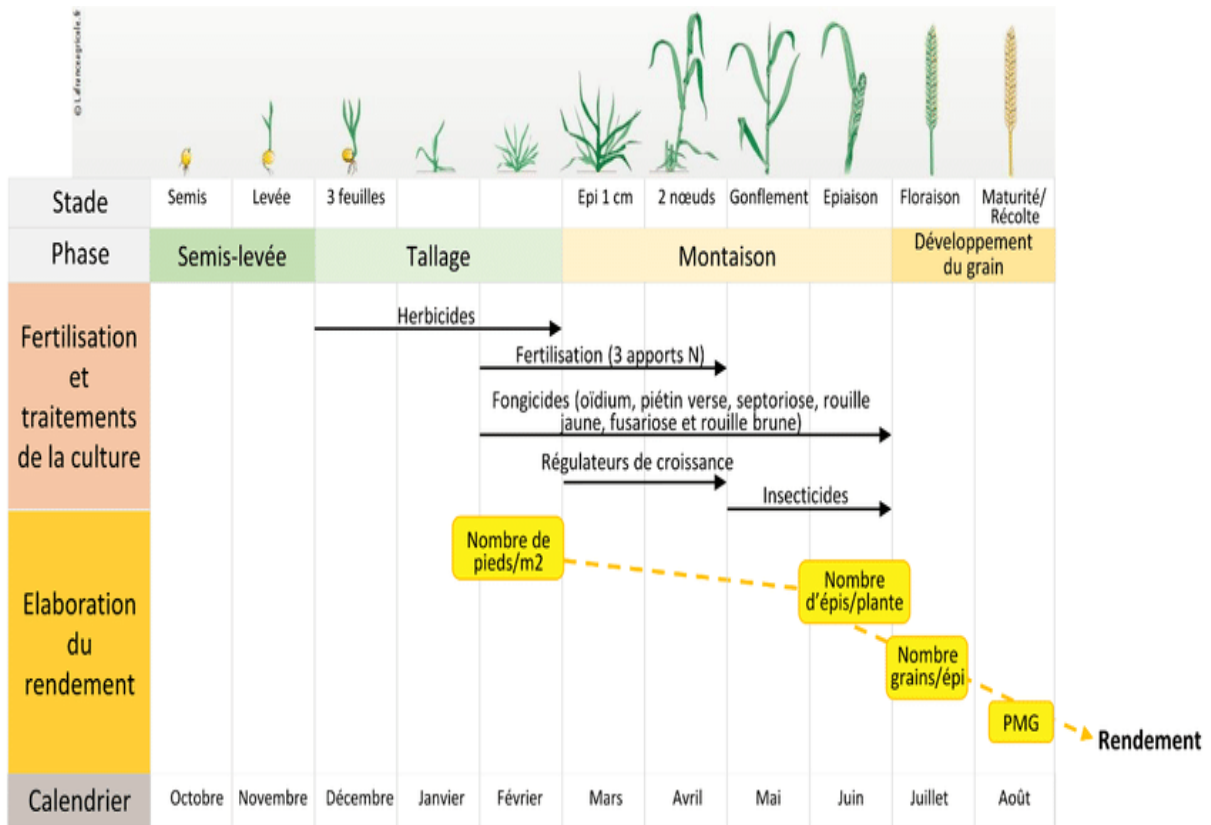


Figure 8. Schéma simplifié des stades et phases de développement de blé tendre d'hiver : période de formation des composantes du rendement et l'élaboration du rendement (D'après Arvalis, Institut du végétal, 2016).

5.1. Nombre de plantes /m²

La densité des plantes est composée de la densité des graines, de la capacité de germination du lot de graines, du taux de germination effectif et de la perte hivernale.

La levée des plantes est le résultat de l'interaction entre les facteurs climatiques (pluviométrie et température), le sol (état du lit de semences), les conditions de semis (date, dose, profondeur, etc.) et la qualité des semis (Hamadache., 2013).

5.2. Nombre des épis/ plante

Ce paramètre est déterminé après la régression des talles, il s'établit en 2 phases : Une phase hivernale où des talles sont émises (période de tallage), très souvent en excès, et une phase printanière où les talles les plus jeunes régressent (montaison) (D'après Arvalis., 2022).

Cette composante de rendement dépend de plusieurs facteurs : la variété, de la profondeur de semis, du peuplement à la levée, de la nutrition azotée et phosphatée durant le tallage, par les conditions de températures (Hamadache., 2013).

5.3. Nombre des grains / épi

Ce paramètre est l'un des composants essentiels et limitant de rendement. Le potassium affecte le nombre de grains par épi, cette étude de la Potash Développement Association montre une corrélation claire entre l'apport en potassium et le nombre de grains par épi, ou un manque de potassium empêche le développement d'un certain nombre d'inflorescences potentielles, entraînant l'apparition d'épillets vides et un nombre réduit de grains.

L'azote influe également sur le nombre de grains, sur chaque épi, ce paramètre diminue si la quantité d'azote est limitante. Le moment de l'apport d'azote est important, car le nombre de grains est déterminé tôt, entre le stade épiaison et le début de la floraison et il est conditionné par les facteurs climatiques.

5.4. Poids de mille grains (PMG)

Le PMG dépend de la variété et des conditions de nutrition hydrique et minérale en fin de Cycle, il est directement corrélé à la taille du grain, et il varie entre 35 et 55 g selon les variétés (± 5 g selon l'année), tandis que les facteurs défavorables : échaudage de fin de cycle et manque d'eau pendant la phase de remplissage du grain (surtout avant « grain laiteux ») diminue de façon significative le poids de mille grains lors de la moisson (Site BASF., 2022). Ce paramètre est corrélé positivement et significativement avec la fertilisation potassique raisonnée (Halilat., 2004).

6. LES PROTEINES DU BLE DUR

La protéine de blé représente 8 à 18 % de la matière sèche du blé. Cette teneur est déterminée par les conditions agro climatiques de développement de la plante, notamment apport en eau et fertilisation azotée, et du cultivar (Feuillet., 2000). Il est la base de la qualité technique des produits de première transformation (semoule et farine du blé dur et du blé tendre) et contribue aux propriétés culinaires des produits de seconde transformation (pâtes, couscous, pain...), et on cite que les producteurs et les exportateurs de blé utilisent des paramètres

quantitatifs et qualitatifs de protéines dans des balances pour déterminer le barème commercial (Abdellaoui., 2007).

Les protéines des blés sont divisées en deux types (Salmi et Merbah., 2015) :

- Les protéines de structure et de fonction (environ 20% de protéines totales), sont constituées des albumines et des globulines.
- Les protéines de réserve (80%), sont appelées prolamine ou gluten, sont riche en résidus proline et glutamine

Elles sont synthétisées et accumulées dans l'amande au cours du développement de la graine pour sa germination éventuelle (Benmoussa., 1999).

7. LE POTASSIUM

Le potassium est le seul cation monovalent essentiel pour toutes les plantes supérieures, il représente le principal inorganique des cellules végétales (Bould., 1975). Cet élément est un macronutriment, qui joue un rôle important dans la croissance et le développement des plantes, il est le troisième nutriment végétal le plus important dont les plantes ont besoin en plus grande quantité (Wakeel et al., 2011) ,comme dans l'expansion cellulaire, le maintien de la pression de turgescence, l'osmorégulation, la régulation des mouvements stomatiques, et fonctionne également comme facteur d'activation pour plusieurs enzymes, il participe également à différentes fonctions physiologiques et processus biochimiques chez les plantes telles que la synthèse des protéines, le métabolisme des glucides (Hawkesford et al ., 2012 ; cité par Ramin et al., 2022).

La disponibilité de K dans le sol varie selon le taux d'humidité des sols (les conditions climatiques), les types de sol, les propriétés physiques (le type et la quantité d'argile et de matière organique), ce dernier est influencé par la nature du matériau parental, le degré d'altération, l'érosion, l'enlèvement des récoltes, l'ajout de fumier et d'engrais et le lessivage (Xiaoyan et al., 2021).

Les sols qui disposaient initialement de réserves suffisantes de K peuvent rapidement devenir déficients en K sous l'effet de la production agricole (Damon et Rengel., 2007).

7.1. L'origine de potassium

Le potassium n'existe pas à l'état natif naturellement; il se retrouve le plus abondamment à l'état de sels dissous ou dans la structure de minéraux peu solubles (feldspaths et micas), cet élément se trouve sous trois formes isotopiques naturelles, 39K (93,2581%), 40K (0,0117%) et 41K (6,7302%) (Mélanie., 2014).

La teneur moyenne en K_2O de la croûte terrestre est estimée à 3,2 %, et les minéraux silicatés (feldspath potassique, mica, argile, etc.) sont les plus importants éléments qui constituent la source de potassium (K), et c'est principalement les minéraux argileux qui occupent le réservoir principal et piège de cet élément (Mehiri., 2002).

La problématique des ressources potassiques réside dans leur répartition sur la surface terrestre dans le monde et aussi la capacité d'extraction, et la demande mondiale n'a cessé de croître depuis les années 1960 (<http://www.fao.org>).

Le Canada est le premier producteur mondial de potasse (figure 9). En 2015, 70% des ressources sont réparties entre le Canada, la Biélorussie, la Russie, l'Allemagne et les Etats-Unis, et les pays ayant les plus faibles productions de potasse sont : Brésil, L'Espagne, Le Royaume-Uni et Chili (Martineau., 2016).

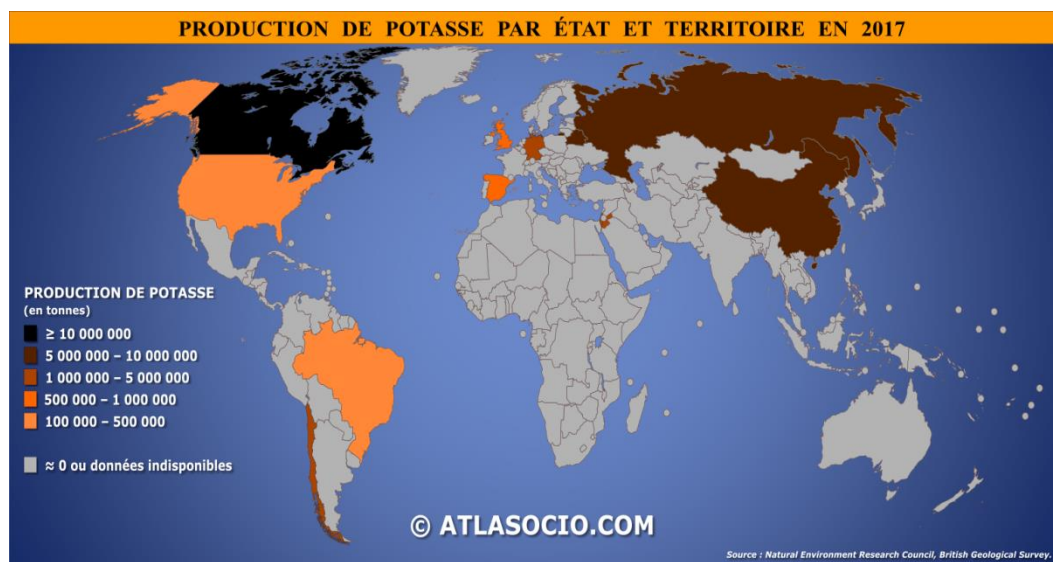


Figure 9. Carte du monde : production de la potasse par État en (2017) (Source :Atlasocio.com).

Carte du monde montrant la production de potasse en tonnes (t) en 2017 par Etat. La potasse fait référence à certains minerais de sel qui contiennent du potassium hydrosoluble et ils sont principalement utilisés comme engrais agricoles (90 % de la production mondiale).

7.2. Les formes de potassium dans le sol

Le K est disponible sous forme de cation monovalent K^+ (figure 10) dans la solution du sol. Il est présent dans le sol sous plusieurs formes, telles que (Moiloud et al., 2017):

- Le K structurel ou minéral,
- K non échangeable ou lentement échangeable (K fixe)
- K échangeable
- l'ion K^+ dissous dans la solution du sol

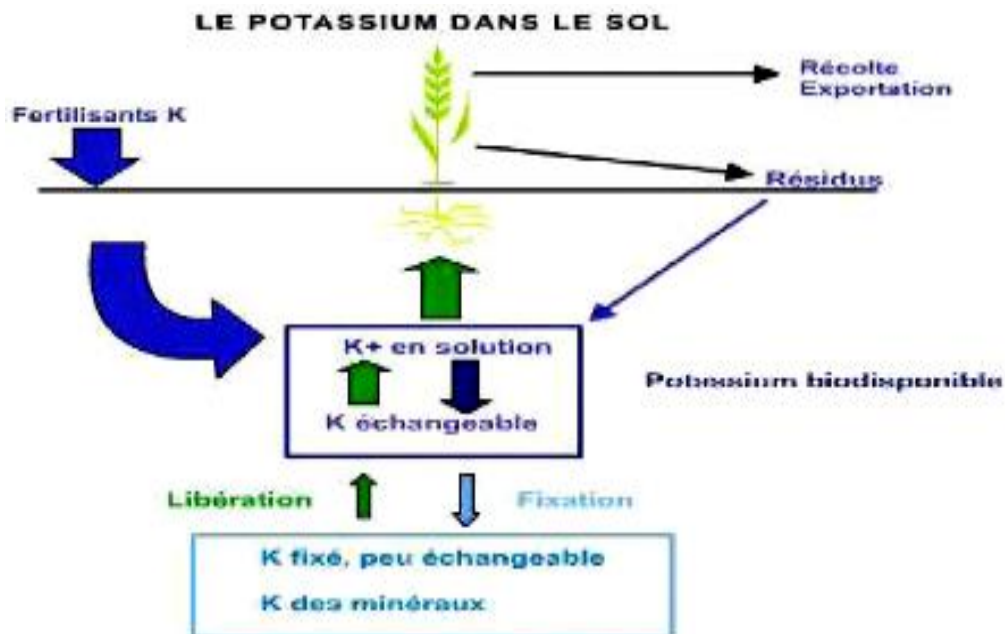


Figure 10. Les compartiments du potassium dans le sol.

7.3. Dynamique du K dans les sols

La dynamique de K est régie par l'ensemble des processus qui commandent le passage du potassium d'un compartiment à un autre (dissolution, altération, échange, fixation) ou d'un horizon à un autre (lixiviation, remontée capillaire) et l'absorption racinaire (Mehiri., 2002).

C'est le bilan de tous ces processus qui détermine le statut du potassium dans le sol à un moment donné. Les concentrations de K⁺ dans la solution du sol ($[K^+]_o$) soient de l'ordre de seulement 0,1 à 6 mM (Adams., 1971 ; Cité par Asheley et al., 2006).

7.4. Rôle de potassium dans la plante

Le K est un nutriment essentiel pour les plantes, qui intervient dans un certain nombre de processus physiologiques et biochimiques, y compris ceux qui interviennent dans la résistance aux stress biotiques et abiotiques (Wang et al. 2013). Il est très mobile dans la plante et joue un rôle majeur dans plusieurs processus (Hasanuzzaman., 2013):

- Régulation de la pression de l'eau (turgescence) dans les cellules végétales, essentielle dans l'étirement des cellules, la respiration (ouverture et fermeture des stomates) l'absorption de l'eau et l'orientation des feuilles vers la lumière (Wang and al., 2013).
- Activation des enzymes.
- Développement et transport de composés organiques dans la plante tels que les sucres, les acides aminés et l'amidon.
- Équilibrage de la charge électrique dans les différentes parties de la cellule végétale.
- La signalisation cellulaire et la réponse des plantes au stress dû à la sécheresse, au stress dû au froid, au stress salin ainsi qu'aux stress biotiques (Oosterhuis et al., 2013).

7.5. Effet de la carence en potassium sur les plantes

La concentration de K dans les plantes est souvent en dessous de 2.5-3.5% (Loue., 1968). Les symptômes de carence se manifestent par une nécrose qui touche d'abord les feuilles les plus âgées. Elle apparaît de l'extérieur vers l'intérieur (figure 11).

Une carence en potassium en tant que stress abiotique courant peut inhiber la croissance des plantes et ainsi réduire les rendements agricoles par de nombreux impacts négatifs sur les plantes, tels que : inhibition de la croissance en raison d'une pression osmotique inappropriée ; déséquilibre nutritionnel dû à l'arrêt de la photosynthèse et de la synthèse des protéines; diminution de la résistance aux agents pathogènes (Ruan et al., 2015).

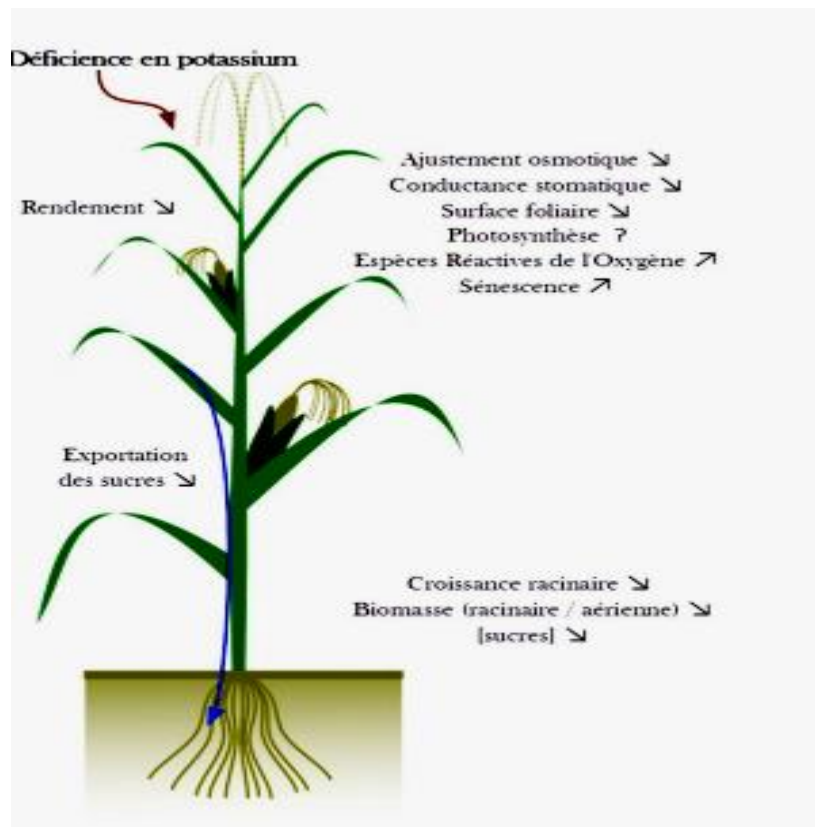


Figure 11. Schéma récapitulatif de la réponse des plantes lors d'une déficience en potassium (Martineau., 2016).

Le changement de la morphologie des racines est l'une des réponses vitales des plantes de blé à l'efficacité du K^+ , se manifestant généralement par un retard de croissance des racines, cependant, l'impact varie selon les génotypes, le degré et la durée de la carence et les conditions de culture (Hermans et al., 2006 ; Jordan-Meille et al., 2018 ; cités par Thornburg et al., 2020).

8. ENGRAIS POTASSIQUE

Les engrais étant des substances destinées à fournir à la plante les éléments nutritifs nécessaires, ils sont principalement composés des éléments dont la plante a le plus besoin, c'est-à-dire l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K) (Gherairia et Zardoudi., 2018). Suite à l'augmentation des prix de fertilisants, particulièrement celui du K, l'optimisation de la fertilisation potassique devient d'une importance cruciale (Nechi., 2016).

Il est bien connu que l'engrais K joue un rôle crucial dans la formation de la production végétale et dans sa qualité, en conséquence, la consommation de potasse a fortement augmentée dans la plupart des régions du monde (Pettigrew., 2008). Une forte relation positive entre l'apport d'engrais K et le rendement en grain a été démontrée (Mirza et al., 2018). Il est largement rapporté que l'engrais K diminue l'infestation par les insectes et l'incidence des maladies chez de nombreuses plantes hôtes (Wang et al., 2013).

Dans les sols déficients en cet élément important. La majeure partie de l'engrais potassique provient d'anciens gisements de sel de potassium dans le monde (IPI., 2013), le sel est traité pour éliminer les impuretés et transformé en divers engrais minéraux.

Le mot « potasse » est un terme générique qui fait référence au chlorure de potassium (acide muriatique). Cependant, cela s'applique également à tous les autres engrais contenant du potassium, tels que le sulfate de potassium (K_2SO_4) communément appelé sulfate de potasse ou SOP.

8.1. La production des différentes formes de l'engrais potassique

8.1.1. Chlorure de potassium

Le chlorure de potassium (KCl) le plus couramment utilisé est également appelé potasse ou MOP (le muriate est un ancien nom pour les sels contenant du chlorure). Cet engrais obtenu par des procédés physiques est un sel pratiquement pur dosant environ 60% d'oxyde de potassium. Il se présente sous deux formes (Unifa., 2013) :

Obtenu par un procédé physique, cet engrais est un sel pratiquement pur contenant environ 60 % d'oxyde de potassium. Il existe deux formats :

- Le chlorure "Perlé " contenant 61% d'oxyde de potassium est transformé en petites billes sphériques d'un diamètre de 0,5 à 1,5 mm
- Le chlorure "granulaire" contient 60% d'oxyde de potassium en morceaux de 1-5 mm obtenus par compactage sous haute pression.

Le chlorure de potassium convient à tous les sols et à la plupart des cultures sauf les cultures sensibles au chlorure telles que : la pomme de terre, la laitue et certains légumes et fruits. Il est recommandé d'enterrer les plantes deux semaines avant le semis, en évitant le contact direct avec les graines et les jeunes plants.

8.1.2. Sulfate de potassium

Le sulfate de potassium est un engrais contient de la potasse et en faible teneur en chlore, qui peut être utilisé sur les cultures exigeante de la potasse mais sensibles au chlore. Cet engrais est utilisé pour l'agriculture biologique. Le sulfate de potassium est particulièrement adapté aux plantes qui ont besoin de soufre également, il a un effet positif sur le rendement et la qualité des plantes cultivées. Cependant, K_2SO_4 est rarement trouvé dans la nature sous une forme pure. Par contre, il est naturellement mélangé avec des sels contenant Mg, Na et du Cl, et ces minéraux nécessitent un traitement supplémentaire pour séparer leurs composants (figure 11). Historiquement, K_2SO_4 a été préparé en faisant réagir de l'acide sulfurique avec du KCl, actuellement c'est la méthode la plus commune de production (IPNI., 2015).

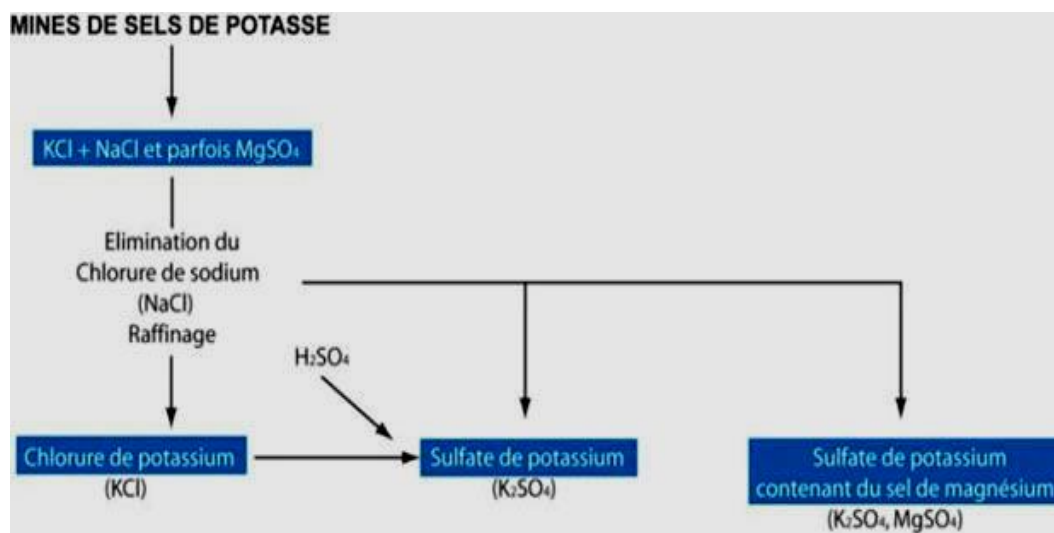


Figure 12. Représentation schématique de la fabrication d'engrais potassiques.
Source : <http://www.unifa.fr/nourrir-les-plantes/engrais-et-amendements>

9. EFFET DE LA FERTILISATION POTASSIQUE SUR LE BLE DUR

Les besoins en potassium des céréales peuvent être supérieurs aux quantités contenues à la récolte 30 à 50 Kg de K₂O de plus/ha, (Belaid, 1987).

Une meilleure connaissance de la gestion de la nutrition en K dans les systèmes de céréales est essentielle pour la durabilité de la production de grains du blé (Damon and Rengel., 2007).

La fertilisation potassique s'est avérée comme un moyen simple et économique pour améliorer le rendement de blé en agriculture pluviale (Aissa et Mehiri., 2002).

La fertilisation potassique est principalement appliquée au sol, mais les contraintes du sol, de l'environnement ou du développement racinaire peuvent entraîner une faible disponibilité des plantes pendant certaines périodes de forte demande végétale. Tandis que les applications foliaires de potassium sont appliquées directement sur les plantes et peuvent répondre aux besoins en potassium momentanées lorsque des contraintes d'absorption par le sol sont rencontrées, améliorer l'efficacité des engrais appliqués au sol, augmenter les rendements, améliorer la qualité des produits et la résistance aux maladies (Xiaoyan et al., 2021).

L'analyse foliaire de blé de différentes phases végétatives et le suivi de la croissance de la culture ont montré qu'au cours des stades de pleine croissance, de montaison et d'épiaison, il existe une demande instantanée accrue de potassium nécessaire à l'activation du métabolisme synthétique et au transport des glucides (Syers, 1990).

Conclusion

Malgré l'importance de la fertilisation potassique sur l'amélioration du rendement et la qualité des récoltes du blé, très peu de travaux ont été réalisés en Algérie (Daoud et Etourneauud., 1995 ; Halilat., 2004 ; Belaid., 2017).

CHAPITRE II. MATERIELS ET METHODES

1. PRESENTATION DE LA REGION ET DU SOL D'ETUDE

L'expérience de terrain concerne l'évaluation de l'effet de différents niveaux d'engrais potassique sur la croissance et le rendement du blé dur en conditions pluviales, au cours de deux saisons de croissance successives 2020-2021 et 2021-2022. L'expérimentation s'est déroulée au Nord-Est de la plaine de la Mitidja (Zone 1 de la Figure 13) à l'Institut Technique des Grandes Cultures à Oued Semar Alger ; il s'agit d'une ferme pilote pour la production de céréales et la multiplication des semences. Cette station s'étend sur une superficie d'environ 100 ha (latitude 36°43' nord, longitude 30°08', altitude 24 m) sur un type de sol " fluvisol ", ce type de sol couvre toute la surface de cette station et aussi une grande partie de la surface de la plaine de la Mitidja.

La plaine de la Mitidja est une étroite plaine littorale de 100 km de long située dans le centre de l'Algérie septentrionale (figure 13). Elle s'étend sur une superficie d'environ 1450 km² et est bordée à l'est par la mer Méditerranée et au nord par les montagnes du Sahel. Au sud, elle renferme l'Atlas de Blida, et à l'ouest par les montagnes de Dahran, elle englobe une latitude de 36° [Belout et al., 2020]. Les sols de cette plaine sont considérés comme les plus fertiles d'Algérie.

Cette zone est caractérisée par un climat méditerranéen à influence continentale (sirocco en été), des hivers pluvieux et doux, et des étés chauds et secs.

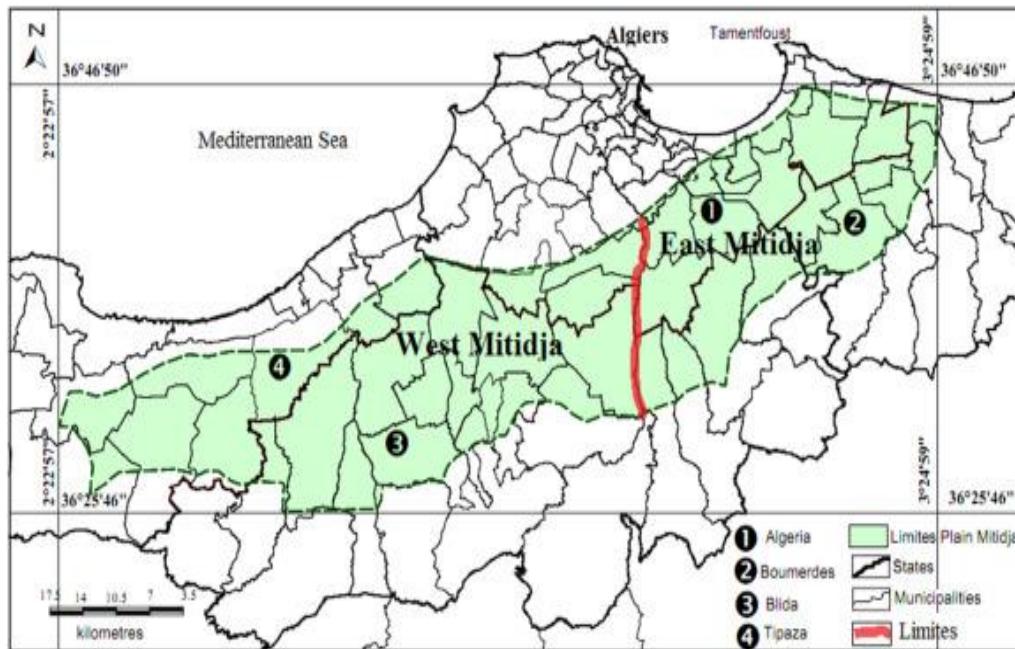


Figure 13. L'étendue de la plaine de la Mitidja dans le nord de l'Algérie

Le sol est un apport alluvial "fluvisol" peu développé, de texture argilo-limoneuse, de pH neutre et sans carbonatation, à faible teneur en matière organique, bien pourvu en phosphore assimilable, et pauvre en potassium assimilable selon la méthode des normes Mutcher [Mutcher., 1977], ce qui correspond à une teneur de 0,55 meq/100 g de sol pour une teneur en argile d'environ 40 % (tableau 1). Le tableau 1 fournit des informations sur les propriétés physiques et chimiques du sol étudié. Les données présentées dans ce tableau sont essentielles pour évaluer la fertilité des sols et déterminer les mesures à prendre pour améliorer les rendements agricoles.



Figure 14. Echantonnage du sol avant l'installation de la culture (photo Messaoudi).

Tableau 1. Propriétés physiques et chimiques du sol étudié.

Paramètres du sol analysés		Les Valeurs
Traits physiques	Limon (%)	42.47
	Argile (%)	40.48
	Potentiel Hydrique	7.25
	Matière Organique (%)	1.30
Les propriétés chimiques	CEC (Cmol ⁺ kg ⁻¹)	30.09
	Azote Total (mg kg ⁻¹)	1710
	Azote Assimilable (mg kg ⁻¹)	28.02
	Potassium Assimilable (mg kg ⁻¹)	89.7
	Phosphore Assimilable (mg kg ⁻¹)	235.11

2. CONDITIONS ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

La figure 15 présente les données mensuelles de température et de précipitations pour le site expérimental, pour deux campagnes agricoles distinctes (" 2020-2021 " et " 2021-2022 ") ainsi que pour la période allant de 1990 à 2020. Les précipitations annuelles cumulées pour la campagne 2020-2021 sont de 576,1 mm et pour 2021-2022 de 460,3 mm (données météorologiques de la station), ce qui correspond à une année climatique normale. Pendant le cycle de développement des cultures, 162,8 mm de pluie ont été enregistrés entre décembre et janvier. Par la suite, 167,9 mm de pluie ont été enregistrés entre février et juin. Les précipitations cumulées pour la période du cycle végétatif du blé sont de 330,7 mm.

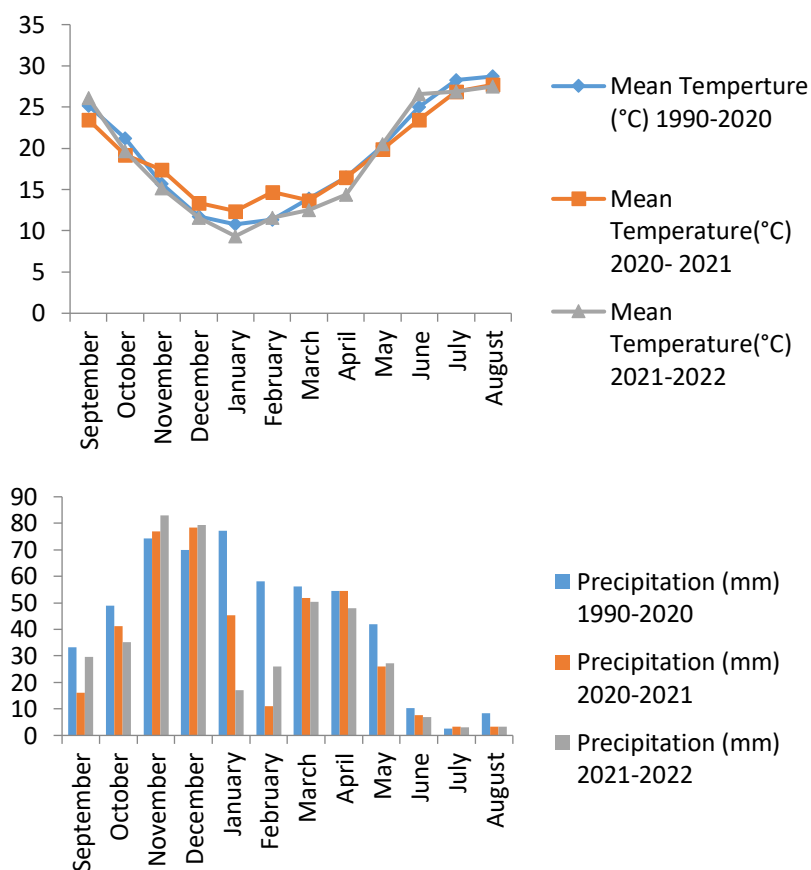


Figure 15. Températures et précipitations mensuelles de deux campagnes agricoles ("2020-2021"/"2021-2022") et de la période de (1990-2020) pour le site expérimental.

L'expérience a été réalisée selon un plan en carré latin avec cinq niveaux de k_2O ($K_0 = 0 \text{ kg } k_2O \text{ ha}^{-1}$ = contrôle (pas d'application d'engrais potassique), $K_1 = 100 \text{ kg } k_2O \text{ ha}^{-1}$, $K_2 = 200 \text{ kg } k_2O \text{ ha}^{-1}$, $K_3 = 300 \text{ kg } k_2O \text{ ha}^{-1}$, $K_4 = 400 \text{ kg } k_2O \text{ ha}^{-1}$) répétés en 5 répétitions sur des parcelles élémentaires de 12 m^2 .

Le Bersim était la culture précédente dans la zone d'expérimentation. L'étude a été réalisée avec la variété communément cultivée (cultivar Simeto) de blé dur, c'est une variété italienne résistante à la sécheresse, le froid, les maladies fongiques. L'engrais apporté avant le semis était sous forme de sulfate granulé de potasse (0-0-50 + 18% S). Le semis a été effectué le 17 décembre 2020 par un semoir dans un lit de semences bien préparé le 18 novembre 2020 en utilisant la densité de semis de $125 \text{ kg de semences ha}^{-1}$ (figure 15).

Des engrais azotés et phosphatés ont été appliqués à raison de 69 kg N ha^{-1} sous forme d'urée et de $46 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$ sous forme de superphosphate triple. L'engrais phosphaté a été appliqué en une seule fois avant le semis avec l'engrais potassique, et l'engrais azoté a été appliqué en

trois fois (soit 23 kg N ha⁻¹) aux stades de développement suivants : tallage, premier épi et épiaison.



Figure 16. Installation du dispositif expérimental (photo Messaoudi).

Au cours du cycle de la culture, des dizaines de plantes saines ont été sélectionnées dans chaque répétition de chaque parcelle de traitement, et les paramètres morphologiques suivants ont été observés ou mesurés : nombre de peuplement par unité de surface, nombre des talles en m², Mesure stade premier épis, hauteur finale de la végétation, col de l'épi, longueur de l'épi, la surface foliaire de la feuille étandard et teneur en matière sèche au stade de la floraison (figures 17, 18, 19).



Figure 17. Mesure de stade premier épis (cm).



Figure 18. Mesure de la hauteur épis (cm).



Figure 19. Mesure de la teneur en matière sèche (%).

Au moment de la récolte, des dizaines de plantes saines ont été sélectionnées dans chaque répétition de chaque parcelle de traitement. Les observations agronomiques comprenaient : le rendement en grains et en paille, le nombre d'épis par mètre carré, le nombre de grains par épi, la biomasse, le poids de mille grains (figure 20) et la teneur en protéines des échantillons de semences ont été mesurés en déterminant la teneur en azote ($\text{protéine\%} = \text{azote\%} \times 6,25$) dans les grains de blé dur [Jiang et al., 2014], et l'utilisation des grains récoltés pour la détermination des caractères qualitatives suivantes : taux de la mouchture, et mitadinage, et taux de vitrosité, indice de jaune et brun.



Figure 20. Mesure de poids mille grain (g).

Toutes les mesures du sol et des plantes ont été effectuées selon des méthodes standard. Pour l'analyse du sol, des échantillons de sol (des dizaines d'échantillons) ont été prélevés à une profondeur de 0 à 30 cm, avant la plantation. Le diagnostic foliaire était basé sur l'analyse des deuxième et troisième feuilles de doz-ens de plantes saines de chaque réplicat de chaque parcelle de traitement au stade de la floraison ; la minéralisation est effectuée par une attaque acide. La teneur en azote des échantillons de sol et de plantes a été déterminée par la méthode Kjeldahl (Lynch et Barbano., 1999). Un spectre d'absorption atomique utilisant un photomètre à flamme a été appliqué pour estimer la concentration en potassium des échantillons de feuilles de drapeaux et de sol (potassium extrait avec une solution 1N d'acétate d'ammonium). La méthode Olsen a été utilisée pour mesurer la disponibilité du P, et la matière organique dans le sol a été mesurée avec la méthode Anne (McBratney et al., 2000). Toutes les mesures sur les plantes et le sol ont été effectuées en cinq répétitions pour chaque traitement.

3. ANALYSES STATISTIQUES

Les analyses statistiques, y compris l'analyse de variance (ANOVA) et l'analyse de comparaison des moyennes, ont été réalisées à l'aide du logiciel XLSTAT version 2022. La méthode New-man keul a été utilisé pour déterminer les différences significatives entre les moyennes des groupes dans une analyse de variance à 1 % ($p \leq 0,01$), et des niveaux de probabilité de 5 % ($p \leq 0,05$) ont été utilisés pour l'analyse de comparaison des moyennes.

CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION

1. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU BLE DUR

Le tableau 2 montre différents paramètres morphologiques qui sont impliqués dans la croissance végétative du blé dur. Ces paramètres comprennent la hauteur de la plante, la longueur de l'épi, le col de l'épi, le nombre de grains par épi, le nombre d'épis par m² et le nombre d'épillets par épi. Ainsi, la hauteur des plantes a été significativement affectée par le taux d'application de potassium et l'interaction niveau de K*saison ($p \leq 0,05$). En comparant les deux années d'expérimentation, il a été constaté que la hauteur des plantes la plus élevée a été enregistrée avec le taux de 200 kg ha⁻¹ k₂O (85,79 cm pour la première année et 83,65 cm pour la deuxième année), tandis que la hauteur des plantes la plus faible a été observée avec le taux d'application de 400 kg k₂O ha⁻¹ (81,73 cm pour la première année et 80,93 cm pour la deuxième année).

La longueur des épis a été significativement affectée par les niveaux d'engrais potassique ($p \leq 0,05$). Les longueurs d'épis les plus élevées ont été observées avec les taux d'application de 100 kg k₂O ha⁻¹ et 200 kg k₂O ha⁻¹ (7,57 cm et 7,58 cm pour la première année ; 7,04 cm et 6,76 cm pour la deuxième année), tandis que la valeur la plus faible de la longueur d'épi a été notée avec les parcelles de contrôle (7,08 cm pour la première année et 6,57 cm pour la deuxième année). Par conséquent, par rapport au témoin, 100 kg de k₂O ha⁻¹ ont entraîné une augmentation de la longueur des épis de 6,47 % et 6,60 % pour la première année et de 7,76 % pour la deuxième année.

Les niveaux d'engrais potassique et le niveau de K*saison ont influencé de manière significative le paramètre col des épis ($p \leq 0,05$). La dose de 100 kg k₂O ha⁻¹ a produit les valeurs les plus élevées (18,48 cm pour la première année et 17,51 cm pour la deuxième année), soit une augmentation de 13,74% et 9,03% respectivement par rapport au témoin qui a enregistré les valeurs les plus faibles de 15,94 cm et 16,06 cm.

L'augmentation des niveaux d'engrais potassique, de la saison de culture et du niveau de K*saison a eu un effet significatif sur le nombre d'épis par m² ($p \leq 0,05$). Cependant, la dose de 100 kg de k₂O ha⁻¹ a produit les valeurs les plus élevées pour ce paramètre (226,77 épis m⁻² la première année et 264,25 épis m⁻² la deuxième année). En revanche, les taux les plus faibles

ont été obtenus avec la dose de 300 kg k₂O ha⁻¹ la première année (213 épis m⁻²) et avec le témoin la deuxième année (228,25 épis m⁻²).

Enfin, les paramètres morphologiques de la croissance végétative ont montré que l'application croissante d'engrais K n'a pas eu d'effet significatif sur le nombre de grains par épi et le nombre d'épillets par épi ($p > 0,05$). Pour ces deux paramètres, il n'y avait pas de différence significative entre les différents niveaux d'engrais K testés. Ces résultats suggèrent que d'autres facteurs tels que l'irrigation, la température et la variété de plantes peuvent avoir une plus grande influence sur la production de grains et d'épillets.

Tableau 2. Effet des niveaux de potassium sur les caractéristiques morphologiques du blé dur

Saison	Niveau-K	Hauteur de la plante (cm)	Longueur de l'épis (cm)	Col d'épis(cm)	Nombre de grains par épis	Nombre d'épis par m ²	Nombre d'épillets par épis
2020/2021	K0	83.1 ^{ab}	7.08 ^a	15.94 ^b	76.97 ^a	221.9 ^b	20.68 ^a
	K1	83.53 ^{ab}	7.57 ^b	18.48 ^a	79.68 ^a	226.77 ^{ab}	21.61 ^a
	K2	85.79 ^a	7.58 ^b	17.56 ^a	79.84 ^a	220.10 ^b	22.04 ^a
	K3	83.46 ^{ab}	7.12 ^a	16.29 ^{ab}	77.84 ^a	213 ^b	21.12 ^a
	K4	81.73 ^b	7.09 ^a	16.69 ^{ab}	78.36 ^a	219.33 ^b	20.96 ^a
2021/2022	K0	81.95 ^b	6.57 ^a	16.06 ^b	57.27 ^b	228.25 ^{ab}	16.72 ^b
	K1	82.44 ^{ab}	7.04 ^b	17.51 ^a	58.96 ^b	264.25 ^a	16.97 ^b
	K2	83.65 ^{ab}	6.76 ^{ab}	16.67 ^{ab}	61.05 ^b	251.5 ^a	17.11 ^b
	K3	81.95 ^b	6.61 ^a	16.19 ^{ab}	56.54 ^b	250 ^a	16.61 ^b
	K4	80.93 ^b	6.58 ^a	15.98 ^b	56.53 ^b	235.51 ^{ab}	16.92 ^b
Valeur P	Saison de culture	0.15	0.02	0.23	0.09	0.01	0.02
	Niveau K	0.04	0.05	0.03	0.25	0.28	0.33
	Interaction niveau K*saison	0.05	0.01	0.02	0.17	0.03	0.17

Dans une colonne, des lettres différentes indiquent des différences significatives à $p < 0,05$. k0 : 0 kg k₂O ha⁻¹ : contrôle (pas d'application d'engrais potassique) ; K1 : 100 kg k₂O ha⁻¹ ; K2 : 200 kg k₂O ha⁻¹ ; K3 : 300 kg k₂O ha⁻¹ ; K4 : 400 kg k₂O ha⁻¹.

2. REPRESENTATION GRAPHIQUE DE QUELQUES TRAITS MORPHOLOGIQUES

2.1. La surface foliaire (cm²)

Les données de la figure 21, montrent qu'il n'y avait pas de différence significative entre les différents niveaux d'engrais K testés avec la surface foliaire. La valeur de surface foliaire la plus élevée (37,62 m²) a été trouvée dans les parcelles de contrôle, tandis que la valeur de surface foliaire la plus faible (33,55 m²) a été obtenue dans les parcelles fertilisées au taux de

200 kg de k_2O ha^{-1} . l'augmentation de l'application d'engrais K n'a pas d'effet significatif sur la surface foliaire, puisque la valeur p était supérieure à 0,05 pour ce paramètre étudié.

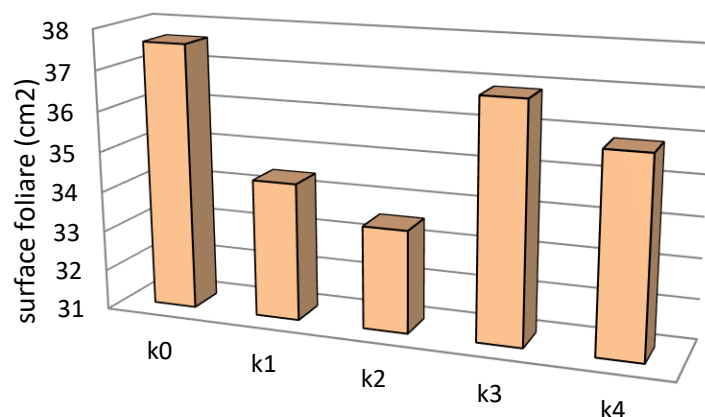


Figure 21. Relation entre la surface foliaire (cm²) et les doses croissantes du potassium.

2.2. La densité des Plantes

l'effet de la fertilisation en K sur la densité végétale du blé sont présentés dans la figure 22. Les données montrent qu'il n'y avait pas de différence significative entre les différents niveaux d'engrais K testés dans ce paramètre. La valeur de densité végétale la plus élevée (172,7 plantes m⁻²) a été retrouvée à un taux de 200 kg de k_2O ha^{-1} , alors que la valeur de densité végétale la plus faible (152,4 plantes m⁻²) a été obtenue dans les parcelles fertilisées à un taux de 400 kg de k_2O ha^{-1} .

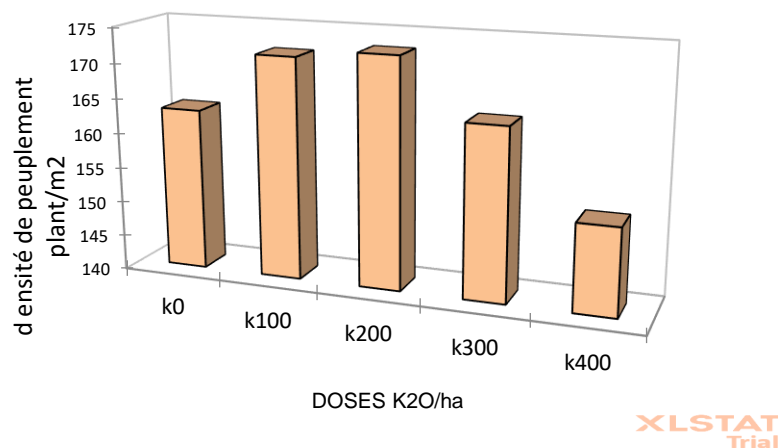


Figure 22. Relation entre la densité des peuplements et les doses du potassium.

2.3. Nombre des talles en m^2

La figure 23, montre que les niveaux croissants d'engrais potassique n'ont pas d'effet significatif sur le nombre de talles par unité de surface ($p > 0,05$). Cependant, la valeur la plus élevée (283,2 talles m^{-2}) a été obtenue avec la dose de 100 kg de k_2O ha^{-1} mais sans différence significative.

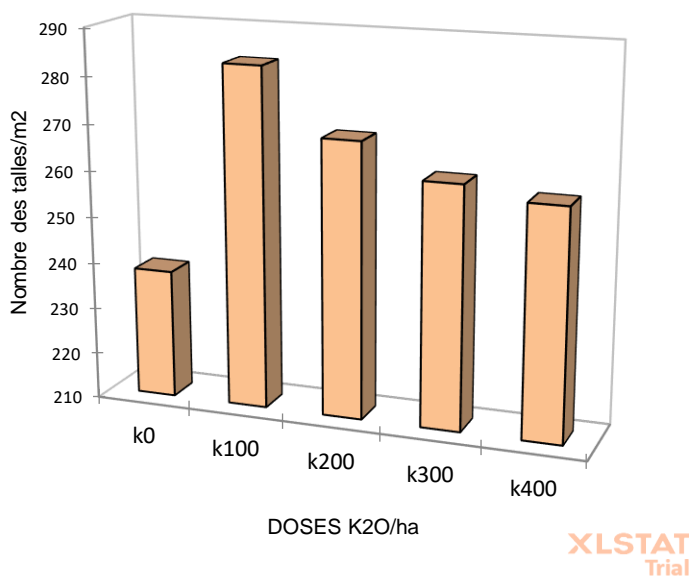


Figure 23. Relation entre le nombre des talles et les doses croissantes du potassium.

3. RENDEMENT EN GRAINS ET CARACTERISTIQUES DU RENDEMENT

3.1. Rendement en grains ($t ha^{-1}$)

Selon les résultats présentés dans le tableau 3, le rendement en grains du blé a été significativement affecté par les niveaux d'application d'engrais potassique ($p \leq 0,05$), la saison de culture ($p \leq 0,001$), et le niveau de K^* saison ($p \leq 0,01$). Les résultats indiquent que le taux d'application de 100 kg de k_2O ha^{-1} a produit les rendements en grains les plus élevés, soit 2,58 $t ha^{-1}$ la première année et 2,09 $t ha^{-1}$ la deuxième année. Ces chiffres représentent une augmentation significative de 23,27 % par rapport à l'essai de contrôle. Cependant, lorsque le taux d'engrais potassique a été augmenté à 200 kg de k_2O ha^{-1} , une diminution de 3,97 % du rendement en grain a été observée. Il est intéressant de noter que le rendement en grains le plus faible a été obtenu avec le taux de potassium le plus élevé (400 kg k_2O ha^{-1}), soit 1,83 $t ha^{-1}$ la première année et 1,53 $t ha^{-1}$ la deuxième année. En revanche, l'utilisation de

la dose de 100 kg k_2O ha^{-1} a entraîné une augmentation de 0,54 t ha^{-1} par rapport aux parcelles de contrôle.

3.2. Matière sèche (%)

Les résultats du tableau 3 décrivent l'effet des niveaux d'engrais potassiques sur la matière sèche des cultures de blé. Les résultats indiquent que les niveaux d'engrais potassiques, la saison de culture et le niveau de K saison ont eu un impact significatif sur la teneur en matière sèche ($p \leq 0,05$). L'utilisation de 200 kg k_2O ha^{-1} d'engrais potassique a permis d'obtenir les teneurs en matière sèche les plus élevées, avec 20,01 % la première année et 16,85 % la deuxième année. Une dose de 100 kg k_2O ha^{-1} a également entraîné une augmentation significative, avec des valeurs de 18,34 % et 16,5 % pour les deux années respectivement. Ces résultats montrent une augmentation de 15,09 % et de 7,36 % par rapport au témoin lorsque les deux taux de fertilisation potassique sont utilisés. Néanmoins, l'utilisation d'une dose de 400 kg de k_2O ha^{-1} a généré la plus faible quantité de matière sèche avec une valeur de 14,46% pour la première année. La deuxième année, les parcelles ont produit la plus faible quantité de matière sèche, soit seulement 16,35 %.

3.3. Poids de mille grains (g)

Les données présentées dans le tableau 3 mettent en évidence l'effet significatif des niveaux de fertilisation potassique et du niveau de K*saison sur le poids de mille grains du blé ($p \leq 0,05$; $p \leq 0,01$). Les résultats indiquent que les taux d'application de 100 kg k_2O ha^{-1} et de 200 kg k_2O ha^{-1} ont entraîné une augmentation significative de ce paramètre (tableau 3). En d'autres termes, l'utilisation de ces deux niveaux d'engrais potassique peut être bénéfique pour augmenter le poids des grains de blé dans les conditions de l'étude. Les résultats obtenus au cours des deux années d'expérimentation indiquent que les parcelles ayant reçu une fertilisation à un taux de 100 kg de k_2O ha^{-1} ont produit le poids de mille grains le plus élevé. Plus précisément, le poids de mille grains a été de 53,35 g la première année et de 49,7 g la deuxième année. En revanche, pour les parcelles fertilisées avec 200 kg de k_2O ha^{-1} , le poids de mille grains a été de 51,2 g la première année et de 48,5 g la deuxième année. Cela représente une augmentation de 7,7 % et de 3,83 % par rapport aux parcelles de contrôle avec les deux taux de fertilisation utilisés. En d'autres termes, l'application de 100 kg de k_2O ha^{-1} semble être plus efficace pour augmenter le poids des grains que l'application de 200 kg de k_2O ha^{-1} . Cependant, on observe une diminution de 3,87 % du rendement lorsque la dose d'engrais potassique passe de 100 à 200 kg k_2O ha^{-1} . Les taux d'application de 300 kg k_2O ha^{-1}

¹et de 400 kg k₂O ha⁻¹ ont conduit aux poids de mille grains les plus faibles au cours des deux années de l'expérience (tableau 3). En effet, le poids de mille grains le plus faible a été enregistré pour ces deux doses. Pour la première année, les poids les plus faibles ont été de 48,13 g et 48,14 g pour les doses de 300 kg k₂O ha⁻¹ et 400 kg k₂O ha⁻¹, respectivement. La deuxième année, les poids les plus faibles étaient de 45,54 g et 46,74 g pour les mêmes doses respectives. Ces résultats suggèrent que l'utilisation de doses élevées d'engrais potassique peut avoir un effet négatif sur le poids des grains.

Tableau 3. Effet de l'augmentation des niveaux de potassium sur les caractéristiques de rendement.

Saison	Niveau-K	Rendement (t ha ⁻¹)	Matière sèche (%)	Poids de mille grains (g)
2020/2021	K0	1.98 ^b	16.99 ^b	49.24 ^b
	K1	2.58 ^a	18.34 ^b	53.35 ^a
	K2	2.45 ^a	20.01 ^a	51.2 ^a
	K3	2.09 ^b	17.10 ^{bc}	48.13 ^b
	K4	1.83 ^{ab}	14.46 ^d	48.14 ^b
2021/2022	K0	1.55 ^c	16.18 ^c	46.8 ^{bc}
	K1	2.09 ^b	16.01 ^c	49.7 ^b
	K2	1.9 ^{ab}	16.85 ^c	48.5 ^b
	K3	1.53 ^c	16.41 ^c	45.54 ^c
	K4	1.67 ^b	16.35 ^c	46.74 ^{bc}
<i>p</i> Values	Saison de Culture	0.001	0.02	0.22
	K-Niveau	0.03	0.05	0.04
	K-niveau*Saison	0.01	0.03	0.01
	Interaction			

Dans une colonne, des lettres différentes indiquent des différences significatives à $p < 0,05$. K0 : 0 kg k₂O ha⁻¹ : contrôle (pas d'application d'engrais potassique) ; K1 : 100 kg k₂O ha⁻¹ ; K2 : 200 kg k₂O ha⁻¹ ; K3 : 300 kg k₂O ha⁻¹ ; K4 : 400 kg k₂O ha⁻¹.

4. REPRESENTATION GRAPHIQUE DE QUELQUES PARAMETRES DE RENDEMENT

4.1. La biomasse (t ha⁻¹)

le paramètre du poids de la biomasse aérienne n'a pas été affecté par des niveaux croissants d'engrais potassique ($p > 0,05$). Selon la figure 24, la valeur la plus élevée de 5.76 t ha⁻¹ a été obtenue avec un taux d'application de 200 kg k₂O ha⁻¹, tandis que la valeur la plus faible de 4.77 q ha⁻¹ a été observée avec les parcelles témoins.

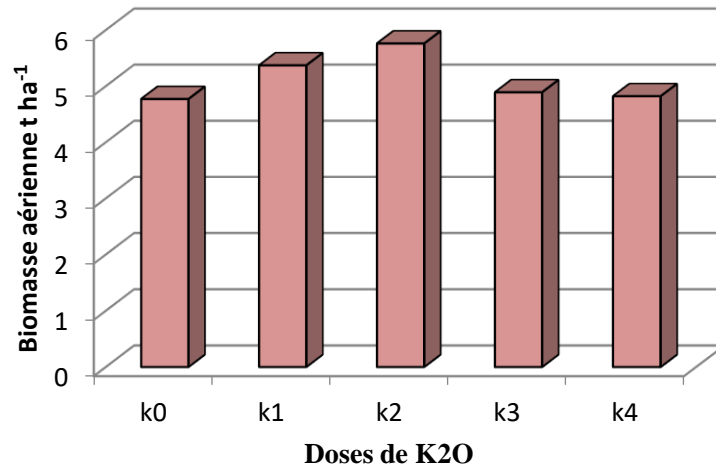


Figure 24. Relation entre la biomasse aérienne et les doses croissantes du potassium.

4.2. Rendement en paille (t ha⁻¹)

Le paramètre du rendement en paille n'a pas été affecté par l'augmentation des niveaux de potassium, comme le montre la figure 25. Cependant, la valeur la plus élevée du rendement en paille (23,6 q ha⁻¹) a été observée dans les parcelles fertilisées à un taux d'application de 100 kg k₂O ha⁻¹, et la valeur la plus faible (19,7 q ha⁻¹) a été enregistrée dans les parcelles de contrôle.

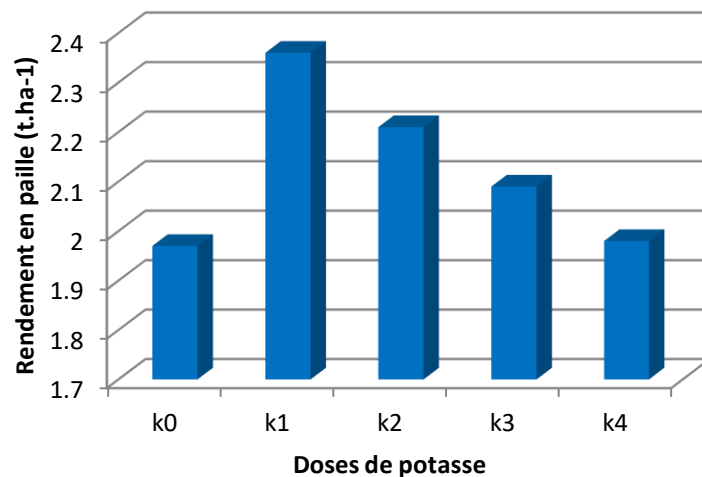


Figure 25. Relation entre le rendement en paille (t ha⁻¹) et les doses croissantes du potassium.

4.3. L'indice de récolte

L'effet des niveaux d'engrais potassiques sur l'indice de récolte du blé a été évalué, et les résultats sont présentés dans la figure 26. Les données ont montré que le paramètre de l'indice de récolte n'était pas affecté par l'augmentation des niveaux de potassium. Cependant, l'indice de récolte le plus élevé de 0,48 a été enregistré avec un taux d'application de 100 kg K_2O ha^{-1} , tandis que l'indice de récolte le plus bas de 0,38 a été enregistré avec un taux d'application de 400 kg K_2O ha^{-1} .

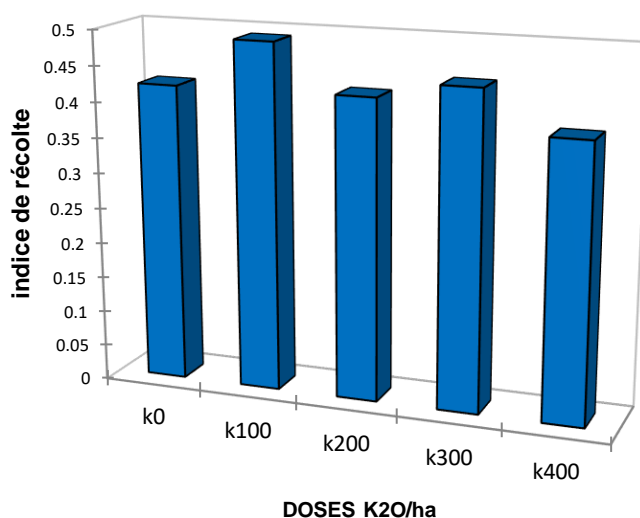


Figure 26. Relation entre l'indice de récolte et les doses croissantes du potassium.

5. TENEUR EN PROTEINES DES GRAINS DU BLE

Les données présentées dans le tableau 4 montrent clairement que les niveaux d'engrais K appliqués et le niveau de K*saïson ont un effet significatif sur la quantité de protéines des grains de blé ($p \leq 0,05$). En général, ces résultats indiquent que la teneur en protéines des grains de blé est étroitement liée aux niveaux d'engrais potassique, une augmentation du taux d'engrais potassique entraînant une augmentation de la teneur en protéines des grains.

La première année, la teneur en protéines a fluctué entre 14,82 % et 16,51 %, tandis que la deuxième année, elle a varié entre 14,88 % et 16,29 %. La dose de 100 kg de K_2O ha^{-1} a donné la teneur en protéines la plus élevée, soit 16,51 % la première année et 16,29 % la deuxième année. En revanche, la dose de 200 kg de K_2O ha^{-1} a donné la deuxième teneur en protéines la plus élevée, avec 15,82 % la première année et 15,6 % la deuxième année,

respectivement. D'autre part, les résultats de l'étude ont révélé que le taux d'application de 400 kg de k_2O ha^{-1} a conduit à la teneur en protéines la plus faible, soit 14,82 % la première année et 14,88 % la deuxième année. Ces chiffres indiquent qu'un excès de k_2O peut avoir un impact négatif sur la production de protéines dans la culture. Par conséquent, il est essentiel de trouver le bon équilibre en termes de taux d'application de k_2O pour maximiser la production de protéines. Ces résultats peuvent aider les agriculteurs à ajuster leur utilisation d'engrais afin d'optimiser la qualité et le rendement des cultures.

Sur la base de ces résultats, nous avons observé une augmentation significative de la teneur en protéines avec l'application d'engrais potassique par rapport aux parcelles de contrôle. Plus précisément, nous avons constaté une augmentation de 7,33 %, 3,29 % et 1,35 % à 100 kg k_2O ha^{-1} , 200 kg k_2O ha^{-1} et 300 kg k_2O ha^{-1} respectivement. Cependant, il faut noter que l'application d'engrais potassique a entraîné une diminution de la teneur en protéines de la culture. En effet, la deuxième année, nous avons observé une augmentation de 7,43 % par rapport aux parcelles de contrôle avec un taux de 100 kg k_2O ha^{-1} (tableau 4).

Tableau 4. Effet de l'augmentation des niveaux de potassium sur la teneur en protéines du blé dur.

Saison	K-Niveau	Teneur en proteine(%)
2020/2021	K0	15.30 ^{ab}
	K1	16.51 ^a
	K2	15.82 ^{ab}
	K3	15.51 ^{ab}
	K4	14.82 ^b
2021/2022	K0	15.08 ^b
	K1	16.29 ^a
	K2	15.60 ^{ab}
	K3	15.38 ^{ab}
	K4	14.88 ^b
Valeur P	Saison de culture	0.42
	K-Niveau	0.04
	K-Niveau*Saison Interaction	0.02

Dans une colonne, des lettres différentes indiquent des différences significatives à $p < 0,05$. k0 : 0 kg k_2O ha^{-1} : contrôle (pas d'application d'engrais potassique) ; K1 : 100 kg k_2O ha^{-1} ; K2 : 200 kg k_2O ha^{-1} ; K3 : 300 kg k_2O ha^{-1} ; K4 : 400 kg k_2O ha^{-1} .

6. REPRESENTATION GRAPHIQUE DE QUELQUES PARAMETRES DE QUALITE

6.1 Le Mitadinage

on remarque selon la figure 27, que le taux de mitadinage le plus faible de 19.81 % est enregistré au dose de 100 kg k_2O ha⁻¹, Alors qu'il atteint la valeur maxde 21.49 % au dose de 200 kg k_2O ha⁻¹ .

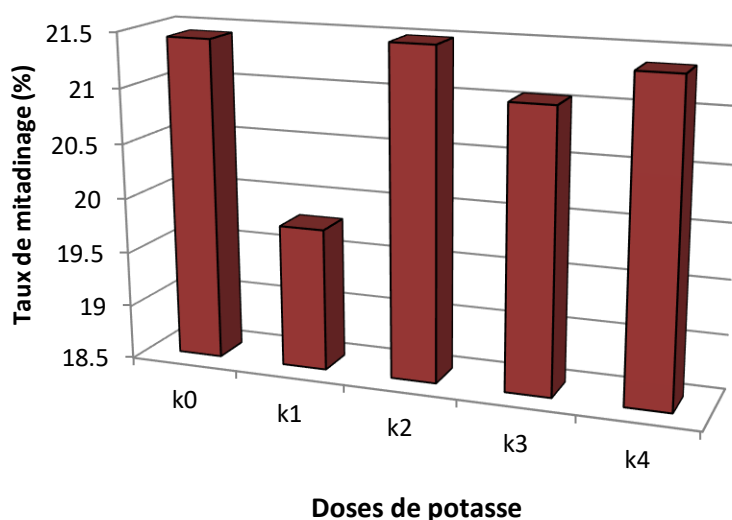


Figure 27. Relation entre le taux de mitadinage (%) et les doses croissantes du potassium.

6.2. La vitrosité

On conclu selon le grapgique 28, qui présente le taux de vitrosité par rapport les doses croissantes du potassium que l'augmentation de l'application d'engrais K n'a pas d'effet significatif ni positif sur ce paramètre ($p > 0,05$). Cependant le taux de vitrosité le plus élevé de 80.2 % a été enregistré avec le taux d'application de 100 kg K_2O ha⁻¹, tandis que la valeur minimale de 78.51 % a été obtenue avec le traitement de 200 kg K_2O ha⁻¹.

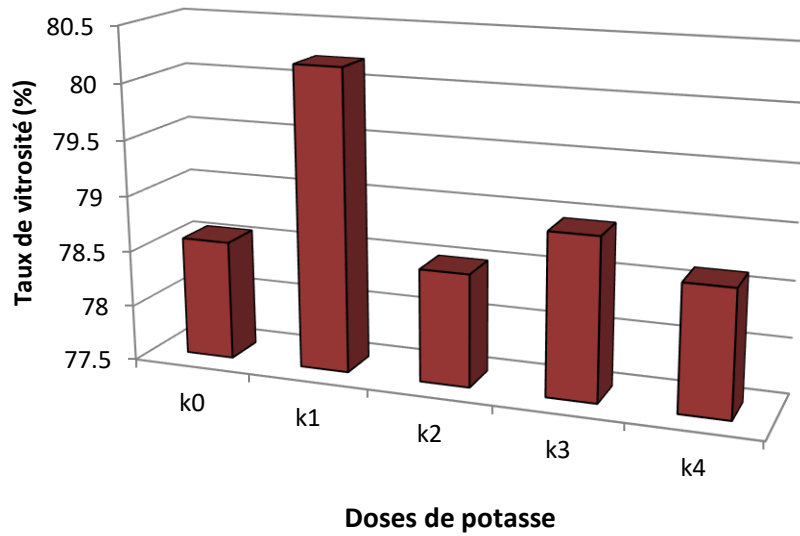


Figure 28. Relation entre le taux de la vitrosité (%) et les doses croissantes du potassium.

6.3. Taux de la moucheture

Selon la figure 29, qui montre la relation entre le taux de la moucheture sur blé et les doses croissantes de l'engrais potassique ajoutées. Nous remarquons que la dose 400 kg K_2O ha^{-1} enregistre le taux le plus élevé de 20.5 %, alors que les parcelles qui ont reçues la dose de 100 kg K_2O ha^{-1} enregistre un taux minimale de 5.5 %. selon les résultats statistiques, il n'y avait pas de différence significative entre les différents niveaux d'engrais K testés avec le taux de la moucheture.

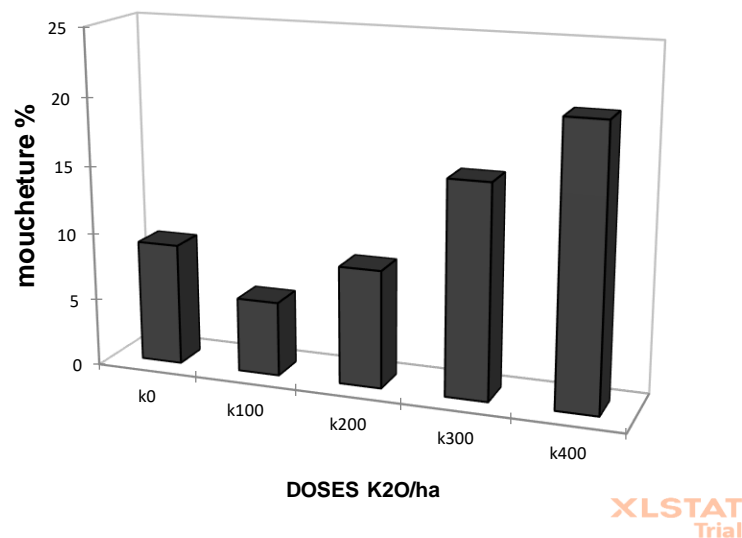


Figure 29. Relation entre le taux de la moucheture (%) et les doses croissantes du potassium.

6.4. Indice de jaune et l'indice de brun

6.4.1. Indice de jaune

Selon les données présentées dans la figure 30, qui présente la valeur de l'indice de jaune par rapport aux doses croissantes du potassium, que l'augmentation de l'application d'engrais K n'a pas d'effet significatif sur le paramètre indice de jaune du blé dur ($p > 0,05$). Cependant, la valeur la plus élevée de 16.09 a été obtenue avec le taux d'application de 200 kg K_2O ha^{-1} , et la valeur minimale de 15.46 a été observée dans les parcelles de contrôle.

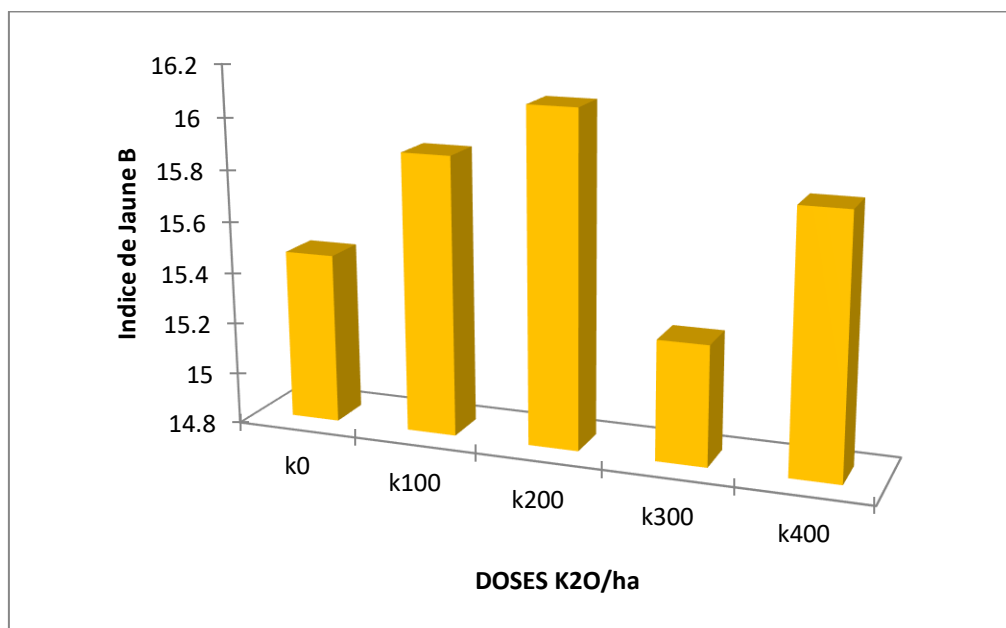


Figure 30. Relation entre le paramètre indice de jaune et les doses croissantes du potassium.

6.4.2. Indice de brun

L'effet des niveaux d'engrais potassiques sur l'indice de brun du blé a été évalué, et les résultats sont présentés dans la figure 31. Les données ont montré que le paramètre de l'indice de brun n'était pas affecté par l'augmentation des niveaux de potassium ($p > 0,05$). Cependant, l'indice de brun le plus élevé de 27.27 a été tiré avec le taux d'application de 300 kg k_2O ha^{-1} , tandis que l'indice de brun le plus bas de 20, a été obtenue avec le taux d'application de 100 kg k_2O ha^{-1} .

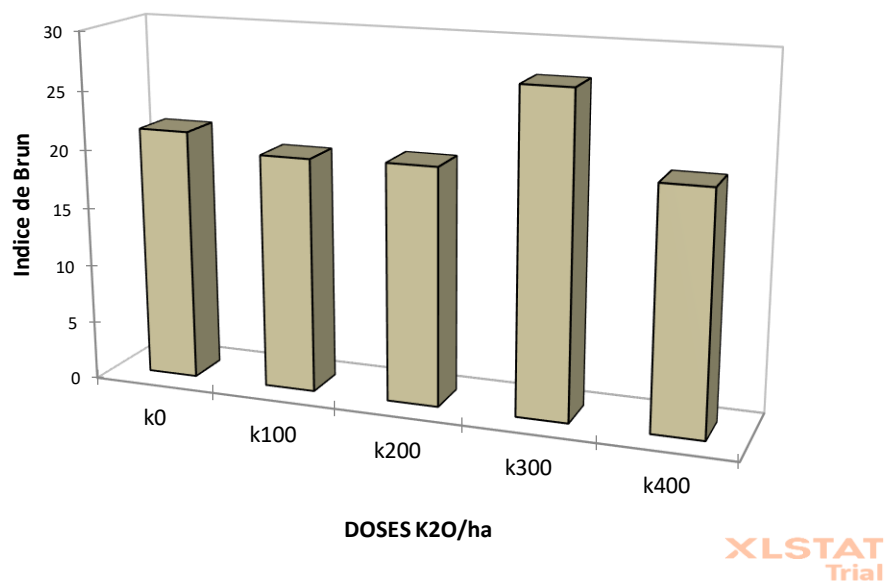


Figure 31. Relation entre le paramètre indice de brun et les doses croissantes du potassium.

7. ÉTAT NUTRITIONNEL DES PLANTES

Les données présentées dans le tableau 5 indiquent que l'application de niveaux d'engrais potassiques de 300 kg k₂O ha⁻¹ et 400 kg k₂O ha⁻¹ a entraîné une augmentation de la teneur en potassium des plantes, atteignant 2,03 g kg⁻¹ pour les deux doses la première année, et 1,98 g kg⁻¹ avec la dose de 300 kg k₂O ha⁻¹ et 2,01 g kg⁻¹ avec la dose de 400 kg k₂O ha⁻¹ pour la deuxième année, respectivement. Cependant, il faut souligner que pour les deux années d'expérimentation, les résultats ne montrent pas d'effet significatif pour le facteur saison culturale étudié ($p > 0,05$). Par contre, pour les deux autres facteurs, à savoir le niveau de K et l'interaction niveau de K*saison, les différences observées dans les teneurs en potassium des plantes sont statistiquement significatives ($p \leq 0,05$). Les résultats ont également révélé que les parcelles témoins présentaient les teneurs en potassium foliaire les plus faibles, avec des valeurs minimales de 1,84 g kg⁻¹ pour la première année et de 1,67 g kg⁻¹ pour la deuxième année, respectivement.

En outre, des analyses ont été effectuées pour évaluer la teneur en azote des feuilles de la culture de blé, et les résultats sont résumés dans le tableau 5. Cette évaluation permet de mieux comprendre l'état nutritionnel de la plante en termes d'azote, qui est un élément crucial pour la croissance et le développement de la culture. Il a été constaté que les parcelles ayant reçu une fertilisation de 300 kg de k₂O ha⁻¹ présentaient les teneurs en azote les plus élevées,

avec 2,98 % la première année et 2,96 % la deuxième année. En revanche, une application de 100 kg de k_2O ha^{-1} a conduit aux teneurs en azote les plus faibles, avec 2,81 % la première année et 2,84 % la deuxième année.

En général, les analyses ont montré que les teneurs en N des feuilles des cultures étaient comprises entre 2,81 % et 2,96 % pour les deux années d'expérimentation et qu'il n'y avait pas de corrélation significative avec les niveaux d'engrais potassique appliqués. En d'autres termes, l'application d'engrais potassiques à différents niveaux n'a pas eu d'impact significatif sur les niveaux d'azote foliaire dans la culture étudiée ($p > 0,05$). Il est important de noter que la teneur en azote des feuilles est un indicateur clé de la nutrition azotée des plantes, qui peut avoir un impact significatif sur la croissance, le rendement et la qualité des cultures. Les résultats de cette analyse suggèrent que, dans ce contexte particulier, la teneur en azote des feuilles ne semble pas être influencée par les niveaux d'engrais potassique appliqués.

Tableau 5. Teneur en potassium et en azote des feuilles de blé au stade de la floraison.

Season	K-Niveau	K ($g\ kg^{-1}$)	N (%)
2020/2021	K0	1.84 ^{ab}	2.95 ^{ab}
	K1	1.91 ^a	2.8 ^a
	K2	1.94 ^a	2.83 ^a
	K3	2.03 ^a	2.98 ^b
	K4	2.03 ^a	2.87 ^{ab}
2021/2022	K0	1.67 ^b	2.91 ^{ab}
	K1	1.73 ^{ab}	2.84 ^a
	K2	1.77 ^{ab}	2.87 ^a
	K3	1.98 ^a	2.96 ^b
	K4	2.01 ^a	2.91 ^{ab}
Valeurs P	Saison de culture	0.15	0.51
	K-Niveau	0.05	0.27
	K-Niveau*Saison Interaction	0.03	0.55

Dans une colonne, des lettres différentes indiquent des différences significatives à $p < 0,05$. K% : Potassium, N% : Azote, k0 : 0 kg k_2O ha^{-1} : contrôle (pas d'application d'engrais potassique) ; K1 : 100 kg k_2O ha^{-1} ; K2 : 200 kg k_2O ha^{-1} ; K3 : 300 kg k_2O ha^{-1} ; K4 : 400 kg k_2O ha^{-1} .

8. POTASSIUM RESIDUEL DU SOL

Les données du tableau 6 indiquent que la quantité moyenne de potassium disponible dans le sol varie en fonction de la saison culturale, des doses d'engrais potassique appliquées, ainsi que de l'interaction niveau de K/saison. Les résultats montrent également que la quantité de

potassium disponible dans le sol après la récolte a été significativement influencée par les niveaux d'application d'engrais potassique au cours des deux années d'expérimentation ($p \leq 0,05$). Cette tendance est également observée pour la saison culturale et l'interaction niveau de K*saison, mais dans ce cas, les différences sont hautement et très hautement significatives, respectivement ($p \leq 0,01$; $p \leq 0,001$). Les taux d'engrais potassiques ont influencé les niveaux de potassium disponible dans le sol. Les niveaux les plus élevés de potassium disponible ont été obtenus avec le niveau d'application de 400 kg de k_2O ha^{-1} , avec des valeurs de 144,3 mg kg^{-1} pour la première année et 109,22 mg kg^{-1} pour la deuxième année. En revanche, les niveaux les plus bas ont été enregistrés dans les parcelles de contrôle, atteignant 81,9 mg kg^{-1} pour la première année et 74,1 mg kg^{-1} pour la deuxième année. Il est important de souligner que l'application de 300 kg de k_2O ha^{-1} a également permis d'obtenir une concentration équivalente à celle mesurée dans les parcelles témoins, mais uniquement au cours de la première année de l'expérience. Ces résultats indiquent clairement l'importance de l'application d'engrais potassiques pour augmenter la disponibilité du potassium dans le sol, ce qui peut avoir des effets positifs sur la croissance et la production des cultures qui y sont cultivées.

Tableau 6. Teneur en potassium assimilable après la récolte (meq/100 g de sol).

Saison	K-Niveau	Moyenne de K assimilable (mg kg^{-1})
2020/2021	K0	81.9 ^{cd}
	K1	89.7 ^c
	K2	85.8 ^c
	K3	81.9 ^a
	K4	144.3 ^a
2021/2022	K0	74.1 ^d
	K1	78.01 ^{cd}
	K2	78.39 ^{cd}
	K3	85.85 ^c
	K4	109.22 ^b
Valeur P	Saison de culture	0.01
	K-Niveau	0.02
	K-Niveau*Saison	0.001
	Interaction	

Dans une colonne, des lettres différentes indiquent des différences significatives à $p < 0,05$. k0 : 0 kg k_2O ha^{-1} : contrôle (pas d'application d'engrais potassique) ; K1 : 100 kg k_2O ha^{-1} ; K2 : 200 kg k_2O ha^{-1} ; K3 : 300 kg k_2O ha^{-1} ; K4 : 400 kg k_2O ha^{-1} .

9. RENDEMENT ET ANALYSES DE CORRELATION AVEC LA LONGUEUR DES EPIS ET LE POIDS DE MILLE GRAINS

Dans cette étude, des données ont été collectées sur deux caractéristiques agronomiques du blé dur, telles que la longueur des épis et le poids de mille grains. Ensuite, ces données ont été analysées afin d'évaluer leur corrélation avec le rendement en grains. Pour ce faire, une régression linéaire simple a été utilisée, une méthode statistique couramment utilisée pour évaluer la relation entre deux variables. La figure 32, présente les résultats de cette analyse, indiquant la relation entre les deux caractéristiques agronomiques mentionnées précédemment et le rendement en grains. Les résultats montrent que le rendement en grain est fortement corrélé avec le poids de mille grains ($r^2 = 0,91$) ainsi qu'avec la longueur des épis ($r^2 = 0,90$ ***). Ainsi, cette étude a permis de déterminer si la longueur de l'épi et le poids de mille grains étaient des indicateurs fiables du rendement en grains, ce qui peut être utile pour sélectionner les variétés de blé les plus performantes et optimiser les pratiques agricoles afin d'augmenter le rendement en grains.

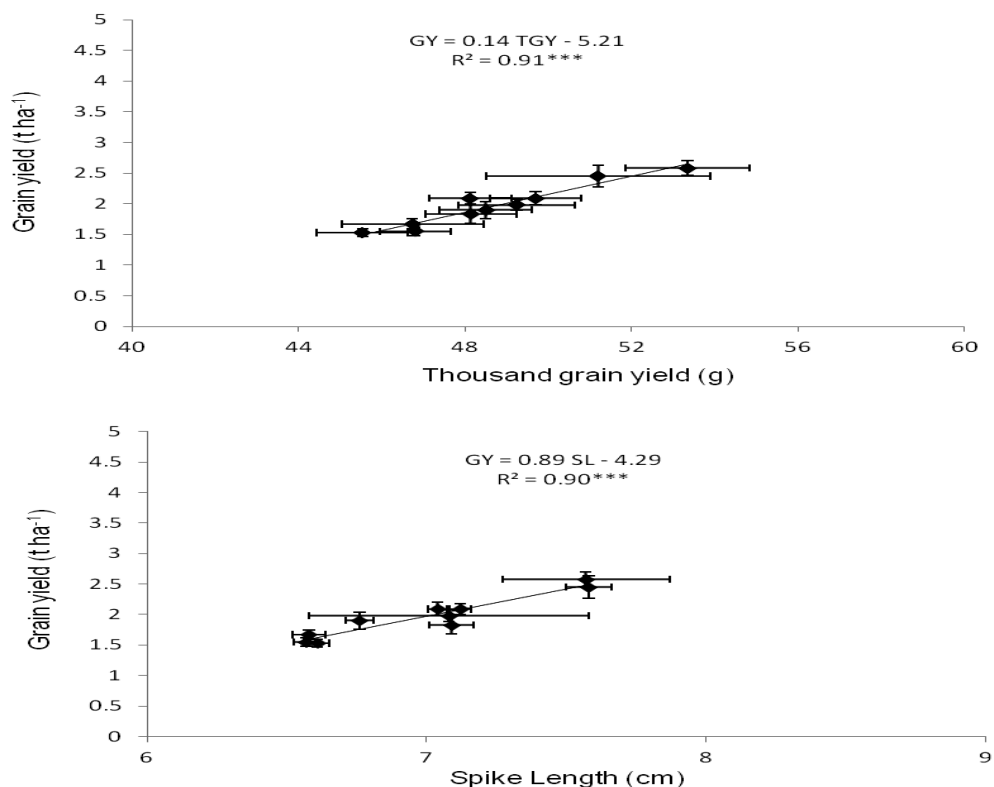


Figure 32. Équations de régression pour la relation entre le rendement en grains (Rdt), la longueur des épis (LE) et le poids de mille grains (PMG). L'astérisque "***" indique une différence significative $p \leq 0,001$, respectivement.

Toutes les données tracées sont la moyenne de 5 répétitions pour chaque variable mesurée. Une régression linéaire a été établie entre Rdt et les valeurs moyennes de LE et PMG mesurées au cours des deux saisons de culture et sous chaque traitement de niveau K. Les barres représentent les erreurs standard de cinq répétitions. Les barres représentent les erreurs standard de cinq répétitions des valeurs moyennes de Rdt (barre verticale) ou de LE et PMG (barre horizontale).

DISCUSSION

A partir des paramètres étudiés dans cette étude, il a été constaté que l'application d'une dose de potassium de $100 \text{ kg } \text{k}_2\text{O ha}^{-1}$ permet d'obtenir les rendements en grains et les teneurs en protéines les plus élevés (Tableaux 3 et 4). En effet, cette teneur a conduit à une augmentation du rendement de 600 kg ha^{-1} , ce qui correspond à un indice de productivité de 6 kg de grains par kg de k_2O . Dans les régions de climat méditerranéen, la pratique de la fertilisation potassique est essentielle pour maximiser le rendement en grains d'une culture. Cependant, son efficacité dépend des conditions hydriques de la plante.

Il est également important de rappeler que le sol de la parcelle expérimentale manque de potassium assimilable et que même à la récolte, sa teneur en potassium disponible n'atteint pas la norme de Mutcher qui recommande un niveau optimal de 0,55 meq/100 g de sol (Mutcher., 1977). Les niveaux d'engrais potassiques utilisés sont insuffisants pour atteindre une fertilité potassique optimale, principalement en raison de l'élimination des cultures et du phénomène de rétrogradation du potassium dans le sol (Quemener et Bosc., 1988).

En outre, il convient de noter que les conditions climatiques de la région au cours des deux années d'expérimentation ont été favorables et que la quantité totale de précipitations pour le cycle végétatif du blé n'a été que de 330,7 mm la première année et de 320,8 mm la deuxième année, ce qui est nettement insuffisant par rapport aux besoins typiques d'une culture céréalière, estimés à environ 450 mm tout au long de son cycle de croissance (Quemener et Bosc., 1988). Le manque d'eau pendant la phase de croissance a entraîné une absorption déséquilibrée des nutriments vitaux, ce qui a empêché la plante de croître et de se développer normalement, d'où une hauteur limitée. L'effet négatif des engrais K sur la hauteur des plantes a été confirmé par ce résultat, qui est cohérent avec les conclusions de (Hefni., 2021).

Les résultats de l'étude montrent que le nombre de grains par épi et le nombre d'épillets par épi n'ont pas montré de différence significative avec les différentes doses d'engrais potassiques utilisées. Cependant, la longueur des épis, la hauteur des plantes, le col des épis et le nombre d'épis par m^2 ont montré des différences statistiquement significatives avec l'influence des trois doses de potassium. Il est important de noter que ces résultats divergent significativement de ceux obtenus dans l'étude précédente menée par Maurya et al. (2014) pour des paramètres qui n'ont pas montré de différences significatives. En même temps, les résultats sont cohérents pour les paramètres qui ont montré des différences significatives.

Les recherches menées par Lateef et Altamimi (2016) ont montré que la fertilisation potassique peut améliorer les paramètres agronomiques malgré les contraintes hydriques. Selon ces études, l'application d'engrais potassique à des doses de $100 \text{ kg } k_2O \text{ ha}^{-1}$ et $200 \text{ kg } k_2O \text{ ha}^{-1}$ permet d'optimiser certains paramètres agronomiques tels que la longueur des épis ($200 \text{ kg } k_2O \text{ ha}^{-1}$) et le col des épis ($100 \text{ kg } k_2O \text{ ha}^{-1}$). Ces résultats sont encourageants pour les agriculteurs qui doivent faire face à des conditions climatiques difficiles tout en cherchant à améliorer leur production. Cependant, le potassium n'avait pas un effet significatif sur d'autres traits morphologiques tels que : nombre des plantes/ m^2 , nombre des talles / m^2 , La surface foliaire, Rendement en paille, et l'indice de récolte, malgré les bons résultats enregistrés avec les doses faibles de K de 100 et $200 \text{ Kg } K_2O \text{ ha}^{-1}$.

Selon les travaux de Samar Raza et al.(2013), ainsi que de Faisal Mihbes Al-Taher et Howraa Hussein AL-Naser (2021), l'application d'une fertilisation potassique peut également améliorer les rendements agricoles. Toutefois, la quantité optimale de fertilisation varie en fonction des paramètres de rendement. Pour la teneur en matière sèche, la valeur la plus élevée est obtenue avec une dose de $200 \text{ kg } k_2O \text{ ha}^{-1}$, tandis que pour d'autres caractéristiques telles que le poids de 1000 grains, le rendement en grains et la teneur en protéines, la dose optimale est de $100 \text{ kg } k_2O \text{ ha}^{-1}$.

Les résultats des recherches ont démontré que le potassium joue un rôle important dans l'efficacité de l'utilisation de l'eau par les plantes, en améliorant leur croissance et leur division cellulaire, ainsi que la production de protéines et d'hydrocarbures qui sont rapidement transférés aux grains (Arif et al., 2017). Les niveaux d'engrais potassique ont également eu un effet significatif sur le poids de mille grains ($p < 0,05$), ce qui est cohérent avec les résultats de Ghulam et al. (2018). Cependant, le rendement en grains le plus élevé a été obtenu avec une dose de $100 \text{ kg } k_2O \text{ ha}^{-1}$ au cours des deux campagnes, ce qui semble être relativement

faible par rapport aux années où les conditions météorologiques sont favorables (Djermoun., 2009). Le rendement de la culture a augmenté de 0,6 t ha⁻¹ par rapport à l'essai témoin la première année et de 0,54 t ha⁻¹ la deuxième année. Ces résultats sont en accord avec les conclusions de (Mirza et al., 2018) , qui confirment que le potassium est directement ou indirectement responsable de cette augmentation de rendement en régulant la biosynthèse, la conversion et l'allocation des métabolites. En outre, ces résultats sont cohérents avec ceux de Ghulam et al. (2018) ainsi qu'avec ceux de Mohamad Javad Raisi et Enayatollah Tohidi-Nejad (2012).

L'application de différents niveaux d'engrais potassique a eu un impact significatif sur la teneur en protéines du grain ($p \leq 0,05$), qui est un paramètre de qualité clé du blé étudié. Ce résultat est en accord avec celui rapporté par Alam et al. (2009). Cependant le potassium n'a pas montré un effet significatif sur les autres paramètres qualitatifs tels que : Le Mitadinage, La moucheture, La vitrosité , l'indice de jaun et brun, malgré les bons résultats enregistrés avec la dose de 100 kg k₂O ha⁻¹ en comparaison avec les autres doses de K et le témoin.

Pour une nutrition optimale, il semble que l'application de 100 kg de K₂O ha⁻¹ soit suffisante pour atteindre des niveaux de potassium adéquats avec une teneur en K₂O foliaire $\geq 2,30\%$ (Loue., 1967). De même, ce supplément semble également suffisant pour atteindre des niveaux d'azote adéquats dans les feuilles avec une teneur en K₂O $\geq 2,50\%$ (Loue., 1967). Selon les résultats de cette présente étude, nous suggérons que la teneur en potassium du sol serait suffisante pour répondre aux besoins nutritionnels de la plante, ce qui favoriserait une croissance saine et optimale. Toutefois, il convient de noter que les besoins en potassium peuvent varier en fonction de divers facteurs tels que le type de culture, les conditions environnementales et les pratiques de gestion du sol. Il est donc important d'évaluer les besoins en potassium de chaque culture spécifique avant de déterminer le taux d'application optimal.

Les résultats de l'analyse de régression ont montré une corrélation positive entre le rendement en grains, la longueur des épis et le poids de mille grains. Ces caractéristiques végétales sont donc considérées comme des facteurs clés pour l'amélioration des rendements et la sélection de génotypes de blé mieux adaptés aux conditions de faible teneur en potassium et de déficit hydrique. En conclusion, on peut dire que le rendement en grains s'est amélioré tout au long du développement du blé. Les résultats obtenus par Kaur (2019) ont montré des corrélations positives similaires pour le blé, indiquant que l'augmentation du rendement en grain suite aux

traitements à l'engrais K était principalement due à une augmentation du poids de mille grains. D'autre part, de nombreuses études ont également noté une corrélation positive entre le rendement en grains et la longueur de l'épi (Kaur, 2019), ce qui est cohérent avec nos propres résultats.

Les principaux résultats de cette recherche suggèrent que l'application raisonnée de la fumure potassique sur les cultivars de blé dur peut améliorer la croissance des caractères morphologiques et la qualité du rendement. Cependant, cette amélioration dépend de l'eau de la plante et des conditions météorologiques saisonnières. Il a été observé qu'une dose d'engrais potassique de $100 \text{ kg } \text{K}_2\text{O } \text{ha}^{-1}$ est suffisante pour obtenir un rendement en grain satisfaisant dans les conditions de l'étude. Il convient de noter que la quantité optimale d'engrais potassique peut varier en fonction des conditions environnementales et des propriétés du sol (les propriétés physiques, chimiques et biologiques). Ainsi, un taux plus élevé que celui recommandé peut ne pas conduire à une augmentation significative du rendement et peut même entraîner une perte d'éléments nutritifs en raison d'un lessivage excessif. En outre, la plante peut ne pas assimiler correctement les nutriments, ce qui peut entraver sa croissance et son développement et entraîner de faibles rendements. Il est donc important d'ajuster la quantité d'engrais potassique en fonction des besoins de chaque parcelle afin d'optimiser la production végétale. En outre, l'application d'engrais potassique ne doit pas être considérée comme la seule solution pour améliorer les rendements. D'autres pratiques culturales, telles que la gestion de l'eau, la rotation des cultures, la protection des plantes et l'utilisation d'autres types d'engrais, peuvent également avoir un impact significatif sur la production de blé dur. Il est donc important de prendre en compte ces facteurs dans une approche globale afin de maximiser les rendements et de préserver la santé des sols.

CONCLUSION

La production céréalière reste insuffisante pour répondre aux besoins des populations de nombreux pays, en particulier en Algérie.

L'amélioration des rendements constitue un objectif pour augmenter la production. De nombreux facteurs de production conditionnent le rendement, parmi lesquels la fumure joue un rôle essentiel. La pratique de la fumure potassique est peu répandue en Algérie bien que le potassium constitue un élément majeur essentiel de la nutrition minérale des végétaux.

La présente recherche porte sur un essai en plein champ de l'effet de doses croissantes d'un engrais potassique sur le comportement d'un cultivar de blé dur.

Les principaux résultats obtenus montrent que :

- Sur le plan quantitatif, il a été constaté que l'application d'une dose de potassium de 100 kg K_2O ha^{-1} permet d'obtenir les rendements en grains et les teneurs en protéines les plus élevés. En effet, cette teneur a conduit à une augmentation du rendement de 600 kg ha^{-1} , ce qui correspond à un indice de productivité de 6 kg de grains par kg de K_2O .

- Sur le plan qualitatif, l'application de différents niveaux d'engrais potassique a eu un impact significatif sur la teneur en protéines du grain ($p \leq 0,05$), qui est un paramètre de qualité clé du blé étudié. Cependant le potassium n'a pas montré un effet significatif sur les autres paramètres qualitatifs tels que : Le Mitadinage, La mouchture, La vitrosité, l'indice de jaun et brun, malgré les bons résultats enregistrés avec la dose de 100 kg K_2O ha^{-1} en comparaison avec les autres doses de K et le témoin.

Bien que les taux de potassium appliqués soient adéquats pour répondre aux besoins en nutriments du blé dur, ils ne sont pas suffisants pour améliorer la fertilité potassique du sol de la parcelle. Ainsi, afin de maintenir une productivité optimale de la culture du blé et la fertilité du sol à long terme, il est essentiel de compenser les pertes de potassium causées par les cultures et les conditions climatiques telles que le déficit hydrique, en appliquant une fertilisation potassique équilibrée et adéquate. Malgré la pénurie d'eau au cours de la période d'étude, l'application d'une fertilisation potassique a entraîné une amélioration significative de la production, tant en termes de quantité (rendement en grains) que de qualité (qualité des grains, mesurée par la teneur en protéines). Ces résultats peuvent être extrapolés à d'autres types de sol dans cette région et à d'autres géotypes de blé dans des expériences futures.

Dans les régions de climat méditerranéen, la pratique de la fertilisation potassique est essentielle pour maximiser le rendement en grains d'une culture. Cependant, son efficacité dépend des conditions hydriques de la plante.

Références

1. Abd Elliche, M., Ferkhi ,A. (2018). Contribution à l'étude et l'optimisation de la fertilisation minérale du blé dur (*Triticum durum* Desf). Mémoire Ingénieur, Université des Frères Mentouri constantine 1, P 1- 104.
2. Abdellaoui, Z. (2007). Etude de l'effet de la fertilisation azotée sur les propriétés technofonctionnelles des protéines de blé (Doctoral dissertation, INA).
3. Adams F.1971. Soil solution. In: Carson EW, ed. The plant root and its environment. Charlottesville, VA: University Press of Virginia, 441–481.
4. Aissa, A. D., & Mhiri, A. (2002). Fertilisation phospho-potassique du blé dur en culture intensive en Tunisie. Cahiers Agricultures, 11(6), 391-397.
5. Ait-Slimane-Ait-Kaki, S. (2008). Contribution à l'étude de l'interaction génotype x milieu, pour la qualité technologiques chez le blé dur en Algérie (Doctoral dissertation, Thèse Doctorat es Sciences. Univ. Annaba).
6. Akhtar, N., Ilyas, N., Arshad, M., Meraj, T. A., Hefft, D. I., Jan, B. L., & Ahmad, P. (2022). The impact of calcium, potassium, and boron application on the growth and yield characteristics of Durum Wheat under Drought conditions. *Agronomy*, 12(8), 1917.
7. Alam, M. R., Ali, M. A., Molla, M. S. H., Momin, M. A., & Mannan, M. A. (2009). Evaluation of different levels of potassium on the yield and protein content of wheat in the high Ganges river floodplain soil. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*, 34(1), 97-104.
8. Al-Taher, F. M., & Al-Naser, H. H. (2021, November). The Effect of different Levels of Potassium on the Productivity of Genotypes of Wheat *Triticum Aestivum* L. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 923, No. 1, p. 012061). IOP Publishing.
9. ALtamimi, D. A., & Lateef, N. S. (2016). Effect of Potassium Fertilization Level and Moisture Stress on Growth of Wheat Plant (*Triticum aestivum* L.). *Diyala Agricultural Sciences Journal*, 8(2), 125-132.
10. Amokrane, A., Bouzerzour, H., Benmahammed, a., Djekoun, a., & Mekhlouf, a. (2002). Etude comparative des varietes de ble dur (*triticum durum* desf.) D'origine algerienne, syrienne et europeenne sous climat de type mediterraneen. *Sciences & Technologie. C, Biotechnologies*, 33-38.

11. Arif, M., Tasneem, M., Bashir, F., Yaseen, G., & Anwar, A. (2017). Evaluation of different levels of potassium and zinc fertilizer on the growth and yield of wheat. *Int J Biosen Bioelectron*, 3(2), 1-5.
12. Ashley, M. K., Grant, M., & Grabov, A. (2006). Plant responses to potassium deficiencies: a role for potassium transport proteins. *Journal of experimental botany*, 57(2), 425-436.
13. Baghdali, L. (1991). Irrigation of cereals in Algeria. In *Supplemental Irrigation in the Near East and North Africa: Proceedings of a Workshop on Regional Consultation on Supplemental Irrigation*. ICARDA and FAO, Rabat, Morocco, 7–9 December, 1987 (pp. 315-325). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-3766-9_18.
14. Belagrouz, A. (2021). Etude des caractéristiques liées à l'efficacité d'utilisation de l'eau chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) (Doctoral dissertation).
15. Belaid, D. (1986). Aspects de la céréaliculture Algérienne.
16. Belaid, D. (2017). Algérie: revoir la fertilisation potassique des céréales. *Collection Brochures Agronomiques*, 1-9.
17. Bellout, A., Vaz, E., & Penfound, E. (2020). Rethinking agricultural land use in Algiers: A spatial analysis of the Eastern Mitidja Plain. *Habitat International*, 104, 102239.
18. Benbelkacem, A., Saldi, F., & Brinis, L. (1995). La recherche pour la qualité des blés durs en Algérie. *Options Méditerranéennes CIHEAM, Série A, Séminaires Méditerranéen*, 61-65.
19. Benmoussa, m. (1999). Production d'une glutenine à faible poids moléculaire dans les feuilles de la luzerne et les tubercules.
20. Bonnot, T. (2016). Réponse du grain de blé à la nutrition azotée et soufrée: étude intégrative des mécanismes moléculaires mis en jeu au cours du développement du grain par des analyses-omiques (Doctoral dissertation, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II).
21. Boukhalifa-deraoui, n. (2016). Fertilisation phosphatée d'une culture de blé dur (*Triticum durum* Desf. Variété Carioca) irriguée, en milieu saharien (El-Menia) (Doctoral dissertation, ENSA).
22. Boulelouah, N., Berbache, M. R., Bedjaoui, H., Selama, N., & Rebouh, N. Y. (2022). Influence of Nitrogen Fertilizer Rate on Yield, Grain Quality and Nitrogen Use Efficiency of Durum Wheat (*Triticum durum* Desf) under Algerian Semiarid Conditions. *Agriculture*, 12(11), 1937.

23. Bozzini, A. (1988). Origin, distribution, and production of durum wheat in the world. In: *Durum Wheat: Chemistry & Technology*. Fabriani G., Lintas C. (eds), Am. Assoc. Cereal Chem.: St. Paul, MN., pp. 1-16.
24. Chabi, H., Derouiche, M., Kafi, M., & Khilassi, E. (1992). Estimation du taux d'utilisation du potentiel de production des terres à blé dur dans le Nord de la wilaya de sétif (Doctoral dissertation, Thèse. Ing. INA. El Harrach. 317p).
25. CHIKHI A. C. (1992). Situation de la céréaliculture et perspectives de l'irrigation de complément du blé au niveau de la Mitidja. Thèse. Ing. INA. El Harrach. 317p.
26. Clement, G. (1971). Les céréales, « grand court ». Coll. Agro. Alimentaire. Lavoisier. Pp. 78-91.
27. Clement, g., et Prats, J. (1970). Les céréales. Collection d'enseignement agricole. 2ème Ed. 351 p.
28. Damon, P. M., & Rengel, Z. (2007). Wheat genotypes differ in potassium efficiency under glasshouse and field conditions. *Australian Journal of Agricultural Research*, 58(8), 816-825.
29. Daoud, Y.; Dogar ; Mokhtar, A. (1985). The potassium regime in several types of soil in the Hodna region (Algeria). *PotashReview*, 6, 1-7.
30. Daoud, Y.; Etourneau, F. (1995). Effect of N.K Fertilization on Yield and Mineral Nutrition of a durum wheat variety grown in Mediterranean Area. *Potash Review*, 2, 1-7.
31. Dhillon, J. S., Eickhoff, E. M., Mullen, R. W., & Raun, W. R. (2019). World potassium use efficiency in cereal crops. *Agronomy Journal*, 111(2), 889-896.
32. Djekoun, a., Ykhlef, n., Bouzerzour, h., Hafsi, m., Hamada, y., Kahali l. (2002). Production du blé dur en zones semi-arides : identification des paramètres d'amélioration du rendement. Act des 3ème Journées Scientifiques sur le blé dur. Constantine.
33. Djermoun, A. (2009). La production céréalière en Algérie: les principales caractéristiques. *Nature & Technology*, (1), 45.
34. Doussinault, G., Pavoine, M. T., Jaudeau, B., & Jahier, J. (2001). Évolution de la variabilité génétique chez le blé. *Dossiers de l'Environnement de l'INRA*, 21, 91-104.
35. Dubcovsky, J. and Dvorak, J. (2007) .Genome plasticity a key factor in the success of polyploid wheat under domestication. *Science*, 316, 1862–1866.
36. El Mouttaqi, A., Mnaouer, I., Nilahyane, A., Belcaid, M., Ibourki, M., Lazaar, K., ... & Hirich, A. (2022). How Does Organic Amendment and NPK Fertilization Improve Forage Yield of Cereals under Salinity and Arid Conditions?: Case of Moroccan Sahara. *Environmental Sciences Proceedings*, 16(1), 51.

37. El-Awaad, I., Bocola, M., Beuerle, T., Liu, B., & Beerhues, L. (2016). Bifunctional CYP81AA proteins catalyse identical hydroxylations but alternative regioselective phenol couplings in plant xanthone biosynthesis. *Nature communications*, 7(1), 11472.
38. Elias, E. M., & Manthey, F. A. (2005). End products: Present and future uses. *Durum wheat breeding: current approaches and future strategies*, 1, 63-85.
39. Feillet, P. (2000). *Le grain de blé: composition et utilisation*. Editions Quae.
40. Feldman, M., & Sears, E. R. (1981). The wild gene resources of wheat. *Scientific American*, 244(1), 102-113.
41. Ferret, M. (1996). *Blé dur, objectif qualité*. Ed. ITCF. 43p.
42. Gate p., Vignier l, Vadon b., Souici d., Minkov d., Lafarga a., Zairi m. (1997). Céréales en milieu méditerranéen. Un modèle pour limiter les risques climatiques. *Perspectives agricoles*. 217 : 59-70.
43. Gherairia Ibtissem, Z. F. (2018). Effet de la fertilisation sur la culture de blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans la région de Guelma.
44. Ghulam, M.K. ; Khalid, H.T.; Nawaz, M. K.; Shahneela, K.; Nizamani, M.M.; Kubar, M.S.; Kubar, K.A.; Kubar, A.A. (2018).Effect of potassium (K⁺) on growth, yield components and macronutrient accumulation in Wheat crop. *Pure and AppliedBiology*, 8 (1) 248-255. <http://dx.doi.org/10.19045/bspab.2018.700183>.
45. Gu, X., Liu, Y., Li, N., Liu, Y., Zhao, D., Wei, B., & Wen, X. (2021). Effects of the foliar application of potassium fertilizer on the grain protein and dough quality of wheat. *Agronomy*, 11(9), 1749.
46. Haddad, l.,salmi, m., benmahammed, a., &bouzerzour, h. (2021). Place de la variete locale de ble dur (*triticumdurum* l. var mohamed ben bachir) parmi les varietes phares et la nouvelle obtention 'boutaleb'dans la region semi-aride de setif en algerie.
47. Halilat, M. T. (2004, November). Effect of potash and nitrogen fertilization on wheat under Saharan conditions. In IPI regional workshop on Potassium and Fertigation development in West Asia and North Africa. Rabat, Morocco (pp. 24-28).
48. Hamadache, A. (2013).Grandes Cultures. Livre Tome I : le blé, P 256.
49. Hartati, S., & Purnomo, D. (2018, March). Effectiveness and efficiency of potassium fertilizer application to increase the production and quality of rice in entisols. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 142, No. 1, p. 012031). IOP Publishing.

50. Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. B., Nahar, K., Hossain, M. S., Mahmud, J. A., Hossen, M. S., ... & Fujita, M. (2018). Potassium: a vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses. *Agronomy*, 8(3), 31. DOI:10.3390/agronomy8030031.
51. Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Møller, I. S., & White, P. (2012). Functions of macronutrients. In Marschner's mineral nutrition of higher plants (pp. 135-189). Academic press.
52. Hawkesford, M.J. (2014). Reducing the Reliance on Nitrogen Fertilizer for Wheat Production. *Journal of Cereal Science*, 59, 276-283. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcs.2013.12.001>.
53. Hefny, Y. A. M. (2021). Response of some durum wheat genotypes (*Triticum durum* Desf.) for Potassium fertilization levels in newly reclaimed soil. *Scientific Journal of Agricultural Sciences*, 3(1), 66-78. DOI: 10.21608/sjas.2021.59780.1066.
54. Hermans, C., Hammond, J. P., White, P. J., Verbruggen, N. (2006). How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation? *Trends Plant Sci.* 11, 610–617.
55. Houassine, D., Latati, M., Rebouh, N. Y., & Gérard, F. (2019). Phosphorus acquisition processes in the field: study of faba bean cultivated on calcareous soils in Algeria. *Archives of Agronomy and Soil Science*. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1605166>.
56. <https://https://fertilisation-edu.fr/>.
57. [https:// www. Syngenta.fr/ Agriculture durable/ reglementation dossier –bbch/ Article/ Echelle- bbch- céréales](https://www.Syngenta.fr/Agriculture%20durable/reglementation%20dossier%20bbch/Article/Echelle-bbch-c%C3%A9reales).
58. https://agriculture.basf.com/global/en/innovations-for-agriculture/Hybrid_Wheat.html.
59. [https://madr.gov.dz/Statistique agricole 2022.](https://madr.gov.dz/Statistique%20agricole%202022), Série B.
60. <https://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/fr/2019>.
61. Jiang, B.; Tsao, R.; Li, Y.; Miao, M. (2014). Encyclopedia of Agriculture and Food Systems. *Food Science*, 273-288. DOI: 10.1016/B978-0-444-52512-3.00052-8.
62. Jordan-Meille, L., Martineau, E., Bornot, Y., Lavres, J., Abreu-Junior, C., Domec, J. C. (2018). How does water-stressed corn respond to potassium nutrition? A shoot-root scale approach study under controlled conditions. *Agriculture* 8, 180. doi: 10.3390/agriculture8110180.
63. Kaur, H. (2019). Forms of Potassium in Soil and their Relationship with Soil Properties-A Review. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 8(10), 1580-1586. DOI: [10.20546/ijcmas.2019.810.184](https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.810.184).

64. Kherif, O., Seghouani, M., Zemmouri, B., Bouhenache, A., Keskes, M. I., Yacer-Nazih, R., ... & Latati, M. (2021). Understanding the response of wheat-chickpea intercropping to nitrogen fertilization using agro-ecological competitive indices under contrasting pedoclimatic conditions. *Agronomy*, 11(6), 1225. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061225>.
65. Kourat, T., Smadhi, D., & Madani, A. (2022). Modeling the Impact of Future Climate Change Impacts on Rainfed Durum Wheat Production in Algeria. *Climate*, 10(4), 50. <https://doi.org/10.3390/cli10040050>.
66. Laala, Z. (2018). Sélection du blé dur (*Triticum turgidum* var *durum* L.) pour L'adaptation aux conditions semi-arides (Doctoral dissertation).
67. Ladraa, N. (2012). Aptitude à la panification de quelques variétés de blé dur Algérien (Doctoral dissertation).
68. Laib, S. (2011). Contribution à l'étude de l'influence des types et doses d'engrais phosphatés sur le prélèvement du potassium par une culture de blé dur dans la région d'El Goléa (Doctoral dissertation, UNIVERSITE KASDI MERBAH-OUARGLA).
69. Latati, M., Rebouh, N. Y., Aouiche, A., & Laouar, M. (2019). Modeling the functional role of the microorganisms in the daily exchanges of carbon and nitrogen in intercropping system under Mediterranean conditions. <https://doi.org/10.15159/AR.19.050>.
70. Lotfi, R., Abbasi, A., Kalaji, H. M., Eskandari, I., Sedghieh, V., Khorsandi, H., ... & Rastogi, A. (2022). The role of potassium on drought resistance of winter wheat cultivars under cold dryland conditions: Probed by chlorophyll a fluorescence. *Plant Physiology and Biochemistry*, 182, 45-54.
71. Loue, A. (1967). Le diagnostic foliaire du blé : ses difficultés en ce qui concerne en particulier le potassium dans les essais factoriels azote x potasse. O.R.S.T.O.M, France, N° 28289, cote B.
72. Loue, A. (1967). Le diagnostic foliaire du blé : ses difficultés en ce qui concerne en particulier le potassium dans les essais factoriels azote x potasse. In : Le contrôle de l'alimentation des plantes cultivées. Colloque Européen et Méditerranéen, France, 12 p.
73. Lu, Q., Jia, D., Zhang, Y., Dai, X., & He, M. (2014). Split application of potassium improves yield and end-use quality of winter wheat. *Agronomy Journal*, 106(4), 1411-1419. <https://doi.org/10.2134/agronj13.0202>.
74. Lynch, J.M.; Barbano, D.M. (1999). Kjeldahl nitrogen analysis as a reference method for protein determination in dairy products. *J. AOAC Int*, 82, 1389–1398.

75. Malakouti, M. J., & Majidi, A. (2019). Effect of Potassium Fertilizers Management on Some Quantitative and Qualitative Characteristics of Wheat. *Water and Soil*, 33(4), 635-645. DOI : [10.22067/JSW.V0I0.79599](https://doi.org/10.22067/JSW.V0I0.79599).
76. Martineau, E. (2016). Rôle joué par le potassium dans la réponse au déficit hydrique du maïs (*Zea mays* L.): des mécanismes physiologiques au fonctionnement intégré du peuplement (Doctoral dissertation, Université des Sciences et Technologies (Bordeaux 1)).
77. Maurya, P., Kumar, V., Maurya, K. K., Kumawat, N. A. R. E. N. D. R. A., Kumar, R. A. K. E. S. H., & Yadav, M. P. (2014). Effect of potassium application on growth and yield of wheat varieties. *The Bioscan*, 9(4), 1371-1373.
78. McBratney, A. B., Odeh, I. O., Bishop, T. F., Dunbar, M. S., & Shatar, T. M. (2000). An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma*, 97(3-4), 293-327.
79. Mecha, B., Alamerew, S., Assefa, A., Dutamo, D., & Assefa, E. (2017). Correlation and path coefficient studies of yield and yield associated traits in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. *Adv Plants Agric Res*, 6(5), 128-136. DOI: [10.15406/apar.2017.06.00226](https://doi.org/10.15406/apar.2017.06.00226).
80. Mekhlouf, A., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., Sahraoui, A. H., & Harkati, N. (2006). Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 17(4), 507-513.
81. Mekhlouf, A., Bouzerzour, H., Dehbi, F., & Hannachi, A. (2001). Rythme de développement et variabilité de réponses du blé dur (*Triticum durum* Desf.) aux basses températures. Tentatives de sélection pour la tolérance au gel. In *Proceeding séminaire sur la valorisation des milieux semi-arides*. Oum El Bouaghi (Vol. 23, pp. 75-80).
82. Mélanie, C. (2014). Cycle biogéochimique du potassium sur le site expérimental de Skogaby : une approche par mesures du rapport K/Rb. *Sciences de la Terre*. fhal-01841107f
83. MERIZEK, S.(1992). Evolution de la biomasse et des composantes du rendement d'une culture de blé conduite en sec et en irrigué. Thèse Ing. INA El Harrach. P.10.
84. Moiloud, A. M., Karim, O. A., & Youcef, D. (2017). Evaluation du statut potassique des sols salés du Bas-Cheliff. *Nature & Technology*, (16), 8F.
85. Monneveux, P., & Nemmar, M. (1986). Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) et chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.): étude de l'accumulation de la proline au cours du cycle de développement. *Agronomie*, 6(6), 583-590.

86. Morot-Gaudry, J. F. (1997). Assimilation de l'azote chez les plantes: aspects physiologique, biochimique et moléculaire. *Assimilation de l'azote chez les plantes*, 1-424.
87. Mosiniak, M., Roger, P., Jean-Claude, R. (2005). Du blé au pain. "Site plant vie.ensa.fr" ..
88. Mutscher, H. (1977). The potassium metabolism of typical northern Algerian soils. I. Global evaluation of the potassium supply of soils. *Beitrag zur Tropischen Landwirtschaft und Veterinarmedizin*, 15(4), 361-378.
89. Nechi, C. (2016). Impact de la fertilisation potassique sur le lessivage du potassium sous culture de pomme de terre (Doctoral dissertation, Université Laval).
90. Nedjah, I. (2015). Changements physiologiques chez des plantes (Blé dur *Triticum durum* Desf.) exposées à une pollution par un métal lourd (plomb). Thèses de doctorat, département de biologie, Université BADJI Mokhtar de Annaba, 101.
91. Oosterhuis, D. M., Loka, D. A., & Raper, T. B. (2013). Potassium and stress alleviation: Physiological functions and management of cotton. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 176(3), 331-343.
92. Ould Amer, S., Aliat, T., Kucher, D. E., Bensaci, O. A., & Rebouh, N. Y. (2023). Investigating the Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Mitigating Water Deficit Effects on Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.). *Agriculture*, 13(3), 552.
93. Panayotova, G. D., Bozhanova, V. Z., Kostadinova, S. S., Valkova, N. K., & Almaliev, M. (2014). Response of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivar progress to foliar feeding. *Journal of International Scientific Publications: Agriculture & Food*, 2, 288-297.
94. Pettigrew, W. T. (2008). Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. *PhysiolPlant* 133:670– 681.
95. Quemener, J.; BOSC, M. (1988). Note on the determination of exchangeable potassium in "phosphorus and potassium in the soil-plant relationship": consequence on fertilization. Ed I.N.R.A, Paris, pp 109–132.
96. Rabi, A. (2021). Changement des caractères morpho-physiologiques induits par la sélection artificielle du blé dur (*Triticum durum* Desf) en Algérie. Thèse doctorat, Uni.Ferhat Abbas ,sétif 1, P : 1-183.
97. Raisi, M. J., & Tohidi-Nejad, E. (2012). Effect of Organic Manure and foliar potassium application on yield performance of wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.). *Int. Res. J. Appl. & Basic Sci*, 3(2), 286-291.

98. Raza, S., Farrukh Saleem, M., Mustafa Shah, G., Jamil, M., & Haider Khan, I. (2013). Potassium applied under drought improves physiological and nutrient uptake performances of wheat (*Triticum Aestivum* L.). *Journal of soil science and plant nutrition*, 13(1), 175-185. DOI : 10.4067/S0718-95162013005000016.
99. Rebouh, N. Y., Aliat, T., Polityko, P. M., Kherchouche, D., Boulelouah, N., Temirbekova, S. K., ... & Gadzhikurbanov, A. S. (2022). Environmentally Friendly Wheat Farming: Biological and Economic Efficiency of Three Treatments to Control Fungal Diseases in Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.) under Field Conditions. *Plants*, 11(12), 1566.
100. Rebouh, N. Y., Zargar, M., Pakina, E., Aabelaziz, N., Astrakhanova, T., & Chuburkova, S. (2018). Analysis of various cultivars of durum wheat cultivated in the highlands of Algeria condition. *Research on Crops*, 19(2), 200-204. DOI : [10.5958/2348-7542.2018.00029.3](https://doi.org/10.5958/2348-7542.2018.00029.3).
101. Rharrabti, Y., del Moral, L. G., Villegas, D., & Royo, C. (2003). Durum wheat quality in mediterranean environments: III. Stability and comparative methods in analysing G× E interaction. *Field Crops Research*, 80(2), 141-146.
102. Ruan, L., Zhang, J., Xin, X., Zhang, C., Ma, D., Chen, L., & Zhao, B. (2015). Comparative analysis of potassium deficiency-responsive transcriptomes in low potassium susceptible and tolerant wheat (*Triticum aestivum* L.). *Scientific Reports*, 5(1), 1-13.
103. Salmé, M., & Merbah, S. M. E. M. (2015). Etude de la qualite globale de semoules du commerce algerien. *Mém. d'ingeniorat en agronomie ,specialite: technologie alimentaire, Uni.UMMTO*, P87.
104. Schvartz, C., Decroux, J., & Muller, J. C. (2005). *Guide de la fertilisation raisonnée: grandes cultures et prairies*. France Agricole Editions.
105. Sedri, M. H., Roohi, E., Niazian, M., & Niedbała, G. (2021). Interactive effects of nitrogen and potassium fertilizers on quantitative-qualitative traits and drought tolerance indices of rainfed wheat cultivar. *Agronomy*, 12(1), 30. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010030>.
106. Selmi, R. (2000). Fin du mythe de l'autosuffisance alimentaire et place aux avantages comparatifs. *Revue Afrique Agriculture*, (280), 30-23.
107. Syers, J. K., & Ru-kun, L. (1990). Inorganic reactions influencing phosphorus cycling in soils. *Phosphorus requirements for sustainable agriculture in Asia and Oceania*, 191-197.
108. Tanwar, S.P.S. and M.S. Shaktawat, 2003. Influence of sources, levels and solubilizers on yield, quality and nutrient uptake of soybean (*Glycin max*)-wheat (*Triticum aestivum*) cropping system in southern Rajasthan. *Indian J. Agric. Sci.*, 73: 3-7.

109. Tayeb Cherif Nawal, R. S. (2014). Evaluation de quelques lignées de blé tendre (*Triticum aestivum*) dans la région semi-aride de Sétif (Doctoral dissertation).
110. Thornburg, T. E., Liu, J., Li, Q., Xue, H., Wang, G., Li, L., ... & Pan, X. (2020). Potassium deficiency significantly affected plant growth and development as well as microRNA-mediated mechanism in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Frontiers in Plant Science*, 11, 1219.
111. Wakeel, A., Farooq, M., Qadir, M., & Schubert, S. (2011). Potassium substitution by sodium in plants. *Critical reviews in plant sciences*, 30(4), 401-413.
112. Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q., & Guo, S. (2013). The critical role of potassium in plant stress response. *International journal of molecular sciences*, 14(4), 7370-7390.
113. Wani, J. A., Malik, M. A., Dar, M. A., Akhter, F., & Raina, S. K. (2014). Impact of method of application and concentration of potassium on yield of wheat. *Journal of Environmental Biology*, 35(4), 623.
114. Wihardjaka, A., Harsanti, E. S., & Ardiwinata, A. N. (2022). Effect of fertilizer management on potassium dynamics and yield of rainfed lowland rice in Indonesia. *Chilean journal of agricultural research*, 82(1), 33-43. DOI : 10.4067/S0718-58392022000100033.
115. Zargar, M., Rebouh, N., Pakina, E., Gadzhikurbanov, A., Lyashko, M., & Orskhanov, B. (2017). Impact of climate change on cereal production in the highlands of eastern Algeria. *Research on Crops*, 18(4), 575-582.
116. Bould, C. (1975). *Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives*. By Epstein Emanuel. New York: John Wiley (1972), pp. 412, £ 3.85. *Experimental Agriculture*, 11(1), 78-78.

ANNEXES



Photo. Le semoir en ligne utilisé



Photo. Les grains de variété de Blé dur (Simeto) utilisés dans l'expérience.

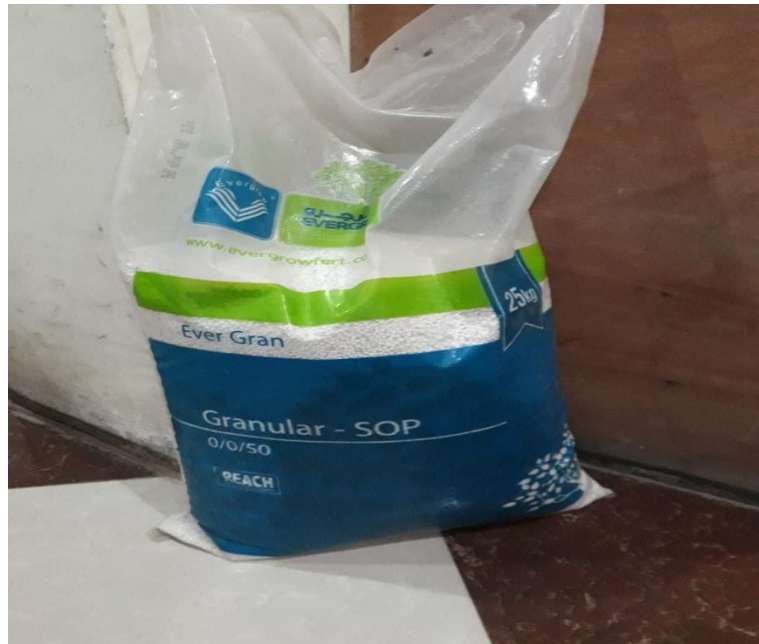


Photo. L'engrais potassique (Sulfate de potassium SOP) utilisé dans l'expérience.



Photo. La suivie de développement de la culture dans la parcelle d'étude.



Photo. Photos de la parcelle au stade épisaison.

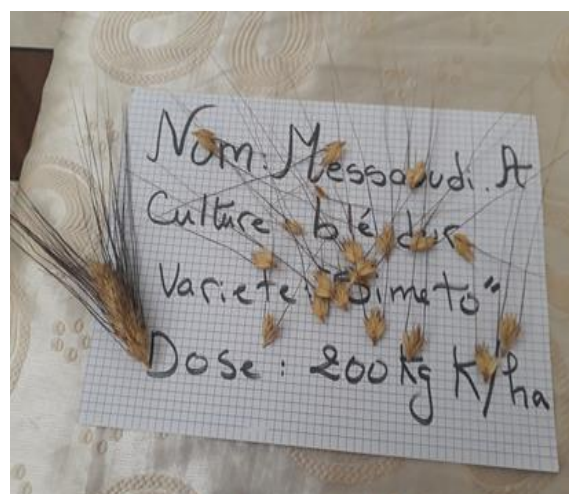
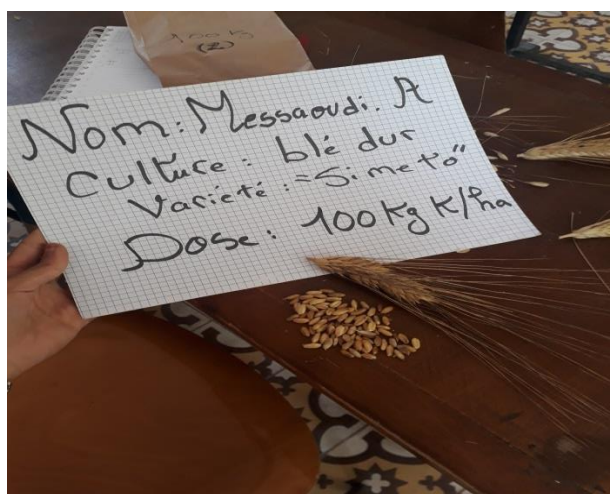


Photo. Comptage de grains par Epis et Nombre des Epillet par Epis.



Photo. Réalisation des paramètres du Mitadinage au niveau de laboratoire.



Photo. Mesure de L'indice de jaune et l'indice de brun des semoules par l'utilisation du Spectrophotomètre.



Photo. Les parcelles au stade maturation.



Photo. La récolte.