

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences Agronomiques



Mémoire de Master Académique
Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie
Filière : Sciences Agronomiques
Spécialité : Gestion des Agrosystèmes

THEME

**Analyse du comportement d'une variété de blé dur *Triticum durum* Var.
Vitron dans deux pivots d'irrigation différents
(Cas de l'exploitation COSIDER AGRICO)**

Présenté par :

M. IHADDADENE Boussaad

Soutenu publiquement :

Le 21/06/2025

Devant le jury :

M.BELAROUCI M. ElHafed

M. DERAOUI Naima

M. BENBRAHIM Keltoum

Président

Promoteur

Examineur

MCA UKM Ouargla

MCA UKM Ouargla

MCA UKM Ouargla

Année Universitaire : 2024/2025

Dédicaces

Je dédie ce travail

A mon cher père BELAID

Ton soutien a toujours été une lumière dans tout mon parcours, ce modeste travail est le fruit de tous les efforts et les sacrifices que tu as fait pour mon éducation et ma formation, je t'aime papa que dieu te garde et te protège.

A ma chère mère SAMIA

Qui a toujours cru a moi et m'a encouragé à poursuivre mes rêves. Sans toi, je n'aurais pas acquis la force et la résilience nécessaire pour aboutir à ce stade, je t'aime maman et j'implore le dieu puissant pour qu'il t'accorde une bonne santé et une vie longue et heureuse.

A ma sœur THAMILA et mon frère ASSALAS

Qui m'ont toujours motivé même dans les moments de doute, un grand merci pour leurs encouragements et leurs soutiens moral que dieu vous protège.

À ma grande famille (paternelle et maternelle)

Qui n'ont jamais cessé de me donner un coup de main, ce travail est le résultat de vos encouragements et soutiens.

À tous ceux qui connaisse et aime Boussaad, avec qui j'ai partagé et j'ai vécu des moments inoubliables de joie et de folie pendant mon parcours éducatif et sportif, votre complicité et votre amabilité ont été précieuses, merci du fond du cœur.

Remerciements

Avant tout nous remercions ALLAH, le tout puissant, de nous avoir donné la force, le courage, la volonté et la patience pour terminer ce modeste travail. Je tiens surtout à adresser mes plus vifs remerciements à Mme BOUKHALFA- DERAOUI N. Maitre de conférences au département des sciences agronomiques à l'université Kasdi Merbah - Ouargla, pour l'honneur de m'avoir encadré, orienté vers le succès et de sa patience et ses conseils. J'exprime mes sincères remerciements à Mr BELAROUCI M., Maitre de conférences au département des sciences agronomiques à l'université de Kasdi Merbah Ouargla, d'avoir accepté de présider le Jury de ce mémoire. Je remercie Mme BEBRAHIM K., Maitre de conférences au département des sciences agronomiques à l'université de Kasdi Merbah - Ouargla, qui ont accepté de faire partie de mon jury de mémoire.

Je tiens à remercier aussi tous mes enseignants du département des sciences agronomiques. Mes remerciements vont également à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier mes collègues de travail sans oublier tous les amis et les étudiants de la promotion.

Je tiens à remercier Mr ZAKOUR Ibrahim, Directeur de la société de COSIDER AGRICO Hadjira et tous les staffs technique et administratif et tous les travailleurs de la société chacun à son nom.

ملخص

يتناول هذا البحث سلوك صنف القمح الصلب *Triticum durum* var. Vitron في نظامي ري مختلفين ضمن مزرعة كوسيدر أجركو في حدجيرة، الجزائر. في سياق عالمي يتسم بزيادة الطلبات الغذائية وتأثيرات تغير المناخ، يعتبر القمح الصلب أمراً حيوياً للأمن الغذائي، خاصة في المناطق المتوسطة وشبه الصحراوية.

يقدم الفصل الأول معلومات عامة عن القمح، ويتناول أصله، مورفولوجيته، دورة نموه، ومتطلباته البيئية. كما يسلط الضوء على مكونات العائد والعوامل التي تؤثر على الإنتاجية.

يعالج الفصل الثاني منطقة توغورت، وخصائصها الجغرافية والمناخية، بالإضافة إلى منهجية الدراسة، بما في ذلك الممارسات الثقافية وتقنيات الري. يؤسس هذا الفصل إطاراً لفهم التحديات الزراعية في بيئة صحراوية.

يقدم الفصل الثالث نتائج الدراسة، مشيراً إلى الاختلافات في المعلمات الفيزيائية والكيميائية للتربة وأداء المحاصيل الزراعية بين النظامين. وتظهر النتائج اتجاهات ملحوظة في حموضة التربة، وتوصيل الكهرباء، والعائد، مما يبرز أهمية الإدارة السليمة للمياه والمواد الغذائية.

في الختام، يسلط هذا البحث الضوء على التحديات والفرص في الزراعة المروية في الجزائر، بينما يقترح طرقاً لتحسين استدامة إنتاج الحبوب في ظل ظروف مناخية قاسية. تشمل التوصيات تجربة أصناف جديدة وتحسين الممارسات الثقافية.

الكلمات المفتاحية

القمح الصلب — (*Triticum durum* var. Vitron) الري — المردودية — الزراعة الصحراوية — إدارة المياه — التربة الجافة — الأمن الغذائي — الاستدامة الزراعية — تقرت (الجزائر)

Résumé

Le mémoire explore le comportement de la variété de blé dur *Triticum durum* var. Vitron dans deux systèmes d'irrigation distincts au sein de l'exploitation COSIDER AGRICO à Hadjira, en Algérie. Dans un contexte mondial marqué par l'augmentation des besoins alimentaires et les effets du changement climatique, le blé dur est crucial pour la sécurité alimentaire, surtout dans les régions méditerranéennes et semi-arides.

Le premier chapitre présente les généralités sur le blé, en abordant son origine, sa morphologie, son cycle de développement, ainsi que ses exigences pédoclimatiques. Il souligne les composantes du rendement et les facteurs influençant la productivité.

Le deuxième chapitre analyse la région de Touggourt, ses caractéristiques géographiques et climatiques, ainsi que la méthodologie de l'étude, incluant les pratiques culturales et les techniques d'irrigation. Ce chapitre établit un cadre pour comprendre les défis agronomiques dans un environnement saharien.

Le troisième chapitre présente les résultats de l'étude, mettant en évidence les différences dans les paramètres physico-chimiques du sol et les performances agronomiques entre les deux pivots. Les résultats montrent des tendances significatives dans l'acidification du sol, la conductivité électrique et le rendement, soulignant l'importance d'une gestion adéquate de l'eau et des nutriments.

En conclusion, ce mémoire met en lumière les défis et opportunités pour l'agriculture irriguée en Algérie, tout en suggérant des pistes pour améliorer la durabilité de la production céréalière dans des conditions climatiques extrêmes. Les recommandations incluent l'expérimentation de nouvelles variétés et l'optimisation des pratiques culturales.

Mots clés

Blé dur (*Triticum durum* var. Vitron) — Irrigation — Rendement — Agriculture saharienne — Gestion de l'eau — Sols arides — Sécurité alimentaire — Durabilité agricole — Touggourt (Algérie)

Abstract

The thesis explores the behavior of the durum wheat variety *Triticum durum* var. Vitron in two distinct irrigation systems within the COSIDER AGRICO farm in Hadjira, Algeria. In a global context marked by increasing food demands and the effects of climate change, durum wheat is crucial for food security, especially in Mediterranean and semi-arid regions.

The first chapter presents general information about wheat, addressing its origin, morphology, development cycle, and pedoclimatic requirements. It highlights the components of yield and the factors influencing productivity.

The second chapter analyzes the region of Touggourt, its geographical and climatic characteristics, as well as the methodology of the study, including cultural practices and irrigation techniques. This chapter establishes a framework for understanding the agronomic challenges in a Saharan environment.

The third chapter presents the study results, highlighting differences in the physicochemical parameters of the soil and the agronomic performances between the two pivots. The results show significant trends in soil acidification, electrical conductivity, and yield, emphasizing the importance of proper management of water and nutrients.

In conclusion, this thesis sheds light on the challenges and opportunities for irrigated agriculture in Algeria while suggesting ways to improve the sustainability of cereal production under extreme climatic conditions. Recommendations include experimenting with new varieties and optimizing cultural practices.

Keywords

Durum wheat (*Triticum durum* var. Vitron) — Irrigation — Yield — Saharan agriculture — Water management — Arid soils — Food security — Agricultural sustainability — Touggourt (Algeria)

Sommaire

Sommaire

Introduction générale		19
Chapitre 1	Généralité sur le blé	21
	Introduction	22
	1. Origine et histoire du blé	22
	2. Morphologie de blé dur	23
	3. Classification et systématique	25
	4. Stades phrénologiques du blé dur	26
	5. Exigences du blé	28
	6. Importance du blé	30
	7. Composantes de rendements	32
	8. Principales factures agissant sur le rendement	32
	Conclusion	34
Chapitre 2	Matériels et méthodes	35
	Introduction	36
	Partie 1 : Présentation de la région d'étude	36
	1. Présentation de la région d'étude	36
	2. Cadre climatique de la région d'étude	37
	3. Cadre hydrogéologique de la zone d'étude	40
	4. Caractéristiques des sols de la zone d'étude	43
	Partie 2 : Matériels et méthodes	47
	1. Situation géographique de la station d'étude	47
	2. Matériel végétal	48
	3. Condition de déroulement de l'essai	49
	4. Paramètres étudié	55
	5. Caractéristiques physico-chimiques du sol	58
	Conclusion	59
Chapitre 3	Résultats et discussion	60
	Introduction	61
	1. Présentation des résultats de sol de la région d'étude	61
	2. Analyse du comportement de la culture dans les deux pivots	64
	Conclusion	76
Conclusion générale		78

Liste des abréviations

Liste des abréviations

1. Liste des abréviations insérées dans le mémoire

Abréviation	Désignation de l'abréviation
A	Argile
AFNOR	Association Française de Normalisation
ANOVA	Analyse de la variance — méthode statistique pour comparer des moyennes.
ANRH	Agence Nationale Ressources Hydrique
APG IV	Angiosperm Phylogeny Group IV (système de classification des plantes à fleurs basé sur la phylogénie moléculaire)
ATP	Adénosine Triphosphate (molécule énergétique essentielle au métabolisme cellulaire)
BD	Plante céréalière du genre <i>Triticum</i> (Blé dur)
BWh	Typique du Sahara algérien, notamment à Touggourt : forte température (> 40 °C en été), faibles précipitations (< 100 mm/an), forte évapotranspiration (Climat désertique chaud selon la classification de Köppen-Geiger)
Ca ²⁺	Ions calcium
CaCl ₂	Chlorure de calcium
CaCO ₃	Carbonate de calcium
CE	Conductivité électrique
CIC	Conseil International des Céréales
Cl ⁻	Ion chlorure
CO ₂	Dioxyde de carbone
CO ₃ ²⁻	Ion carbonate
COSIDER AGRICO	Filiale du groupe public algérien COSIDER, spécialisée dans l'agriculture intensive (notamment en zones sahariennes, comme Touggourt).
CPCS	Classification des Sols – Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (principal organisme de recherche scientifique australien)
Coef.T	Coefficient de tallage
Cum	Cumul
CW	Route de wilaya n° 33
DSA	Direction des Services Agricoles
Degr. of Freedom	Degrés de liberté
E/m ²	Epis par mètre carre
EAB	Epis avec barbes
ESB	Epis sans barbes
Ets/m ²	Epillets/m ²
Evap	Evaporation
FAO	Food Agricole Organisation
F	Statistique de test utilisée dans l'ANOVA.
ERESS	Etude Régionale de l'Eau du Sahara Septentrional
G/E	Grains/Epis
G/m ²	Grains/m ²
H	Humidité
H ₂ O	Dihydrogène monoxyde, formule chimique de l'eau. H ₂ O
H ₃ O ⁺	Ions hydronium

Liste des abréviations

HCl	Acide chlorhydrique
HCO ₃ ⁻	Ion bicarbonate
H ₂ S	Sulfure d'hydrogène
INIA	Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria
INRAA	Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie.
INRAE	Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (France).
ITGC	Institue Techniques Des Grandes Cultures
K ⁺	Potassium
K ₂ O	Oxyde de potassium
Lf	Limon fin
Lg	Limon grossier
MAP	Mono-Ammonium Phosphate
Mg ²⁺	Ion magnésium
Moy	Moyenne
Mt	Million de tonnes
MO	Matière organique
MS	Mean Square (moyenne des carrés dans l'ANOVA)
N	Azote
N, P, K	Azote, phosphore, potassium (les trois macroéléments de base en fertilisation)
N/GE	Nombre de grains par épi
Na ⁺	Ion sodium
Na ⁺	Sodium
NE/E	Nombre d'épillets par épi
NCT	Nappe du Complexe Terminal
NCI	Nappe du Continental Intercalaire
ISO 10390	Norme internationale ISO pour la détermination du pH des sols.
ISO 11265	Norme ISO pour la détermination de la conductivité électrique (CE) des sols.
NG/E	Nombre de graines par épillet
NO ₃ ⁻	Ion nitrate
NPQ	Nappe phréatique du Quaternaire
ONFAA	Observatoire National des Filières Agricoles et Agroalimentaires
ONS	Office National des Statistiques
OSS	Observatoire du Sahara et du Sahel (institution régionale spécialisée dans les questions)
P	Phosphore
P/m2	Plant par mètre carre
P/m ²	Plants/m ²
P10S	Pivot n° 10 côté sud
P ₂ O ₅	Oxyde de phosphore
P9N	Pivot n° 9 côté nord
pH	Potentiel hydrogène (mesure de l'acidité ou de l'alcalinité d'une solution)
PMG	Poids de Mille Graine
Précip	Précipitation
P2-RG	Profil n°2 – Regosol
Prof	Profondeur de l'horizon
P2H1	Profil 2 – Horizon 1

Liste des abréviations

P2H2	Profil 2 – Horizon 1
P	: Valeur de probabilité (p-value)
Qté	Quantité
RC	Rendement calculé
SAU	Surface Agricole Utile
SO ₄ ²⁻	Ion sulfate
Sf	Sable fin
Sg	Sable grossier
SS	Sum of Squares (somme des carrés des écarts)
T. max. j.	Température maximale jour
T. min. j.	Température minimale jour
T. moy. j.	Température moyenne jour
T/m ²	Thalles par mètre carre
USDA-FAS	United States Department of Agriculture - Foreign Agricultural Service (service de statistiques agricoles internationales)
Vitron R1	Variété améliorée de blé dur (souvent issue de programmes de sélection variétale en zones arides).
WRB-FAO	World Reference Base for Soil Resources – Food and Agriculture Organization

Liste des illustrations graphiques

Liste des illustrations graphiques

1. Liste des figures insérées dans le mémoire

Figure	Désignation de la figure	Page
Figure 1	Description de l'épi	24
Figure 2	Coupe longitudinale d'un grain de blé	25
Figure 3	Stades phrénologiques de la plante	28
Figure 4	Situation géographique de la région d'étude	36
Figure 5	Figure. 5 : Carte hydrogéologique des deux nappes du Sahara septentrional avec le sens d'écoulement des deux nappes.	43
Figure 6	Figure 6 : Environnement et l'état de surface autour du Profil P2-RG	44
Figure 7	Figure 7 : Solum P2-RG	45
Figure 8	Présentations de la station d'étude	47
Figure 9	Labour	56
Figure 10	Semis	56
Figure 11	Levé	56
Figure 12	Tallage	56
Figure 13	Montaison	57
Figure 14	Epiaison	57
Figure 15	Maturation	57
Figure 16	Récolte	57
Figure 17	Schéma d'échantillonnage des sols dans les deux pivots 9 et 10	59
Figure 18	Evolution du pH du sol avant semis (pH ₀) et à maturité (pH) pour les pivots 09 et 10.	62
Figure 19	Evolution de la conductivité électrique du sol (dS/m) avant implantation CE ₀) et à maturité dans les pivots 09 et 10	63
Figure 20	Teneur en calcaire total (%) dans le sol des pivots 09 et 10 avant plantation.	64
Figure 21	Variation du nombre de plants par mètre carré dans les pivots 09 et 10.	65
Figure 22	Variation du nombre de talles par mètre carré dans les pivots 09 et 10.	66
Figure 23	Variation Coefficient de tallage mesuré dans les pivots 09 et 10.	67
Figure 24	Variation du nombre d'épi par m ² en fonction des pivots	68
Figure 25	Variation de nombre d'épillets par épis selon les pivots.	69
Figure 26	Variation de nombre de grains par m ² en selon les pivots.	70
Figure 27	Variation de nombre de grains par épi en selon les pivots.	71
Figure 28	Variation du poids de mille grains (PMG) en selon les pivots.	72
Figure 29	Variation du rendement calculé (kg/ha) en fonction des pivots.	73
Figure 30	Variation de la longueur d'épi avec barbes en fonction des pivots	74
Figure 31	Variation de La longueur d'épis sans barbes en fonction des pivots	75
Figure 32	Variation de La hauteur de la tige en fonction des pivots	76

Liste des illustrations graphiques

2. Liste des tableaux insérés dans le mémoire

N° du tableau	Désignation du tableau	N° de page
Tableau 1	Précipitation moyennes mensuelles à Touggourt	37
Tableau 2	Température mensuelles à Touggourt	38
Tableau 3	Vents mensuels moyens à Touggourt	38
Tableau 4	Évaporation mensuelles moyennes à Touggourt	39
Tableau 5	Humidité relative mensuelle à Touggourt	39
Tableau 6	Tableau 6 : Analyses granulométriques du profil P2-RG	45
Tableau 7	Tableau 7 : Analyse physico-chimiques et chimiques du profil P2-RG	45
Tableau 8	Résultats d'analyses des échantillons du périmètre d'El Hadjira	47
Tableau 9	Doses d'azote appliquées sur le pivot 10	52
Tableau 10	Doses d'azote appliquées sur le pivot 9	53
Tableau 11	Quantité d'eau d'irrigation appliquée sur terrain	54

Les mots clés

Liste des mots clés

Liste des mots clés

Blé dur (*Triticum durum* var. Vitron.)

Sécurité alimentaire

Sols arides

Irrigation

Rendement

Agriculture saharien

Gestion de l'eau

Durabilité agricole

Touggourt (Algérie)

Introduction générale

Introduction Générale

Introduction générale

Dans un contexte mondial marqué par l'augmentation des besoins alimentaires et les effets croissants du changement climatique, la sécurisation de la production céréalière constitue un enjeu stratégique majeur, en particulier pour les pays du bassin méditerranéen et des zones arides. Parmi les cultures céréalières, le blé dur (*Triticum durum* Desf.) occupe une place centrale du fait de son importance nutritionnelle, économique et industrielle, notamment pour la production de semoule, de pâtes alimentaires et de couscous. Sa culture représente également une source de revenus pour de nombreuses exploitations agricoles, en particulier dans les régions à ressources limitées.

Cependant, la performance du blé dur reste fortement conditionnée par les facteurs climatiques, les caractéristiques des sols, les systèmes de gestion de l'eau et les itinéraires techniques adoptés. Dans les régions sahariennes comme celle de Touggourt, en Algérie, les conditions de culture sont particulièrement contraignantes : aridité extrême, températures élevées, ressources hydriques souterraines limitées et sols souvent pauvres en matière organique. Pourtant, ces régions recèlent un potentiel de développement agricole important grâce à l'expansion de l'irrigation et à l'introduction de variétés adaptées.

C'est dans cette optique que s'inscrit la présente analyse, qui vise à évaluer le comportement agronomique de la variété de blé dur « Vitron R1 », originaire d'Espagne, dans deux systèmes de production irrigués distincts situés au sein de l'exploitation agricole COSIDER AGRICO à Hadjira (wilaya de Touggourt). L'étude s'attache à analyser de manière comparative les performances agronomiques (densité de levée, tallage, rendement, poids de mille grains, etc.) et l'évolution des caractéristiques physico-chimiques du sol (pH, conductivité électrique, calcaire total), en lien avec les modalités d'irrigation, de fertilisation et les antécédents cultureux.

La problématique centrale porte ainsi sur l'identification des facteurs techniques et environnementaux les plus influents sur le rendement en blé dur dans un environnement saharien irrigué. L'objectif final est d'apporter des éléments de réflexion et de recommandation pour l'amélioration durable de la productivité céréalière dans des conditions climatiques extrêmes.

Pour ce faire, la méthodologie adoptée combine un dispositif expérimental rigoureux et une collecte structurée de données sur l'ensemble du cycle cultural. Le mémoire est organisé en trois chapitres complémentaires :

Introduction Générale

- **Le premier chapitre :** Propose un cadre général sur la culture du blé dur, ses exigences pédoclimatiques, ses composantes de rendement et les principales contraintes biotiques et abiotiques.
- **Le deuxième chapitre :** Décrit le contexte géographique, climatique et pédologique de la région d'étude, ainsi que les modalités expérimentales, les pratiques culturales et les méthodes d'analyse utilisées.
- **Le troisième chapitre :** Présente et interprète les résultats obtenus, en comparant le comportement de la culture dans les deux pivots, en vue de formuler des conclusions agronomiques et des perspectives de valorisation.

Ce travail s'inscrit dans une démarche de contribution à l'optimisation des pratiques agricoles en milieu aride, avec pour ambition de concilier productivité, gestion durable des ressources naturelles et résilience face aux aléas climatiques croissants.

CHAPTRE 1

Généralités

Chapitre I : Généralités sur le blé

Introduction

Le blé (*Triticum* spp.) est l'une des céréales les plus anciennes et les plus stratégiques de l'histoire agricole de l'humanité. Cultivé depuis plus de dix millénaires, il a accompagné l'émergence des premières civilisations dans le Croissant fertile, avant de se diffuser progressivement sur l'ensemble des continents, à l'exception de l'Antarctique (**Telma de Sousa et al. 2021**) [1]. Parmi les diverses espèces de blé, le blé dur (*Triticum durum* Desf.) occupe une place particulière, tant pour ses caractéristiques morpho physiologiques que pour ses usages alimentaires et industriels, notamment dans les régions méditerranéennes et semi-arides.

Ce chapitre propose une synthèse approfondie des connaissances fondamentales sur le blé dur. Il aborde son origine, sa morphologie, son cycle de développement, ainsi que ses exigences pédoclimatiques et culturales. Une attention particulière est accordée aux composantes du rendement et aux facteurs biotiques et abiotiques influençant la productivité. L'ensemble de ces éléments vise à fournir un socle scientifique robuste pour comprendre les mécanismes de croissance du blé dur et évaluer les conditions optimales de sa culture dans des zones climatiquement contraignantes telles que le sud-est algérien.

1. Origine et histoire du blé

La domestication du blé constitue une étape majeure dans l'histoire des civilisations humaines, marquant le début du Néolithique. Elle correspond à la transition d'une économie de subsistance basée sur la cueillette et la chasse vers une économie de production fondée sur l'agriculture et l'élevage (**Zhao, X., Nave, M., Wang, Z. et al. 2023**) [2].

C'est aux alentours de 10 000 av. J.-C. que les premiers blés furent domestiqués, avec pour centre d'origine le Croissant fertile, région située entre les fleuves Tigre et Euphrate (**Feng & Mascher, 2023**) [3].

La diffusion du blé vers l'Afrique emprunta d'abord la route terrestre la plus ancienne, atteignant l'Égypte vers 6 000 av. J.-C., avant de s'étendre au Soudan et à l'Éthiopie au sud, ainsi qu'à la Libye à l'ouest (**Out, W. A., Honegger, M., Linseele, V., & Briois, F. 2016**) [4]. D'autres voies d'introduction furent maritimes : depuis la Grèce et la Crète vers la Libye, ou encore à partir du sud de la péninsule italienne et de la Sicile vers les côtes de la Tunisie, du Maroc et de l'Algérie (**Mulazzani, S., Lucarini, G., & Broodbank, J. 2016**) [5].

Chapitre I : Généralités sur le blé

2. Morphologie de blé dur

Le blé dur (*Triticum turgidum* subsp. *durum*) se distingue par sa morphologie spécifique. Ses feuilles sont longues, étroites, glabres (sans pilosité) et présentent une teinte vert clair. Les chaumes sont élancés, généralement de grand développement, mais de faible diamètre. Les épis sont compacts, barbus, avec des glumes allongées, fortement carénées et rigides. Les grains, de forme allongée, possèdent un embryon saillant et une brosse peu développée, caractéristiques qui influencent leur transformation industrielle, notamment en semoule (Shewry, P. R., & Hey, S. J. 2015) [6].

2.1. Appareil racinaire

Le système racinaire du blé est de type fasciculé, formé de nombreuses racines fines organisées en faisceaux au pied de la tige. Environ 55 % de la biomasse racinaire se situe dans les 25 premiers centimètres du sol, attestant d'une forte capacité d'absorption dans la couche superficielle. Ce type de système favorise l'exploration horizontale du sol, particulièrement adapté aux conditions irriguées ou aux sols meubles (Madani, I. 2022) [7].

2.1.1. Tige et feuille

Chez le blé dur (*Triticum durum*), la tige principale, nommée maître brin, produit à la base des tiges secondaires appelées talles, lesquelles contribuent à accroître le nombre potentiel d'épis par pied. Le chaume est creux, segmenté par des nœuds et s'allonge nettement durant la montaison. Chaque brin porte généralement 7 à 8 feuilles, disposées de façon alternée ; elles sont rubanées, engainantes à leur base et insérées au niveau des nœuds, d'où elles finissent par se détacher. Les feuilles, caractéristiques des monocotylédones, présentent des nervures parallèles et se terminent par une pointe effilée, morphologie qui favorise l'adaptation à la sécheresse et une captation optimale de la lumière (Grolì, E. L., and al. 2024) [8].

2.1.2. Epi

Chez le blé dur, l'épi constitue l'inflorescence terminale de la tige principale ou des talles. Il est formé d'un axe central, appelé rachis, sur lequel sont insérés de manière alternée des épillets, chacun étant composé de plusieurs fleurs (Wang, Z., and al. 2024) [9].

Un épi peut porter de 10 à 40 épillets, chacun contenant généralement 3 à 6 fleurs fertiles, bien que le nombre total de fleurs formées au stade de différenciation soit souvent bien plus élevé. En théorie, un épi peut produire plus de 200 grains, mais en pratique, selon les conditions agronomiques,

Chapitre I : Généralités sur le blé

climatiques et variétales, le nombre de grains formés varie généralement entre 30 et 90 par épi (Frontiers in Plant Science editorial, 2024) [10].

La fertilité des fleurs, la pollinisation et la rétention des grains sont des facteurs limitant majeurs pour le rendement final (Xie, Z., et al. 2023) [11].

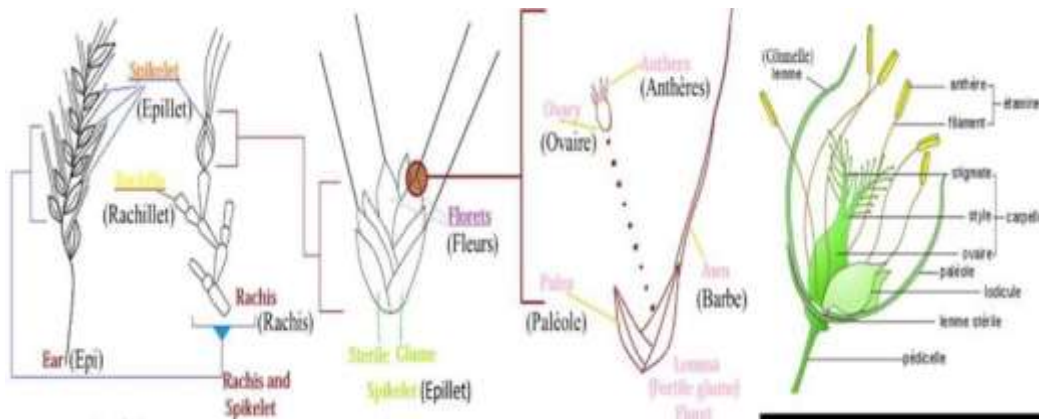


Figure 1 : Description de l'épi (source : https://www.researchgate.net/figure/Anatomie-de-lepi-de-ble-de-lepillet-et-de-la-fleur-Setter-and-Carlton-2000_fig3_372131183)

2.1.3. Grain

Le grain de blé, ou caryopse, est un fruit sec indéhiscent caractéristique des graminées, contenant une seule graine soudée à la paroi du fruit. Il a une forme ovoïde allongée, légèrement aplatie, avec un sillon longitudinal bien visible sur l'une des faces. A l'extrémité opposée à l'embryon, on observe une petite touffe de poils, appelée brosse (Ji, Y., Hewavithana, T., Sharpe, A. G., & Jin, L. 2024) [12].

Anatomiquement, le grain est constitué de trois parties principales :

- Le germe (ou embryon), qui contient les tissus embryonnaires à l'origine de la future plante ;
- L'albumen (ou endosperme), riche en amidon et en protéines, qui constitue la principale réserve énergétique ;
- Les enveloppes (péricarpe et téguments), qui protègent le grain et contiennent des fibres et des minéraux.

Chapitre I : Généralités sur le blé

Cette structure explique en partie les aptitudes technologiques du blé dur, notamment en semoulerie et en fabrication de pâtes (Zhang, H., & Wang, Q., 2024) [13].

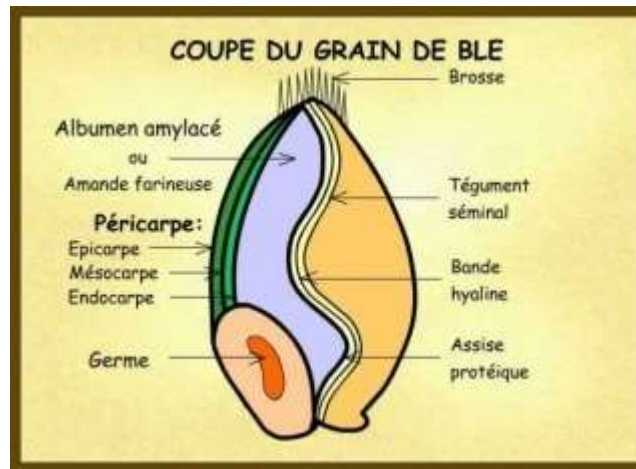


Figure 2 : Coupe longitudinale d'un grain de blé (source : https://www.duretz.net/technologie_boulangere/les-matieres-premieres/le-ble/)

3. Classification et systématique

Le blé est une plante monocotylédone appartenant au genre *Triticum*, dans la famille des Poaceae (anciennement Gramineae), qui regroupe les principales céréales. C'est une plante à fleurs (angiosperme), dont le fruit est un caryopse, c'est-à-dire un fruit sec indéhiscent soudé à la graine (Ammar, M. K., Hanafi, R. S., Choucry, M. A., & Handoussa, H. 2023) [14].

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.), cultivé principalement pour la production de semoule et de pâtes, est classé selon la systématique botanique (Angiosperm Phylogeny Group, 2016) [15], comme suit :

- Règne : Plantae
- Clade : Angiospermes
- Clade : Monocotylédones
- Ordre : Poales
- Famille : Poaceae
- Tribu : Triticeae
- Genre : *Triticum*
- Espèce : *Triticum durum* Desf.

Chapitre I : Généralités sur le blé

Cette classification repose sur les critères morphologiques et génétiques, actualisés selon les systèmes phylogénétiques récents (APG IV, 2016), en complément des travaux classiques de Prat (1971) et Feillet (2000) (Chase, M. W et all 2016) [16].

4. Stades phrénologiques du blé dur

Le cycle végétatif du blé dur se décompose en phases phrénologiques bien distinctes, identifiables grâce à des systèmes standards (Zadoks, BBCH, etc.). Cette identification précise est essentielle pour planifier les interventions culturales (irrigation, fertilisation, traitements phytosanitaires) et optimiser les rendements considérant les transitions morphologiques externes et internes des organes reproducteurs (Lancashire, P. D et all 1991) [17].

4.1. Période végétative

Cette phase, allant de la germination à l'ébauche de l'épi, englobe les stades clefs de levée et de tallage. C'est une période de croissance végétative intensive indispensable au bon développement structurel de la plante (Slafer, G. A., & Rawson, H. M. 1994) [18].

4.1.1. Stade de levée

La levée, marquée par l'émergence de 50 % des plantules, se déclenche dès que la germination commence, conditionnée par une température minimale. Ce stade comporte l'imbibition, l'élongation de la coléoptile et l'apparition de la première feuille, phases critiques très sensibles au climat (Rodrigues, G. I., Araus, J. L., & Slafer, G. A. 2022) [19].

4.1.2. Stade de tallage

Le tallage commence après la 3^e feuille et implique la formation de talles primaires, secondaires et tertiaires. Le nombre de talles dépend de la variété, des apports minéraux et hydriques, de la densité de semis et des conditions climatiques, influençant directement le nombre d'épis productifs (Rodrigues, G. I., Araus, J. L., & Slafer, G. A. 2022) [19].

4.2. Période reproductrice

Cette phase, qui suit la croissance végétative, comprend la formation, la fécondation et la maturation des grains. Elle a un impact direct sur le rendement, en influençant le nombre et la qualité des grains (Rodrigues, G. I., Araus, J. L., & Slafer, G. A. 2022) [19].

Chapitre I : Généralités sur le blé

4.2.1. Montaison (gonflement)

La montaison se caractérise par l'allongement des entre-nœuds et la montée de l'épi dans la gaine. Elle constitue une phase de croissance active, avec des besoins élevés en azote, et se termine lorsque la feuille-drapeau apparaît et que la gaine gonfle sous l'épi (Li, Z., Wang, J., & Zhang, L. (2024) [20]).

4.2.2. Épiaison – Floraison

L'épiaison désigne l'émergence partielle ou totale de l'épi de la gaine, atteinte à 50 % des plants. La floraison (anthèse), immédiate, comprend l'ouverture des fleurs, la libération du pollen et la fécondation. Ce stade est critique pour la fertilité des épis et sensible aux conditions climatiques (Ferrante, A., Przetakiewicz, W., & De Vita, P. 2023) [21].

4.2.3. Remplissage du grain

Durant cette phase, la plante déplace les réserves accumulées vers les grains. Environ 75 % de la matière sèche utilisée pour le remplissage provient des organes photosynthétiques préfloraison (Plaut, Z et al 2004) [22].

4.2.4. Maturation du grain

La maturation commence après le palier hydrique (stabilisation de l'humidité) et se poursuit par une perte graduelle d'eau. Le grain évolue de l'état « rayable à l'ongle » (~20 % H₂O) à « cassant sous la dent » (~15 % H₂O), marquant la fin du cycle de développement (Corinne C et al 2020) [23].

Les différents stades phénologiques du blé, de la germination à la maturation, sont synthétisés dans la Figure 5. Cette illustration met en évidence les étapes clés (levée, tallage, montaison, épiaison, remplissage, maturation) et leurs repères morphologiques et physiologiques. Elle sert de base pour positionner les interventions culturales (fertilisation, irrigation, traitements) de manière optimale (Zadoks, J. C., and al. 2024) [24].

Chapitre I : Généralités sur le blé

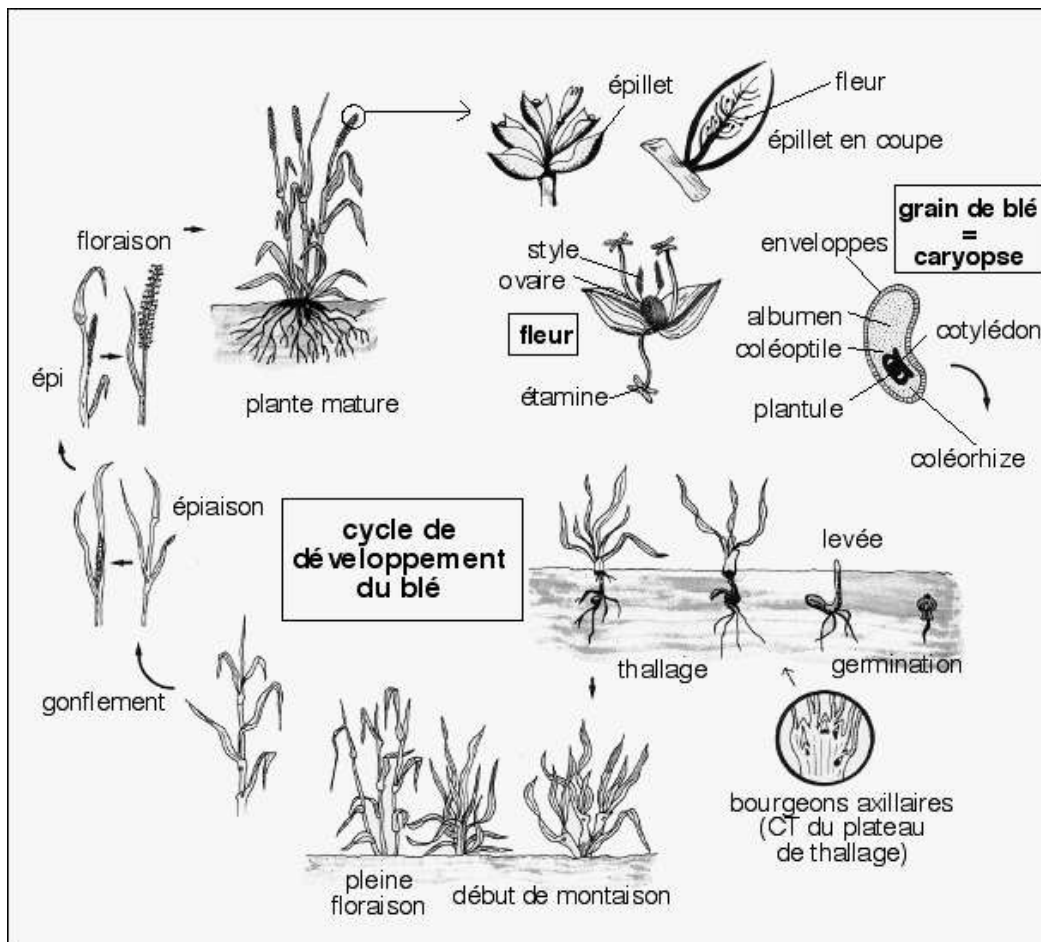


Figure 3 : Les stades phénologiques de la plante (source : <http://pst.chez-alice.fr/svtiufm/ble.htm>)

5. Exigences du blé

Le blé dur présente des exigences spécifiques en termes de climat, de sol, de lumière et d'eau, éprouvées déterminantes pour sa croissance, sa phénologie et son rendement (Liotard, I., Bousset, L., & Rebetzke, G. 2024) [25].

5.1. Exigences pédoclimatiques

Le développement du blé dur est fortement conditionné par les caractéristiques du climat et du sol. En effet, le bon déroulement de son cycle végétatif et reproductif repose sur une combinaison équilibrée de plusieurs facteurs : la température, la lumière, l'humidité du sol, la qualité physique et chimique du sol, ainsi que la disponibilité en eau. Le blé dur, en particulier, est reconnu pour sa sensibilité aux conditions climatiques extrêmes, notamment la chaleur excessive, la sécheresse ou la salinité. C'est pourquoi une bonne connaissance des exigences pédoclimatiques permet d'optimiser les pratiques agricoles, de choisir les variétés adaptées, et d'améliorer significativement les

Chapitre I : Généralités sur le blé

rendements dans les zones à risque climatique comme les régions arides ou semi-arides (**Liotard, I., Bousset, L., & Rebetzke, G. 2024**) [25].

5.1.1. Température

La température détermine la germination (≥ 0 °C), le développement optimal (15–25 °C), ainsi que le bon déroulement de la montaison et l'initiation florale, sensibles à l'interaction avec la photopériode. À chaque stade, le rendement thermique cumulé (en °C jours) est essentiel pour l'expression de la croissance génétique (**Batlla, D. & Benez-Arnold, R. L. 2015**) [26].

5.1.2. Lumière

La lumière est essentielle pour la photosynthèse et le bon tallage. Un éclairage optimal stimule la biomasse végétative. Un déficit lumineux augmente la longueur des entre-nœuds et réduit la fertilité des épis (**Li, Y., Zhao, et al. 2024**) [27].

5.1.3. Sol

Le blé dur prospère sur des sols profonds et bien drainés (limono-argileux calcaires ou argilo-siliceux). Il est sensible à la salinité ; un pH de 6,5–7,5 est recommandé pour assurer la disponibilité des nutriments essentiels (**Rankel, K. 2024**) [28].

5.1.4. Eau

Le besoin hydrique du blé dur est estimé à environ 800 mm par cycle, la période de la phase « épi-1 cm » à 30–35 jours après floraison étant particulièrement critique pour l'irrigation, afin de préserver le rendement en climat aride (**El-Hendawy, S et al. 2023**) [29].

5.2. Exigences culturales

Expertise agronomique récente confirme que la réussite de la culture du blé dur dépend autant des conditions environnementales que d'une gestion optimale des pratiques culturales, allant de la préparation du sol à la fertilisation spécifique (N, P, K), ajustée au contexte agro écologique local (**Matthews, N., & Jones, H. G. 2024**) [30].

5.2.1. Préparation du sol

Les travaux récents recommandent une structuration de sol modulée selon sa texture : 12–15 cm pour sols limoneux, 20–25 cm pour sols lourds, avec un affinage de surface pour garantir une levée rapide et homogène (**Six, J., & Schneider, F. 2022**) [31].

Chapitre I : Généralités sur le blé

5.2.2. Semis

Des études en climat méditerranéen indiquent que le semis automnal entre fin octobre et mi-novembre, à une profondeur de 2,5–3 cm et un écartement de 15–25 cm, favorise un début de cycle vigoureux et un rendement stable en zones semi-arides (**Yagmur, M., & Kaydan, D. 2009**) [32].

5.2.3. Fertilisation

Une gestion raisonnée de la fertilisation N-P-K est essentielle pour optimiser rendement et qualité du grain, notamment dans les climats arides, tout en garantissant la durabilité des ressources et la protection de l'environnement (**Gadaleta et al. 2022**) [33].

5.2.3.1. Azote

Le fractionnement de l'azote (au tallage et montaison) reste la meilleure stratégie pour assurer la disponibilité de N sans compromettre la qualité environnementale (**Gamal, A. E.-B. M., & El-Miniawy, M. S. 2018**) [34].

5.2.3.2. Phosphore

Des essais récents suggèrent que des apports de 60–120 kg P₂O₅/ha lors du semis et en phase de tallage optimisent le rendement, notamment sur sols déficients (**Gadaleta et al. 2022**) [33].

5.2.3.3. Potassium

Des essais menés en Algérie montrent qu'un apport de 100 kg K₂O/ha améliore significativement la biomasse et le rendement, tout en renforçant la résistance aux stress hydriques (**Messaoudi, A. et al. 2023**) [36].

6. Importance du blé

Le blé (*Triticum* spp.) est l'une des céréales les plus cultivées et consommées dans le monde. Il constitue un aliment de base pour plus de 35 % de la population mondiale et joue un rôle central dans la sécurité alimentaire planétaire. Grâce à sa grande adaptabilité, il est cultivé sur tous les continents sauf l'Antarctique. Il fournit glucides, protéines végétales et sert de matière première essentielle pour le pain, les pâtes, la semoule, les biscuits, l'alimentation animale et certains usages industriels (**Food Unfolded. 2022**) [37].

Chapitre I : Généralités sur le blé

Parmi les espèces, le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est stratégique, en particulier dans les pays méditerranéens pour la semoule, les pâtes et le couscous. Ses usages nutritionnels et économiques en font un pilier des politiques agricoles, des stratégies de stockage et des programmes de recherche visant à améliorer sa résilience au climat, productivité et qualité (**Frontiers in Agronomy. 2024**) [38].

6.1. Importance alimentaire

Le blé est l'une des principales ressources alimentaires mondiales, utilisé pour la consommation humaine, l'élevage et des applications industrielles. Il fournit environ 15 % de l'apport énergétique global. Le blé dur, transformé en semoule et pâtes, est intensivement cultivé en climat méditerranéen soumis à des stress hydriques et climatiques croissants (hausse des températures, baisse des précipitations, désertification) (**FAO. 2023**) [39].

6.2. Importance économique

Au-delà de son rôle nutritionnel, le blé constitue une culture stratégique à forte valeur économique, favorisant les revenus agricoles, le développement rural et la stabilité socio-économique dans de nombreux pays. Le commerce international de blé dur est un enjeu clé pour la sécurité alimentaire, en particulier dans les pays en développement. Le blé alimente aussi des filières industrielles variées (meunerie, semoulerie, pâtes, boulangerie, alimentation animale), et la demande mondiale pour ses produits transformés ne cesse de croître, notamment dans les pays du Sud. Dans les régions méditerranéennes et semi-arides, sa résilience aux conditions climatiques sévères et son rôle dans la filière locale (semoule, couscous, pâtes) le rendent crucial pour la souveraineté alimentaire et la stabilisation des prix sur les marchés internationaux (**Wei, S.-Y., & Zhou, W.-X. 2025**) [40].

6.2.1. Dans le monde

Le blé dur couvre environ 13,5 millions d'hectares en 2020/2021, soit près de 6,2 % de la surface céréalière mondiale. Il représente un segment spécialisé et concentré dans les régions méditerranéennes – notamment en Italie, en Turquie, en Algérie –, ainsi que dans les grands exportateurs comme le Canada, les États-Unis et le Mexique (**Martínez-Moreno, and al. 2022**) [41].

6.2.2. En Algérie

En Algérie, le blé dur est cultivé sur environ 1,5 million d'hectares, sur une surface céréalière totale de 3,3 millions d'hectares. La campagne 2018/19 a été exceptionnelle, avec une récolte record de 3,9 Mt (dont 3,15 Mt de blé dur), soit une hausse de 61 %. Le pays reste toutefois l'un des premiers

Chapitre I : Généralités sur le blé

importateurs mondiaux de blé, avec environ 8 Mt importées en 2017, principalement en provenance du Canada, du Mexique, et récemment d'autres pays (**USDA FAS. 2025**) [42].

7. Composantes de rendements

Le rendement du blé est déterminé par plusieurs composantes morpho-physiologiques qui se mettent en place successivement, depuis la levée jusqu'à la maturation des grains. Celles-ci sont influencées par des facteurs génétiques, climatiques et agronomiques. En règle générale, on considère que le rendement est le produit du nombre d'épis/m², du nombre moyen de grains par épi, et du poids de mille grains (PMG), conformément aux modèles classiques de rendement chez les graminées (**Braun, F., et al. 2023**) [43].

7.1. Nombre d'épis par mètre carré

Cette composante dépend de la densité de semis et du coefficient de tallage, c'est-à-dire la capacité d'une plante à produire des talles fertiles supplémentaires. Le nombre d'épis/m² est conditionné par la qualité des semences, la préparation du lit de semence, la date et la densité de semis, ainsi que les conditions climatiques en début de cycle. Un tallage optimal requiert des températures modérées, une nutrition azotée adéquate et une bonne luminosité (**Braun, F., et al. 2023**) [43].

7.2. Nombre de grains par épi

Ce paramètre varie selon la variété, mais aussi en fonction du nombre d'épis/m² : une densité trop élevée peut augmenter la compétition et réduire le nombre de grains par épi. Le stress hydrique ou thermique pendant la floraison affecte directement la fertilité des fleurs. Fischer (2011) souligne que le nombre de grains par épillet corrèle mieux avec le rendement que celui par épi entier (**Braun, F., et al. 2023**) [43].

7.3. Poids de mille grains (PMG)

Le PMG est l'aboutissement du remplissage des grains, dernier stade du cycle. Il dépend des conditions climatiques post-anthèse ainsi que de la poursuite d'un apport hydrique et azoté suffisant. Des températures élevées ou un stress hydrique accélèrent la sénescence foliaire, réduisant ainsi la durée du remplissage et le poids final des grains (**Braun, F., et al. 2023**) [43].

8. Principales factures agissant sur le rendement

Le rendement du blé est conditionné par une série de facteurs limitants, d'origine biotique (maladies, ravageurs, adventices) ou abiotique (stress climatiques, accidents physiologiques), qui interagissent

Chapitre I : Généralités sur le blé

avec les caractéristiques génétiques et les pratiques culturales (Senapati, N., Halford, N. G., & Semenov, M. A. 2021) [44].

8.1. Maladies et ravageurs

Les céréales à paille, dont le blé, subissent des attaques d'organismes variés, tel que les animaux, champignons, bactéries, virus, compromettant les rendements et la qualité du grain (Bah, M., Traoré, O., & Diop, O. 2024) [45].

8.1.1. Parasites et insectes

Inclut nématodes, pucerons, taupins, vers blancs, rongeurs et oiseaux, qui endommagent les plantes et peuvent transmettre des pathogènes (Savary, S. et al 2019) [46].

8.1.2. Champignons

Responsables de maladies majeures (rouilles, oïdium, fusarioses, etc.) entraînant des pertes de biomasse et de qualité du grain (Ding, Y., et al 2024) [47].

8.1.3. Bactéries

Des bactéries comme *Pseudomonas syringae* causent des brûlures foliaires, réduisant la photosynthèse et la vigueur des plantes (Mansfield, J., and al. 2023) [48].

8.1.4. Virus

Des viroses, souvent transmises par des insectes ou la semence, provoquent des carences et retards de croissance (Scalante, M. et al 2024) [49].

8.1.5. Mauvaises herbes

Les adventices concurrencent les plantes cultivées et doivent être gérées pour limiter les pertes par compétition (Derrouch, D. 2021) [50].

8.2. Accidentes physiologiques

Les accidents physiologiques regroupent les effets nuisibles de conditions climatiques et abiotiques extrêmes. Ils diffèrent des attaques biologiques et peuvent gravement affecter la croissance et la qualité des grains, notamment en zones arides et semi-arides sous irrigation (Zhang, H., et al 2022) [51].

Chapitre I : Généralités sur le blé

8.2.1. Verse

La verse, étant la chute des tiges due aux vents forts, pluies ou excès d'azote, nuit à la récolte mécanique et à la qualité des grains. Les bordures de pivots sont particulièrement vulnérables aux forces combinées du vent et du ruissellement (Zhang, K et all 2023) [52].

8.2.2. Echaudage

L'échaudage, étant le stress thermique durant le remplissage, accélère la sénescence et réduit le poids des grains, particulièrement si les températures dépassent 30 °C au moment du palier hydrique (Djanaguiraman, M. et all 2020) [53].

8.2.3. Excès de froid

Des gelées tardives durant le tallage ou la montaison endommagent les talles et bourgeons, compromettant la formation des épis et limitant le rendement (Zhang, K. et all 2021) [54].

8.2.4. Excès d'humidité

Un sol saturé en eau provoque chlorose, freine la croissance, favorise les maladies fongiques et limite l'absorption des nutriments en asphyxiant les racines (Luo, H et all 2024) [55].

Conclusion

Le blé dur se révèle être une espèce céréalière à haute valeur agronomique, nutritionnelle et économique, particulièrement adaptée aux environnements semi-arides où les contraintes climatiques exigent une grande résilience variétale. À travers l'étude de sa morphologie, de son cycle phénologique et de ses exigences culturales, ce chapitre met en lumière les leviers permettant d'optimiser sa production, notamment grâce à une gestion raisonnée de l'eau, des nutriments et du calendrier cultural.

Les composantes du rendement – telles que le nombre d'épis/m², le nombre de grains par épi et le poids de mille grains – dépendent fortement des interactions entre génétique, climat et pratiques agronomiques. Par ailleurs, la vulnérabilité du blé dur aux maladies, aux ravageurs et aux accidents physiologiques souligne l'importance d'un suivi phytosanitaire rigoureux et d'une adaptation continue aux conditions du milieu. Ces connaissances générales constituent un préalable indispensable à l'analyse expérimentale menée dans ce mémoire, visant à comparer le comportement du blé dur sous deux régimes de culture distincts dans la région de Touggourt.

CHAPTRE 2

Matériels et méthode

Introduction

Ce chapitre offre une analyse approfondie de la région de Touggourt, située au sud-est de l'Algérie, en mettant en lumière ses caractéristiques géographiques, climatiques et pédologiques. Cette région, marquée par un climat désertique chaud et des sols arides, présente des défis significatifs pour l'agriculture, notamment en termes de disponibilité en eau et de gestion des ressources naturelles. Parallèlement, le chapitre décrit la méthodologie expérimentale employée dans l'étude agronomique, incluant les pratiques culturales, les variétés de cultures sélectionnées et les techniques d'irrigation utilisées. L'objectif est d'évaluer la performance agronomique des cultures dans ce contexte difficile, tout en identifiant les facteurs clés qui influencent la productivité.

Partie 1 : Présentation de la région d'étude

1. Présentation de la région d'étude

La région étudiée se situe dans le sud-est de l'Algérie, au sein de la wilaya de Touggourt (latitude 33° 04' N, longitude 6° 05' E), à environ 690 km d'Alger et 85 m d'altitude moyenne. Créée en 2019 (promue wilaya en 2021), cette collectivité couvre environ 17 428 km² et comprend notamment les communes de Hadjira, Nezla, Temacine et Taïbet (ONS d'Algérie, 2021) [56].

1.1. Limites géographiques de la région d'étude

La wilaya de Touggourt est délimitée :

- **Nord** : El M'Ghair
- **Est** : El Oued
- **Ouest & Sud** : Ouargla

1.2. Carte géographique



Figure 4 : Situation géographique de la région d'étude (INCT, 2023) [57]

2. Cadre climatique de la région d'étude

La région de Touggourt, située au sud-est de l'Algérie, est soumise à un climat désertique chaud, classé BWh selon la typologie de Köppen. Ce climat est caractérisé par des températures moyennes annuelles supérieures à 21 °C, des étés très chauds (avec des températures maximales dépassant les 40 °C), et une pluviométrie annuelle extrêmement faible, souvent inférieure à 60 mm (**Bennamia et al. 2024**) [58]. Ces conditions engendrent une forte évaporation, exacerbée par une insolation intense et des vents persistants, rendant l'agriculture particulièrement contraignante sans recours à l'irrigation.

2.1. Le climat

La région de Touggourt est caractérisée par un climat désertique chaud (Köppen BWh), avec des températures moyennes annuelles supérieures à 21 °C, un été très chaud (maximales > 40 °C), et une pluviométrie annuelle inférieure à 100 mm, voire autour de 55 mm selon certaines sources. Ces conditions s'accompagnent d'une évaporation et d'une insolation très intenses, aggravées par des vents persistants (**Bennamia, M. M., al. 2024**) [58].

2.2. La pluviométrie

La précipitation est un facteur écologique clé, car elle conditionne la répartition de la flore et influence directement la vitesse de développement, la longévité et la fécondité de la faune locale (**Wu, Y. et all 2024**) [59]. Dans les zones arides, comme celle de Touggourt, un régime de précipitations faibles renforce le niveau d'aridité du milieu (**Merabti, A. et all 2023**) [60].

Le tableau 1 présente les précipitations mensuelles moyennes enregistrées à Touggourt entre 2009 et 2018, mettant en évidence un cumul annuel de seulement 53,6 mm, typique des climats désertiques à forte irrégularité saisonnière (**Bennamia et al. 2024**) [58].

Tableau 1 : Précipitation moyennes mensuelles à Touggourt en (mm)

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc	Cumul
Précip.	10,98	5,85	7,21	9,90	2,41	0,17	0,00	1,39	6,02	0,78	6,07	2,80	53,58

2.3. La température

La région de Touggourt, située dans une zone à climat désertique chaud (type BWh selon la classification de Köppen), se caractérise par une température moyenne annuelle de 22,5 °C, avec des variations saisonnières marquées. Selon les données officielles de la (**Direction des Services de l'Agriculture de la wilaya de Touggourt, 2023**) [60a], le mois le plus chaud est juillet, avec une température moyenne de 34,6 °C et un maximum de 43,2 °C, tandis que le mois le plus froid, janvier, affiche une moyenne de 11,6 °C et une minimale de 3,9 °C.

Ces valeurs sont confirmées par (**Climate-Data.org, 2024**) [60b], qui souligne l’amplitude thermique importante, typique des zones sahariennes, et l’effet cumulatif de la chaleur et de la sécheresse sur les équilibres agro climatiques.

Sur le plan agronomique, ces conditions extrêmes, notamment durant la phase de remplissage du grain, constituent un facteur limitant majeur pour la productivité. En effet, les stress thermiques réduisent la durée du cycle reproductif, accélèrent la sénescence foliaire et entraînent une baisse significative du poids de mille grains (PMG), comme l’ont démontré (**Senapati, N. et all 2021**) [61]. Ces contraintes justifient la nécessité d’adapter les calendriers de semis, les itinéraires techniques et les variétés cultivées, afin de maximiser la résilience des cultures face aux conditions climatiques sahariennes.

Tableau 2 : Température mensuelles moyenne à Touggourt en (°C)

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Des	Moy
T. min. j.	3,93	5,47	8,96	12,42	18,25	23,78	26,01	25,77	21,27	15,20	8,28	4,31	14,47
T. moy. j.	11,56	12,72	16,76	21,21	26,39	31,71	34,59	33,73	29,11	23,10	16,31	11,82	22,52
T. max. j.	19,20	19,98	24,56	30,01	34,54	39,64	43,17	41,70	36,96	31,00	24,34	19,34	30,37

2.4. Les vents

Les données météorologiques relevées à Touggourt indiquent une vitesse moyenne annuelle du vent de 9,15 km/h en 2018. La vitesse maximale est observée en avril (10,52 km/h) et la plus faible en décembre (7,21 km/h), selon les relevés compilés par la Direction des Services de l’Agriculture de Touggourt et confirmés par (**Climate-Data.org, 2024**) [60b].

La direction des vents varie selon les saisons : les vents soufflent généralement de l’ouest en hiver, du nord-est au printemps, et du sud-ouest en été. Ces conditions influencent fortement la dynamique agro climatique locale, notamment dans les systèmes agricoles irrigués par pivot.

Plusieurs études récentes, dont celles de (**Bennamia et al. 2024**) [58] et (**Pi, H. et all 2023**) [62], soulignent l’impact des vents sur la perte en eau par évaporation, la dispersion de la poussière, et les risques d’érosion éolienne, particulièrement sur sols nus ou récemment travaillés. Ces effets sont d’autant plus marqués en contexte saharien, où les vents contribuent également à modifier l’efficacité de l’irrigation et la qualité des rendements agricoles.

Tableau 3 : Vents mensuels moyens à Touggourt en (km/h)

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Des	Moy
Vents	8,63	9,82	10,21	10,52	10,36	9,57	9,25	9,23	9,11	7,91	8,04	7,21	9,15

2.5. L'évaporation

L'évaporation dans la région de Touggourt est extrêmement élevée, principalement en raison de la combinaison vent chaud et forte insolation. Le bilan annuel d'évaporation, estimé à 2498 mm/an, souligne la forte demande en eau, avec un pic mensuel en juillet à 356,5 mm et un minimum en décembre à 92,35 mm.

Ces niveaux d'évaporation sont cohérents avec ceux observés dans d'autres zones sahariennes, où les valeurs annuelles varient généralement entre 2 000 et 3 500 mm (**Bennamia et al. 2024**) [58] et ; **Zereg, S., & Belouz, K. 2022**) [63]. Une évaporation aussi élevée complexifie la gestion de l'irrigation en zone désertique, impliquant notamment des systèmes efficaces comme l'irrigation par pivot et la couverture végétale pour limiter les pertes (**El-Shirbeny et all 2021**) [64].

Tableau 4 : Évaporation mensuelles moyennes à Touggourt en (mm)

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill.	Aout	Sept	Oct	Nov	Des	Cum
Evap.	107,29	137,24	176,20	212,94	251,60	293,49	356,50	313,19	234,17	187,17	136,24	92,35	2498,38

2.6. L'humidité relative de l'air

La région de Touggourt présente une humidité relative annuelle moyenne de 47,4 %, avec un pic en janvier (61,1 %) et un minimum en juillet (32 %), selon les relevés de la Direction des Services Agricoles (DSA) et les données de (**Climate-Data.org, 2024**) [60b]. Ces valeurs confirment le caractère aride du climat, combinant faible humidité et forte évaporation.

Cette hygrométrie basse, typique des zones désertiques, contribue à l'augmentation de l'évapotranspiration et influence directement la dynamique hydrique des cultures, en particulier lors des stades sensibles comme la montaison ou le remplissage du grain (**iao, P. & Hu, S.-J. (2023)** [65]. De plus, elle agit sur la physiologie stomatique des plantes, en réduisant l'ouverture des stomates et donc la transpiration, ce qui peut induire un stress hydrique même en irrigation.

Selon (**Bennamia et al. 2024**) [58], la faible humidité relative constitue un facteur limitant pour certaines maladies cryptogamiques, mais elle peut aussi accentuer la vulnérabilité des plantes aux coups de chaleur. Ainsi, la prise en compte de ce paramètre est essentielle pour adapter les calendriers d'irrigation, optimiser la nutrition et prévenir les pertes de rendement en climat saharien.

Tableau 5 : Humidités relatives mensuelles moyennes à Touggourt en (%)

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Des	Cum
H	61,09	54,76	49,03	46,18	41,06	35,45	32,00	36,96	45,88	49,17	57,01	60,68	47,43

2.7. Insolation

L'insolation constitue un facteur climatique déterminant dans les zones arides comme celle de Touggourt, influençant directement les performances agricoles, notamment à travers son effet sur la photosynthèse, l'évapotranspiration et la température du sol. Dans cette région saharienne, la durée annuelle d'ensoleillement dépasse fréquemment les 3 500 heures, plaçant Touggourt parmi les zones les plus irradiées d'Afrique du Nord (**Benmouiza, 2023**) [66]. Cette forte exposition solaire est associée à un rayonnement global moyen journalier estimé à plus de 6,1 kWh/m², atteignant parfois 7 à 8 kWh/m²/jour dans des conditions estivales extrêmes (**Oulimar et al. 2024**) [67].

Cette intensité lumineuse offre, d'une part, un potentiel considérable pour les cultures à forte exigence énergétique, comme le blé dur. D'autre part, elle amplifie les contraintes liées à la sécheresse, notamment en période de remplissage des grains, où le stress thermique et hydrique peut accélérer la sénescence foliaire et réduire la qualité des récoltes (**Blenda, A. et al. 2024**) [68]. Dans un tel contexte, la planification des pratiques culturales et de l'irrigation doit tenir compte de la répartition saisonnière de l'insolation afin d'optimiser la productivité tout en minimisant les pertes dues à la surchauffe ou à l'évaporation excessive. Ainsi, l'insolation, bien que ressource précieuse, impose une rigueur dans la gestion agro climatique des systèmes de culture sous pivot, en particulier dans les zones désertiques à fort ensoleillement comme le Grand Sud algérien.

3. Cadre hydrogéologiques de la zone d'étude

Les études géologiques et hydrogéologiques menées dans la région ont permis de mettre en évidence l'existence de plusieurs réservoirs aquifères, présentant des caractéristiques distinctes selon leur nature lithologique, leur structure géologique et leur potentiel d'exploitation (**Betayeb Abdelhamid (2018)**) [69]. Du plus superficiel au plus profond, ces aquifères sont les suivants :

- **La nappe phréatique du Quaternaire** : Généralement peu profonde, localisée dans les formations alluviales récentes, et particulièrement vulnérable à la salinisation et à la pollution.
- **La nappe du Complexe Terminal** : Composée des sables du Mio-Pliocène, des calcaires de l'Éocène inférieur et du Sénonien. Elle constitue une ressource stratégique pour l'irrigation dans les zones sahariennes.
- **La nappe des grès du Continental Intercalaire** : L'un des réservoirs les plus profonds et les plus vastes du Sahara septentrional, caractérisé par une forte capacité de stockage et une pression artésienne importante dans certaines zones.

3.1. La nappe phréatique

La nappe phréatique, également appelée nappe superficielle, est contenue dans les formations alluviales, avec une profondeur variant entre 0,5 m et 1,5 m par rapport au niveau du sol dans l'agglomération. Dans les zones les plus basses, elle affleure parfois la surface. Cette nappe repose sur un substratum imperméable épais, qui s'étend sous l'ensemble de la vallée de Ouargla jusqu'à la région d'El Hadjira, à l'extrémité nord de l'oued N'Sa. Ce niveau argileux ou marneux constitue une barrière hydraulique qui isole la nappe phréatique des nappes artésiennes plus profondes (**Betayeb Abdelhamid (2018) [69]**).

L'alimentation de cette nappe provient principalement des précipitations, des crues occasionnelles des oueds, des eaux de drainage issues de la palmeraie, ainsi que des eaux usées domestiques ou agricoles. Dans la région d'El Hadjira, les nappes les plus importantes sont associées au lit de l'oued N'Sa, où l'infiltration est facilitée par la morphologie et la texture des dépôts superficiels (**Betayeb Abdelhamid (2018) [69]**).

3.2. La nappe de complexe terminal

La nappe du Complexe Terminal (CT) tire son appellation de sa localisation dans les différents horizons perméables du Crétacé supérieur et du Tertiaire. Elle est principalement contenue dans :

- Le Sénonien supérieur carbonaté, en particulier le Maestrichtien,
- L'Éocène inférieur également de nature carbonatée,
- Ainsi que dans des formations plus récentes composées d'alternances de niveaux argileux, sableux et caillouteux d'âge Mio-Pliocène.

Ces couches aquifères sont en interconnexion plus ou moins étroite, ce qui confère au Complexe Terminal une grande hétérogénéité hydraulique (**Betayeb Abdelhamid (2018) [69]**).

Dans le bassin oriental du Sahara septentrional, cette nappe s'étend sur une superficie estimée à environ 350 000 km². À l'intérieur des limites des formations argileuses du Mio-Pliocène, la nappe est captive et sous pression, ce qui la rend artésienne au centre du bassin. En revanche, elle devient libre sur les zones périphériques, notamment dans les régions du Dahar et du M'Zab (**Betayeb Abdelhamid (2018) [69]**).

Sa profondeur varie généralement entre 100 et 400 mètres. Les eaux de la nappe sont peu thermalisées et présentent une bonne qualité chimique sur les bordures du bassin, tandis qu'elles deviennent de

composition moyenne à médiocre dans les zones centrales, en raison de la salinisation progressive par dissolution des formations traversées (**Betayeb Abdelhamid (2018) [69]**).

3.3. La nappe du continental intercalaire

Le Continental Intercalaire (CI) constitue un vaste système aquifère saharien, occupant l'intervalle stratigraphique compris entre la base du Trias et le sommet de l'Albien. Il s'étend sur une superficie d'environ 600 000 km² à travers le bassin sédimentaire du Sahara septentrional (**Betayeb Abdelhamid (2018) [69]**).

La formation géologique du CI est représentée par des dépôts continentaux d'origine créacée, notamment des alternances de grès, sables, marnes et argiles, appartenant principalement aux séries de l'Albien et du Barrémien. Ces formations constituent un aquifère multicouche de grande importance, qui renferme d'importantes quantités d'eau fossile stockées durant les phases humides du Quaternaire (**Betayeb Abdelhamid (2018) [69]**).

Le CI présente les caractéristiques suivantes :

- Une profondeur d'exploitation atteignant localement 2 000 m, avec une épaisseur (ou « puissance ») variant de 200 à 400 m.
- Une température élevée, dépassant souvent 60 °C, notamment dans la région d'El Hadjira, où il est exploité entre 1 150 et 1 350 m de profondeur.
- Une teneur non négligeable en H₂S et CO₂, qui confère à ses eaux un caractère corrosif.
- Une minéralisation variable, oscillant entre 1 et 2 g/L de résidu sec, et pouvant atteindre jusqu'à 5 g/L dans certaines zones (ex. Gassi Touil).
- Une alimentation naturelle faible, principalement assurée par infiltration à la périphérie du bassin, via les oueds en provenance de l'Atlas saharien, du Dahar tunisien, du plateau du Tademaït, ainsi que par des épisodes de pluies exceptionnelles dans les grands ergs.

L'écoulement général des eaux souterraines suit un double gradient hydraulique : dans la partie occidentale du bassin, il s'effectue du nord vers le sud ; dans la partie orientale, il se dirige de l'ouest vers l'est (vers la Tunisie), avec un retour du sud vers le nord par drainance, notamment au niveau du chott Melrhir. Selon les résultats du projet (**ERESS, 1969) [70]**, cette drainance représenterait un débit annuel estimé à 62,34 x 10⁶ m³ (**Betayeb Abdelhamid (2018) [69]**).

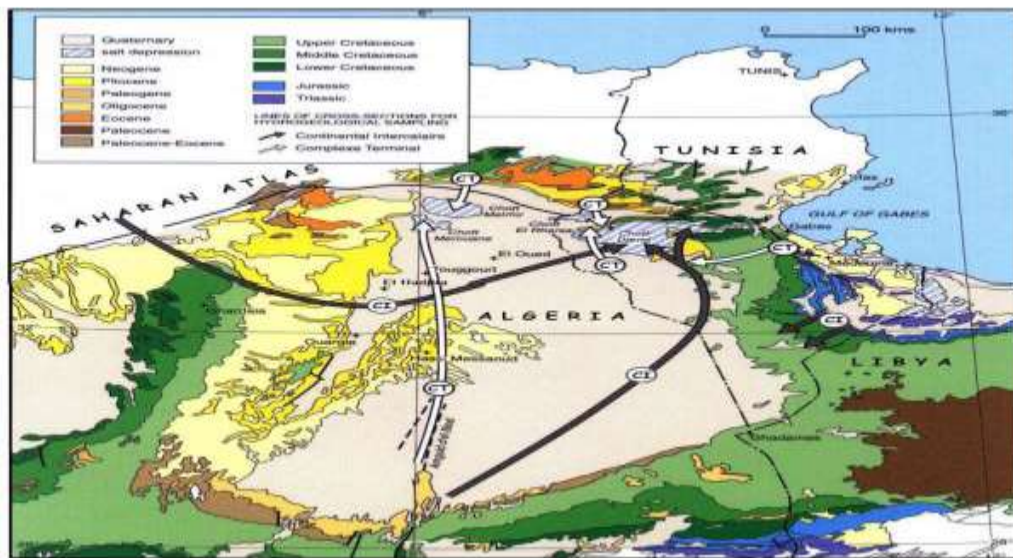


Figure. 5 : Carte hydrogéologique des deux nappes du Sahara septentrional avec le sens d'écoulement des deux nappes. (Source : ERESS, 1969 [70])

4. Caractérisation des sols de la zone de Reg

Les terrains entourant le site d'étude sont dominés par des formations superficielles de type reg, présentant une surface généralement plane et caillouteuse, parfois interrompue par des zones dénudées sous l'effet de l'érosion hydrique. Cette érosion donne lieu à la formation de glacis structuraux et de petits ravins (Telli Siham 2022) [71].

Le substrat géologique est constitué de formations sédimentaires gréseuses d'âge Pontien (Mio-Pliocène), bien représentatives de la couverture sédimentaire du Sahara septentrional (Telli Siham 2022) [71].

Ces formations sont localement recouvertes par des accumulations sableuses d'origine éolienne, caractéristiques des milieux arides. Par ailleurs, les glacis observés présentent par endroits l'aspect de pseudo-regs, indiquant une dynamique de remaniement sédimentaire partiel sous l'effet de processus éoliens et hydriques combinés (Telli Siham 2022) [71].

4.1. Description morphologique du solum de P2-RG

4.1.1. Description d'environnement

- **Localisation** : 33°10'10.60"N ; 5°00'14.85"E ; Altitude : 299 m – Site : carrière.
- **Géomorphologie** : Reg à surface de glacis, partiellement recouvert de pseudo-reg.
- **Végétation dominante** : Anthyllis sericea ssp. henoniana.
- **État de surface** : Présence de voiles sableux, graviers et cailloux.

- **Conditions climatiques au moment de la description** : Temps ensoleillé.
- **Date de description du solum** : 28 mars 2022.
- **Descripteurs** : Djili B. et Telli S (**Telli Siham 2022**) [71].



Figure 6 : Environnement et l'état de surface autour du Profil P2-RG

4.1.2. Description du solum

- **Horizon 0–25 cm** : Sec, couleur 7.5YR 5/6 (brun clair vif), texture sableuse à graveleuse, structure particulière. Présence de graviers sub-anguleux (diamètre 0,2 à 1 cm), quelques nodules calcaires dispersés, racines fines mortes visibles. Sol poreux, friable, avec des taches grises et blanches indiquant une possible hydromorphie ou salinité localisée. Réaction effervescente forte à l'HCl. Transition brutale, limite régulière (**Telli Siham 2022**) [71].

- **Horizon 25–100 cm** : Sec, couleur 7.5YR 8/3 (orange jaunâtre clair), présence d'une dalle gypseuse compacte. Structure massive ou en blocs, teinte beige par endroits. Matériau très dur, forte effervescence à l'HCl, traduisant une accumulation de gypse et/ou de carbonates secondaires (Telli Siham 2022) [71].



Figure 7 : Solum P2-RG

4.2. Etude analytique

Les résultats des analyses physiques, physico-chimiques et chimiques des échantillons de sol sont présentés dans les tableaux ci-après. Ces données permettent de caractériser les principales propriétés du sol étudié, en lien avec la fertilité, la salinité et les conditions hydriques du milieu (Telli Siham 2022) [71].

Tableau 6 : Analyses granulométriques du profil P2-RG

Horizons	Prof. (cm)	Granulométrie de la terre fine (%)					Texture (U.S.D.A)
		A	Lf	Lg	Sf	Sg	
P2H1	0-20	18.9	2.1	0.3	13.8	65.0	Sablo-limoneux
P2H2	20-100	7.6	9.1	1.5	23.3	58.5	Limono-sableux

Tableau 7 : Analyse physico-chimiques et chimiques du profil P2-RG

Profil	Prof. (cm)	C.E (dS/m)	pH	Calcaire (%)	MO (%)	Gypse (%)
P2-H1	0-20	0.466	8.54	11.94	1.91	0.22
P2-H2	0-90	2.416	7.68	0.69	1.47	7.23

4.2.1. Interprétation

Le sol Régosol du profil P2-R est situé dans un paysage de reg à couverture sablo-graveleuse et végétation clairsemée. Morphologiquement, il est peu profond et repose sur une dalle gypso-calcaire sous-jacente (**Telli Siham 2022**) [71].

L'analyse granulométrique révèle une texture sablo-limoneuse à la surface et limono-sableuse en profondeur, indiquant un bon équilibre des fractions. Le pH est alcalin (8,54 en surface ; 7,68 en profondeur), traduisant un environnement chimique favorable aux cultures adaptées aux sols basiques (**Telli Siham 2022**) [71].

Le sol est modérément salin en profondeur (2,416 dS/m), sans problème de salinité en surface. La teneur en calcaire est élevée en H1 (11,94 %) et très faible dans l'horizon profond (0,69 %). Le gypse est absent en surface mais atteint 7,23 % dans H2, ce qui confirme la présence d'un encroûtement gypseux en profondeur. Enfin, la matière organique est faible dans les deux horizons, ce qui est typique des sols arides (**Telli Siham 2022**) [71].

4.2.2. Classification

- **Selon la classification française Baize, D., et al 2008 [72]** : Le sol étudié appartient à la classe des Sols minéraux bruts d'érosion du type Régosol, caractérisé par une évolution pédologique très faible, souvent organisée en pavements sur reg, développée sur une roche mère peu friable.
- **Selon la classification internationale USS Working Group WRB. (2022) [73]** : Le sol est classé comme Gypsic Regosol (Arenic), ce qui indique un sol faiblement évolué, à texture sableuse dominante (Arenic), présentant un horizon enrichi en gypse (Gypsic), typique des zones arides à substrats gypseux.

4.3. Sols de la zone d'étude

Les résultats de l'analyse pédologique de l'exploitation agricole d'El Hadjira révèlent que les sols sont majoritairement de type sableux à sablo-limoneux, faiblement salins, et alcalins. L'influence des anciennes nappes phréatiques se traduit par la formation d'horizons gypseux en profondeur, tandis que la structure particulière reste lâche en surface, facilitant l'aération mais limitant la rétention en eau.

Les valeurs de conductivité électrique (CE) mesurées sont inférieures à 1 dS/m, indiquant une salinité modérée et localisée. Cependant, selon (**Chennouf, K. et al 2022**) [74], même de faibles teneurs en

sels solubles (Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}) peuvent impacter le développement racinaire et la structure du sol dans un contexte d'irrigation intensive.

Tableau 8 : Résultats d'analyse chimiques des échantillons du périmètre d'El Hadjira

Pivot	Echantillon	pH	CE Ds/m	Calcaire Totale	Gypse	Texture
9	1	8,44	0,153	0,00	0,16	Sableuse
	2	8,20	0,80	0,80	1,44	Sableuse
10	1	8,20	0,72	1,00	0,37	Sablo -Limoneuse
	2	8,13	0,94	2,00	0,22	Sableuse

Ces résultats confirment que malgré leur texture légère et leur aération favorable, les sols présentent plusieurs contraintes : faible capacité de rétention en eau, alcalinité élevée et hétérogénéité chimique. Une gestion rigoureuse de l'irrigation et une fertilisation adaptée sont donc essentielles pour maintenir un potentiel agronomique acceptable dans ces conditions (Oueriemmi, H et all 2025) [75].

Partie 2 : Matériels et méthodes

1. Situation géographique de la station d'étude

L'exploitation COSIDER AGRICO Hadjira (El Gueddachi) est située dans la commune de Hadjira, wilaya de Touggourt, au sud-est de l'Algérie. Il s'agit d'une annexe du groupe Cosider Agrico, créée après la structure mère de Khenchela.



Figure 8 : Présentation de la station d'étude (source : Ihaddadene B. 2025)

Mise en service le 21 février 2021, cette exploitation couvre une superficie de 4 613 hectares, dédiée principalement à la culture de céréales (blé dur, blé tendre, orge) et à l'arboriculture fruitière, en s'inscrivant dans la dynamique de développement agricole du Sud, soutenue par les programmes nationaux d'investissement irrigué (FAO, 2022) [76].

Le site est divisé en deux blocs par la route de wilaya CW33 : le Bloc 1, au sud, s'étend sur 2 190 ha, tandis que le Bloc 2, au nord, occupe 2 423 ha. L'ensemble est équipé de 24 pivots d'irrigation fonctionnels (13 pivots de 30 hectares et 9 de 40 hectares), chacun alimenté par un forage indépendant. Cette infrastructure est particulièrement adaptée au climat saharien caractérisé par une

forte évapotranspiration et une irrégularité des précipitations, comme le recommandent les travaux de **(Bouzerzour & Hadj Sahraoui, 2022)** [77], sur la gestion efficiente de l'eau en céréaliculture saharienne.

Au cours de la campagne 2024–2025, l'exploitation a semé des variétés adaptées aux contraintes pédoclimatiques de la région : une variété de blé dur (Vitron R1, d'origine espagnole), deux variétés de blé tendre (HD1220, Maouna G4 et R1), ainsi qu'une variété d'orge (Saïda), reconnue pour sa tolérance aux stress abiotiques **(INRAA, 2023)** [78]. Ces choix répondent aux recommandations de la **(FAO, 2022)** [75], qui souligne l'importance de la sélection variétale et de l'ajustement technico-économique dans les zones arides du Maghreb.

L'expérience conduite dans le cadre de ce travail de recherche a été réalisée dans deux pivots distincts. Le pivot 09 de marque OCMIS d'origine Italien, situé dans le Bloc 1, couvre 30 hectares à une altitude de 131 mètres (latitude 32°35' Nord, longitude 5°46' Est). Le pivot 10 de marque ANABIB d'origine Algérien, implanté dans le Bloc 2, s'étend sur 40 hectares, à une altitude de 123 mètres (latitude 32°33' Nord, longitude 5°44' Est). Cette répartition permet une évaluation comparative des paramètres de croissance et de rendement dans des conditions relativement homogènes mais physiquement dissociées.

2. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans cette étude est la variété de blé dur Vitron R1, d'origine espagnole. Cette variété est connue pour sa bonne adaptation aux conditions agro climatiques arides, en particulier en région saharienne. Elle présente un cycle de développement moyen à tardif, une tolérance au stress hydrique et thermique, et une bonne qualité technologique **(INIA, 2021)** [79].

Selon la fiche technique de l'INIA, Vitron R1 est caractérisée par un taux de germination pouvant atteindre 100 % et un poids de mille grains (PMG) moyen de 55 g, ce qui reflète un bon potentiel de rendement. Cette variété est également appréciée pour son épi barbu, ses grains allongés à couleur ambrée, ainsi que sa tige semi-courte, réduisant les risques de verse.

Des essais réalisés dans le sud algérien confirment la performance agronomique de cette variété. **(Allam, A., et all 2015)** [80], ont notamment observé une bonne stabilité des rendements en conditions de culture sous pivot. Par ailleurs, **(Saidi ahlam 2018)** [81], soulignent la tolérance au stress hydrique de Vitron R1 comparée à d'autres variétés locales, ce qui justifie pleinement son utilisation dans les zones à fortes contraintes climatiques comme la région de Touggourt.

3. Conditions de déroulement de l'essai

3.1. Précédent Cultural

Le précédent cultural est un facteur agronomique déterminant, car il influence la fertilité du sol, la structure, la présence de maladies ou d'adventices, ainsi que la disponibilité des éléments nutritifs pour la culture suivante (**Islam, M. N. et al 2024**) [82]. Dans cette étude, le pivot 09 a été précédemment occupé par une culture de maïs (*Zea mays* L.), tandis que le pivot 10 a été utilisé pour la culture d'arachide (*Arachis hypogaea* L.).

Le maïs, plante exigeante en azote, peut laisser un sol relativement pauvre si la fertilisation n'a pas été bien compensée. Toutefois, ses résidus racinaires et son enracinement profond peuvent contribuer à améliorer la structure du sol (**Villamil, M. B., et al 2006**) [83]. En revanche, l'arachide est une légumineuse, capable de fixer l'azote atmosphérique grâce à ses nodosités, ce qui peut enrichir le sol en azote assimilable, bénéfique à la culture suivante comme le blé dur (**Kebede, E. 2021**) [84].

Ainsi, le choix du précédent cultural influence les performances agronomiques attendues du blé en pivot, notamment au niveau du développement végétatif, du tallage et du rendement final.

3.2. Pré Irrigation

La pré-irrigation consiste à apporter de l'eau au sol avant le semis ou le début de la saison culturale afin de créer des conditions hydriques optimales. Cette opération a plusieurs objectifs agronomiques majeurs : homogénéiser l'humidité du profil pédologique pour assurer une levée uniforme, activer la germination des graines d'adventices et des repousses résiduelles (permettant ainsi leur contrôle précoce), favoriser la lixiviation des sels en surface, et enfin, améliorer la maniabilité du sol lors des opérations de préparation (**Baboev, S., & Kulmamatova, D. 2023**) [85].

Dans le cadre de cette étude, une pré-irrigation a été réalisée sur les deux pivots concernés. Elle a été déclenchée le 21 novembre 2024 pour le pivot 09, et le 21 décembre 2024 pour le pivot 10. Ce décalage est lié à la planification différée des opérations de semis et à la disponibilité des équipements hydrauliques.

La réussite de cette étape est particulièrement importante dans les régions arides telles que Touggourt, où la gestion de l'humidité initiale du sol est un facteur critique pour garantir une bonne implantation de la culture, notamment du blé dur cultivé sous pivot (**El-Hendawy, S. et al 2023**) [29].

3.3.Travail de sol

Le travail du sol regroupe l'ensemble des opérations mécaniques destinées à préparer la parcelle en vue de l'implantation de la culture. Son objectif principal est de créer un environnement physique favorable à la germination, à l'enracinement et au développement des plantules. Il permet également l'enfouissement des résidus de culture précédents, la destruction des adventices et l'amélioration de la structure du sol en surface **Hobson, D et all 2022)** [86].

Dans cette étude, les interventions mécaniques sur les deux pivots ont été menées selon un itinéraire technique classique en agriculture sous pivot. Elles ont consisté successivement en :

- Un passage de cultivateur pour ameublir le sol et casser la croûte de battance,
- Un passage de cover-crop pour fragmenter les mottes et enfouir les résidus végétaux,
- Puis un rouleau lisse a été utilisé pour niveler la parcelle et affiner le lit de semence.

Cette séquence a permis d'obtenir une surface homogène, légèrement motteuse en profondeur mais bien tassée en surface, assurant ainsi un bon contact sol-graine et une levée rapide, conditions essentielles dans les zones arides comme Touggourt (**FAO, 2021)** [87].

3.4.Semis

Le semis est une étape décisive dans l'implantation de la culture, conditionnant à la fois la densité de peuplement et la vigueur des plantules. Dans le cadre de cette expérimentation, le semis en lignes a été réalisé à l'aide d'un semoir combiné, permettant à la fois le travail superficiel du sol, l'implantation des graines et le recouvrement homogène.

La profondeur de semis a été calibrée entre 2 et 3 cm, ce qui correspond aux recommandations techniques pour le blé dur dans les régions arides afin d'assurer une bonne levée, notamment en sols sableux (**Hazmoune, T., & Benlaribi, M. 2004)** [88].

La dose de semis appliquée était de 2,5 quintaux par hectare, soit 250 kg/ha, ce qui est conforme aux densités optimales pour les conditions agro-climatiques de Touggourt. Une densité excessive pourrait augmenter la compétition intra-spécifique, tandis qu'une densité trop faible exposerait la culture aux adventices et réduirait le rendement potentiel (**Choqiri, A. 2025)** [89].

Les dates de semis ont été échelonnées selon les blocs expérimentaux :

- **Pivot 09 (Bloc 1)** : semis effectué le 25 novembre 2024
- **Pivot 10 (Bloc 2)** : semis effectué le 25 décembre 2024

Ce décalage dans le calendrier cultural permet de comparer l'impact des conditions climatiques en début et en milieu d'hiver sur l'installation de la culture.

3.5.Fertilisation

La fertilisation constitue une composante essentielle de l'itinéraire technique du blé dur, visant à satisfaire les besoins nutritifs de la plante à différents stades de son développement. Elle repose principalement sur l'apport d'éléments majeurs, notamment l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K), indispensables à la formation de la biomasse, à l'induction florale, à la maturation des grains et à la qualité technologique de la récolte (**Zhang, H. et all 2024**) [90].

L'efficacité de la fertilisation dépend non seulement des doses apportées, mais aussi du fractionnement, du moment d'application, de la forme des engrais, des propriétés du sol, ainsi que des conditions climatiques, en particulier en zones arides où les pertes par volatilisation ou lessivage sont fréquentes (**FAO, 2023**) [91].

Dans le cadre de cette expérimentation, la stratégie de fertilisation adoptée a été adaptée aux caractéristiques physico-chimiques du sol et au type de culture précédente (maïs pour le pivot 09, arachide pour le pivot 10). Une attention particulière a été accordée à l'apport d'azote, dont le fractionnement est recommandé :

- Un premier apport au stade début tallage pour favoriser le développement végétatif.
- Un second au stade montaison pour soutenir la croissance des épis et le remplissage des grains.

Les engrais phosphatés ont été localisés au moment du semis pour favoriser le développement racinaire, tandis que l'apport potassique a été raisonné selon les analyses de sol. La gestion de la fertilisation a été réalisée dans une perspective d'optimisation de la réponse agronomique tout en limitant les pertes environnementales, conformément aux principes de l'agriculture raisonnée (**FAO, 2023**) [91].

3.5.1. Fertilisation phosphatée

La fertilisation phosphatée consiste à apporter au sol des engrais contenant du phosphore (P), élément essentiel à plusieurs processus physiologiques et biochimiques des plantes. Le phosphore intervient notamment dans la division cellulaire, la synthèse de l'ATP, la formation des racines, le développement des organes reproducteurs et la maturation des grains (**Fathi, A., & Mehdiniya Afra, J. 2023**) [92]. Sa disponibilité est particulièrement importante au début du cycle végétatif et au moment de la floraison, périodes où la demande des cultures en phosphore est élevée.

Dans le cadre de cette expérimentation, deux formulations d’engrais phosphatés ont été utilisées sur les pivots 09 et 10 :

- **Au semis** : Une application de MAP 12-52-0 (Mono-Ammonium Phosphate) a été réalisée à l’aide du semoir combiné, à une dose de 2 quintaux/ha. Cet apport visait à stimuler le développement racinaire et favoriser une levée homogène.
- **Au stade floraison** : Un second apport de phosphore a été effectué sous forme de MAP 12-61-0 via ferti-irrigation, à raison de 7 kg/ha, afin de répondre aux besoins accrus de la plante en phase de reproduction et d’assurer un bon remplissage des grains.

L’application localisée et fractionnée du phosphore permet une meilleure efficacité d’absorption, notamment en sol calcaire ou en conditions d’aridité, où la mobilité du phosphore est souvent réduite (Khourchi, S., et al 2023) [93]. En zones arides, comme à Touggourt, l’utilisation de sources solubles comme le MAP est recommandée pour maximiser la disponibilité du phosphore tout en évitant les pertes par fixation dans le sol (FAO, 2022) [94].

3.5.2. Fertilisation Azotée

La fertilisation azotée vise à fournir aux cultures un apport suffisant en azote (N), un élément majeur pour la croissance végétative, la synthèse des acides aminés, des protéines et de la chlorophylle. L’azote influence directement le tallage, la surface foliaire, la photosynthèse et, en conséquence, le rendement et la qualité du grain (Ma, Z., Zhang, Z et al 2024) [95].

Dans l’exploitation étudiée, deux formes principales d’engrais azotés ont été utilisées : l’urée (46 % N) et le sulfate d’ammonium (21 % N). Ces engrais ont été appliqués à différents stades de développement à travers deux modalités : l’épandage classique et la ferti-irrigation. Les tableaux ci-dessous présentent le détail des apports azotés exprimés en unités d’azote par hectare (U N/ha) pour les pivots 09 et 10.

Tableau 9 : Doses d’azote appliquées sur le pivot 9

Stade d’apport	Type d’engrais	Dose apportée (UN/ha)	Type d’application
Semis	MAP (12-52-0)	22	Semoir
Tallage	Urée 46%	138	Epandage
Fin tallage	NPK (15-15-15)	15	Epandage
Montaison	Sulfate d’ammonium 21%	12,25	Ferti-irrigation
Epiaison	Urée 46% + MAP (12-61-0)	46 + 12	Ferti-irrigation
Total cumulé		245,25	

Tableau 10 : Doses d'azote appliquées sur le pivot 10

Stade d'apport	Type d'engrais	Dose apportée (UN/ha)	Type d'application
Semis	MAP (12-52-0)	22	Semoir
Tallage	Urée 46%	138	Epandage
Fin tallage	NPK (15-15-15)	15	Epandage
Montaison	Sulfate d'ammonium 21%	11,5	Ferti-irrigation
Epiaison	Urée 46% + MAP (12-61-0)	11,5 + 5,25	Ferti-irrigation
Total cumulé		203,25	

L'azote a été distribué de manière fractionnée afin d'éviter les pertes par volatilisation, lessivage ou immobilisation. Cette stratégie est recommandée en climat aride où la disponibilité en eau est souvent irrégulière, ce qui conditionne la minéralisation naturelle de l'azote et son absorption (**Li, S., Wang, X., Kou, C., Lv, J., & Gao, J. (2022) [96]**).

La dose totale appliquée sur le pivot 9 (245,25 U N/ha) est supérieure à celle du pivot 10 (203,25 U N/ha), ce qui pourrait expliquer une différence de performance agronomique en fin de cycle, notamment au niveau du poids de mille grains (PMG) ou du rendement final.

3.6.Irrigation

L'irrigation est une pratique agronomique essentielle dans les zones arides ou semi-arides, visant à compenser le déficit hydrique lorsque les précipitations naturelles sont insuffisantes pour couvrir les besoins de la culture. Elle permet de maintenir un développement végétatif optimal, en particulier lors des stades critiques du cycle de croissance du blé (**Zwart & Bastiaanssen, 2004) [97]**).

Plusieurs méthodes d'irrigation sont utilisées dans le monde, notamment :

- L'irrigation par submersion (systèmes gravitaires),
- L'irrigation goutte à goutte (localisée, économe en eau),
- L'irrigation par aspersion, incluant les pivots centraux, largement adoptée dans les grandes exploitations agricoles pour leur efficacité et leur automatisation.

Le système par pivot central fonctionne sur la base d'une rampe d'aspersion montée sur roues, pivotant autour d'un axe fixe. Il permet une distribution uniforme de l'eau, circulaire, et est particulièrement bien adapté aux grandes surfaces irriguées comme celles de l'exploitation COSIDER AGRICO Hadjira.

Le tableau suivant présente les quantités d'eau appliquées par irrigation durant la campagne 2024-2025 sur les deux pivots 9 et 10 étudiés, en fonction des stades phénologiques de la culture :

Tableau 11 : Quantités d'eau d'irrigation applique sur les deux pivots

Stade repère	Vitesse (%)	Lame d'eau (mm)	Qté en (mm) Pivot 09	Qté en (mm) Pivot 10
Semis - 1Feuille	30	24,93	99,72	99,72
1Feuille – 4 Feuilles	100	7,48	344,08	216,92
4 Feuilles – Epi 1 cm	80	9,35	271,15	158,95
Montaison (épi 1 cm-épiaison)	80	9,35	187,05	186,05
Epiaison – Maturité	50	14,96	448,80	428,80
Total cumulé (mm)			1350,80	1081,44

Cette irrigation a été ajustée aux besoins hydriques de la culture selon les stades les plus sensibles, notamment entre la montaison et le remplissage du grain, où la demande en eau est maximale. Les apports ont été modulés par la vitesse du pivot, influençant la lame d'eau délivrée.

Des études montrent qu'un bon pilotage de l'irrigation en blé dur, notamment en phase reproductive, améliore significativement le poids de mille grains et la qualité boulangère, tout en limitant les stress hydriques (Tari, A. F. (2016) [98]).

3.7.Désherbage :

Durant la campagne culturale, le taux d'infestation en adventices observé sur les deux pivots étudiés (09 et 10) est resté relativement faible. Cette faible pression adventice n'a pas justifié le recours à des herbicides chimiques, et le désherbage a donc été effectué manuellement, notamment au stade de tallage. Ce choix présente des avantages agronomiques et environnementaux, notamment en limitant l'exposition des cultures aux résidus phytosanitaires et en préservant la biodiversité microbienne du sol.

Le désherbage manuel, bien que plus coûteux en main-d'œuvre, reste une pratique efficace dans les contextes où l'enherbement est faible et maîtrisable sans produits chimiques. Il est particulièrement adapté dans les systèmes d'irrigation localisée où l'intervention mécanique est difficile, et dans les cultures à haute valeur ajoutée ou dans les zones sensibles (Imran et Amanullah 2022) [99].

Par ailleurs, l'absence de traitements herbicides permet de prévenir l'apparition de résistances chez certaines espèces adventices, un phénomène en forte augmentation dans les zones à usage intensif d'herbicides (Philippe E. Hulme 2023) [100].

3.8.Récolte

L'arrêt de l'irrigation, étape cruciale précédant la moisson, a été effectué afin de permettre une dessiccation naturelle des plantes et ainsi optimiser la maturité des grains. Cette opération a été réalisée le 24 avril 2025 pour le pivot 09, et le 04 mai 2025 pour le pivot 10.

La récolte a été effectuée manuellement en raison de la petite échelle expérimentale et du besoin de précision dans la collecte des données agronomiques. Elle a eu lieu respectivement le 08 mai 2025 pour le pivot 09 et le 13 mai 2025 pour le pivot 10, soit environ deux semaines après l'arrêt de l'irrigation, ce qui correspond à la période de dessiccation nécessaire à l'atteinte de la maturité physiologique du blé dur.

Ce délai entre l'arrêt de l'irrigation et la moisson est cohérent avec les recommandations agronomiques pour les cultures de blé dur sous climat aride, permettant d'éviter les pertes de qualité dues à une humidité excessive au moment de la récolte (Oweis et al. 2020) [101] et (FAO, 2021) [87].

4. Paramètres a étudiés

4.1. Paramètres de rendement

Les mesures des paramètres de rendement ont été réalisées à partir de neuf placettes de 1 m², réparties aléatoirement dans chacun des deux pivots (09 et 10). Ce protocole vise à garantir la représentativité des données et à réduire les biais liés à l'hétérogénéité spatiale du peuplement. Les relevés ont été effectués manuellement à maturité physiologique.

1. **Nombre de plants par m²** : Nombre de plants levés par m², mesuré au stade 3 feuilles sur l'ensemble des placettes d'un m². Ce paramètre reflète la qualité de l'installation de la culture.
2. **Nombre de talles par m²** : Total des talles primaires et secondaires comptées à pleine expression du tallage, mesuré au stade plein tallage dans chaque placette.
3. **Coefficient de tallage** : Rapport entre le nombre de talles et le nombre de plantes par m². Il s'agit d'un indicateur de la vigueur végétative et de la capacité de ramification de la culture.
4. **Nombre d'épis par m²** : Nombre d'épis comptés au stade épiaison, correspondant aux structures reproductrices susceptibles de porter des grains.
5. **Nombre d'épillets par épi** : Déterminé à partir d'un échantillon de 20 épis (maître-brin) prélevés dans chaque pivot, ce paramètre renseigne sur la structure interne de l'épi.
6. **Nombre de grains par épi** : Compté manuellement sur les mêmes 20 épis maîtres-brins, il représente la capacité de fécondité par épi.
7. **Nombre de grains par m²** : Il reflète directement la productivité potentielle par surface, il calculé par la formule :

$$\text{Nombre de grains/m}^2 = \text{Nombre d'épis/m}^2 \times \text{Nombre moyen de grains/épi}$$

8. **Poids de mille grains (PMG) :** Mesuré sur un échantillon de 1000 grains secs provenant des 20 épis prélevés, il donne une indication sur la qualité du remplissage.
9. **Rendement en grain calculé (kg/ha) :** Ce calcul permet d'obtenir une estimation précise du rendement potentiel à partir des paramètres morpho-productifs. Estimé selon la formule suivante :

$$\text{Rendement (kg/ha)} = (\text{Nombre de grains/m}^2 \times \text{PMG (g)}) / 1000$$

Ce protocole s'appuie sur les recommandations méthodologiques d'évaluation du rendement dans les cultures céréalières publiées par (Hou, Y. et al 2024) [102], en particulier pour les zones arides et semi-arides où les performances sont très sensibles à l'environnement.



Figure 9 : Labour (Source : Ihaddadene B. 2025) **Figure 10 :** Semis (Source : Ihaddadene B. 2025)



Figure 11 : Levé (Source : Ihaddadene B. 2025) **Figure 12 :** Tallage (Source : Ihaddadene B. 2025)



Figure 13 : Montaison (Source : Ihaddadene B. 2025)

Figure 14 : Epiaison (Source : Ihaddadene B. 2025)



Figure 15 : Maturation (Source : Ihaddadene B. 2025)

Figure 16 : Récolte (Source : Ihaddadene B. 2025)

4.2. Paramètres de croissance

Les paramètres de croissance permettent de suivre l'évolution morphologique et physiologique des plantes tout au long de leur cycle de développement. Ils sont essentiels pour évaluer la performance végétative des variétés cultivées en interaction avec les conditions agro-climatiques et les pratiques culturales. Dans cette étude, les observations ont porté sur les caractères suivants :

1. **Longueur de l'épi avec barbes :** Mesure de l'ensemble de l'épi, y compris les barbes, exprimée en centimètres. Ce paramètre est un indicateur de la vigueur reproductive et peut être influencé par la variété et les conditions de croissance (**Benbelkacem & Kellou, 2000**) [103] et (**Hossain A. et al. 2022**) [104].
2. **Longueur de l'épi sans barbes :** Évaluation de la partie fertile de l'épi excluant les barbes. Elle est directement corrélée au nombre d'épillets, et donc au potentiel de grains par épi (**Sakuma, S., et al. 2019**) [105].

3. **Hauteur de la tige** : Distance entre le collet de la plante et le sommet de l'épi, mesurée au stade maturité physiologique. Elle reflète le comportement variétal, l'efficacité de l'allongement des entre-nœuds, et la réponse à l'azote (**Liu, X., et al 2022**) [106]. Des plantes de grande taille peuvent être plus sujettes à la verse, alors que des plantes plus courtes sont souvent plus stables et mieux adaptées aux conditions arides.

Ces mesures ont été réalisées sur des échantillons représentatifs de plantes (n = 20) pour chaque pivot, sélectionnés de manière aléatoire à maturité. Elles permettent une évaluation intégrée de la croissance végétative et reproductive en interaction avec les pratiques culturales (irrigation, fertilisation), ainsi qu'une meilleure compréhension du comportement variétal en conditions sahariennes.

5. Caractéristiques physico-chimiques du sol

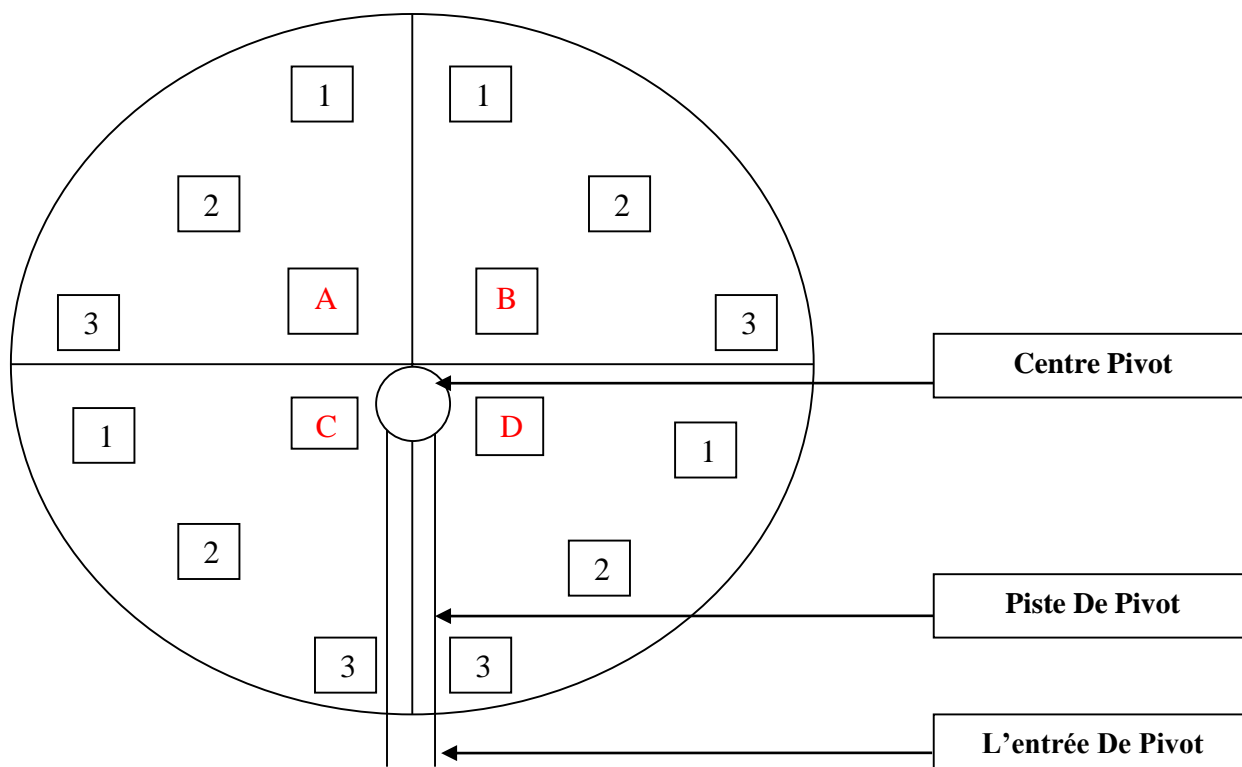
Afin d'évaluer les effets des pratiques culturales sur la dynamique du sol, une analyse physico-chimique a été conduite sur les deux parcelles expérimentales (pivots 09 et 10). Chaque pivot a été subdivisé en quatre parties homogènes. Pour chaque partie, trois échantillons de Sol ont été prélevés en diagonale, à une profondeur standard de 0–30 cm, selon la méthode recommandée par (**INRAE, 2021**) [107]. Ainsi, douze (12) échantillons ont été collectés par pivot.

Deux campagnes d'échantillonnage ont été réalisées :

- Avant l'implantation de la culture (pré-semis)
- Après la récolte (post-cycle végétatif)

Ces analyses avaient pour objectif de suivre l'évolution de trois paramètres fondamentaux de fertilité du sol :

1. **Le pH** : Révélateur de l'acidité ou alcalinité du milieu),
2. **La conductivité électrique (CE)** : Indicatrice de la salinité,
3. **Le taux de calcaire total** : Qui conditionne la disponibilité de certains nutriments comme le phosphore et le fer.



La Figure 17 : Schéma d'échantillonnage des sols dans les deux pivots 9 et 10

Conclusion

L'étude de la région de Touggourt, ainsi que la mise en œuvre de la méthodologie expérimentale, révèlent l'importance d'une approche intégrée pour faire face aux contraintes des environnements arides. Ceci nécessite d'adapter les pratiques agricoles aux spécificités climatiques et pédologiques de la région afin d'optimiser la gestion de l'eau et d'améliorer la productivité des cultures. La sélection de variétés adaptées et l'application de techniques d'irrigation efficaces s'avèrent cruciales pour garantir la durabilité de l'agriculture dans cette région saharienne. Cette étude met en lumière les défis et les opportunités qui se présentent pour l'agriculture irriguée dans le Grand Sud algérien, offrant des pistes pour un développement agricole durable.

CHAPTRE 3

Résultats et discussion

Chapitre III : Résultats et discussion

Introduction

Ce chapitre présente les résultats d'une étude approfondie sur les caractéristiques physico-chimiques du sol et le comportement agronomique du blé dur dans les pivots expérimentaux 09 et 10 de l'exploitation COSIDER AGRICO Hadjira. L'analyse se concentre sur des paramètres clés tels que le pH, la conductivité électrique et le taux de calcaire, qui sont essentiels pour évaluer la santé du sol et son aptitude à soutenir la culture dans un environnement saharien. En parallèle, plusieurs caractères agronomiques du blé, tels que le nombre de plants, le nombre de talles, le poids de mille grains et le rendement, sont examinés pour déterminer l'efficacité des pratiques culturales mises en place. Cette étude vise à fournir des informations précieuses sur l'adaptation des cultures aux conditions arides et sur l'optimisation des itinéraires techniques en agriculture irriguée.

1. Présentation des résultats de sol de la région d'étude

L'étude des caractéristiques physico-chimiques du sol dans les deux pivots expérimentaux (09 et 10) a permis d'évaluer trois paramètres clés : le pH, la conductivité électrique (CE) et le taux de calcaire total. Ces indicateurs sont essentiels pour apprécier l'état de santé du sol et son aptitude à soutenir une culture céréalière comme le blé dur dans un contexte saharien irrigué.

1.1. Evolution du pH du sol en fonction des pivots

L'analyse de la variance (ANOVA) appliquée aux valeurs de pH avant semis (pH_0) n'a révélé aucune différence significative entre les deux pivots, indiquant une homogénéité initiale des conditions chimiques du sol. Toutefois, à la maturité de la culture, les résultats montrent une différence hautement significative, soulignant une modification du pH sous l'effet combiné de la culture, de l'irrigation et de la fertilisation.

Comme l'indique la figure ci-dessus, le pivot 09 présente une baisse du pH, passant de 6,84 à 6,62, ce qui traduit une acidification modérée du sol. A l'inverse, le pivot 10 montre une légère augmentation du pH, de 7,04 à 7,11, suggérant un début d'alcalinisation.

Cette évolution différenciée peut s'expliquer par la qualité des eaux d'irrigation, la nature des engrais utilisés (par exemple, engrais ammoniacaux acidifiants dans le pivot 09), ou encore par des pratiques culturales différentes (FAO, 2022) [108]. L'acidification observée dans le pivot 09 pourrait réduire la disponibilité de certains nutriments si elle s'accroît, tandis que l'alcalinisation dans le pivot 10 pourrait freiner l'assimilation du phosphore ou du fer.

Chapitre III : Résultats et discussion

Sur le plan agronomique, un pH compris entre 6,5 et 7,5 est optimal pour la culture du blé dur (Rankel, K. 2024) [28]. Dans notre cas, les valeurs observées restent dans cette plage, mais leur tendance évolutive justifie une vigilance à moyen terme, surtout dans les systèmes irrigués du Sud, où la salinisation et l'alcalinisation sont des risques courants (Noreen, A. et al (2025) [109].

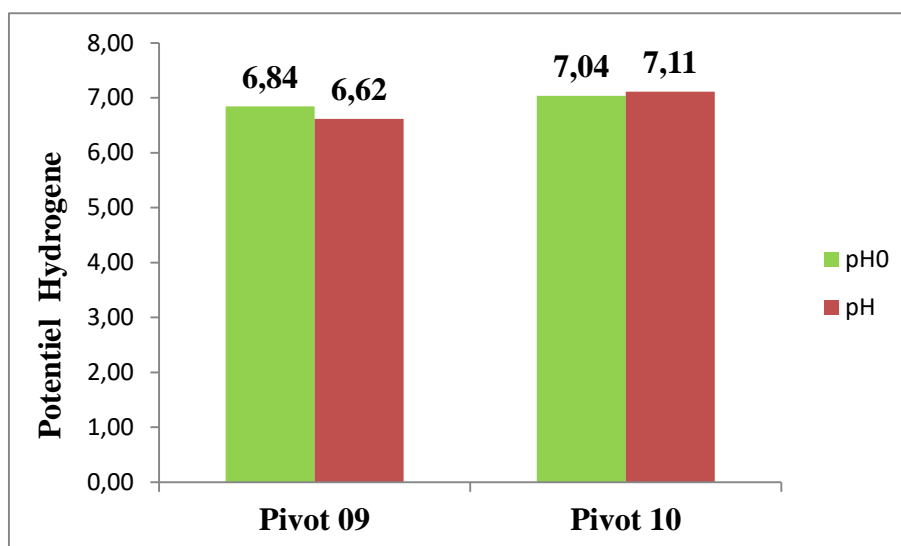


Figure 18 : Evolution du pH du sol avant semis (pH₀) et à maturité (pH) pour les pivots 09 et 10. On observe une baisse du pH dans le pivot 09 (acidification) et une légère hausse dans le pivot 10 (alcalinisation).

1.2. Evolution de la conductivité électrique

L'analyse statistique des données de conductivité électrique (CE) du sol n'a révélé aucune différence significative entre les deux pivots, que ce soit avant la mise en place de la culture ou à son stade de maturité. Toutefois, l'analyse graphique (Figure 9) indique une tendance à la baisse de la CE dans les deux cas : le pivot 09 passe de 1,52 à 1,36 dS/m, tandis que le pivot 10 passe de 1,60 à 1,49 dS/m, ce qui peut s'expliquer par un effet de lessivage des sels induit par l'irrigation (Bouhleb, M. et al 2024) [110].

La conductivité électrique (CE) du sol est un indicateur agronomique clé reflétant la concentration totale en sels solubles, notamment les ions Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻ et CO₃²⁻. Selon les recommandations de la (Omar, M. d. M. et al, 2024) [111], une CE inférieure à 2 dS/m est généralement tolérable pour les céréales, y compris le blé dur, tandis qu'une valeur supérieure à 4 dS/m peut entraîner une réduction significative des rendements, notamment dans des contextes de stress hydrique ou d'absorption racinaire limitée.

Chapitre III : Résultats et discussion

De plus, le maintien d'une CE faible est un critère essentiel pour préserver la fertilité des sols dans les zones arides et semi-arides. Une salinisation progressive est souvent observée en irrigation continue sans drainage adapté, et peut compromettre la structure du sol ainsi que la disponibilité en nutriments (Munns & Gilliam, 2015) [112]. Ainsi, une surveillance régulière de la CE, couplée à des pratiques de lessivage planifié et une gestion raisonnée des apports minéraux, s'avère indispensable.

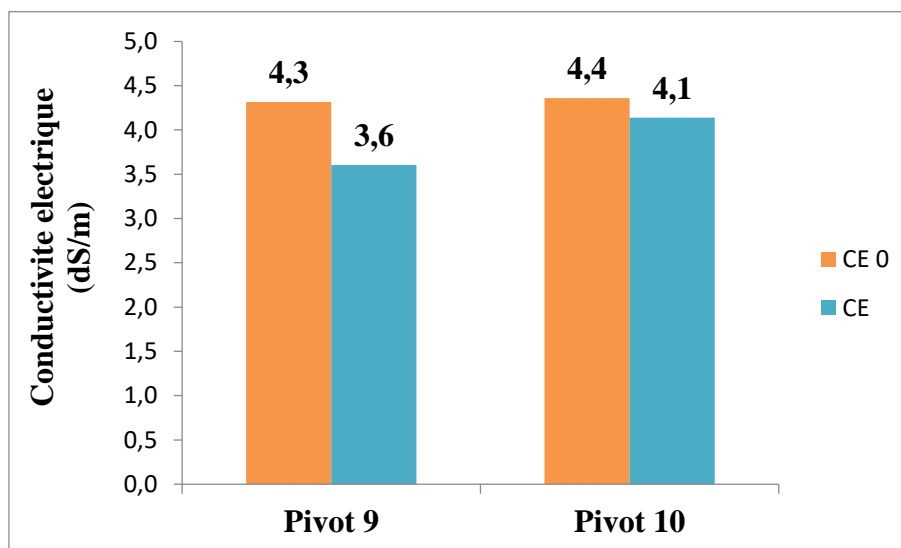


Figure 19 : Evolution de la conductivité électrique du sol (dS/m) avant implantation (CE₀) et à maturité (CE) dans les pivots 09 et 10. On observe une diminution modérée de la CE dans les deux cas, indiquant un possible lessivage des ions solubles.

1.3. Taux du calcaire total

L'analyse de la variance montre qu'il n'existe aucune différence statistiquement significative entre les deux pivots (09 et 10) concernant la teneur en calcaire total du sol avant l'implantation de la culture. Toutefois, les données présentées dans la figure 10 indiquent que le pivot 09 enregistre une teneur légèrement plus élevée (1,3 %) que le pivot 10 (1,2 %).

La présence de calcaire total dans les sols sahariens est fréquente, en lien avec leur origine alluviale et leur nature géochimique. Un taux modéré de calcaire (entre 1 et 5 %) peut améliorer la structure du sol et le drainage, mais des teneurs excessives (> 20 %) peuvent entraîner une carence induite en micronutriments, en particulier le fer et le zinc, en raison de leur précipitation sous forme insoluble (Moreno-Lora, A., & Delgado, A., 2023) [113].

Par ailleurs, en contexte salin, la composition ionique du sol joue un rôle crucial dans l'absorption des nutriments par la plante. Des niveaux élevés de sodium (Na⁺), notamment dans les sols soumis à

Chapitre III : Résultats et discussion

une irrigation intensive, peuvent perturber l'équilibre ionique du complexe absorbant et entraver l'absorption des ions calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), potassium (K^+), azote (N) et phosphore (P), ce qui nuit au métabolisme végétal et à la structure du sol (Rengasamy, 2016) [114] (Gupta & Huang, 2014) [115]. Cela justifie une surveillance conjointe du taux de calcaire, de la salinité et de la composition ionique pour optimiser la gestion nutritionnelle en agriculture irriguée.

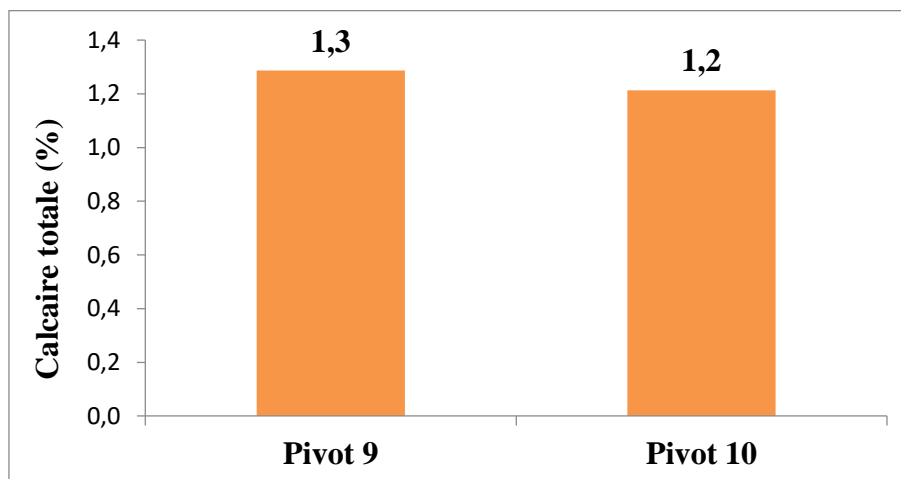


Figure 20 : Teneur en calcaire total (%) dans le sol des pivots 09 et 10 avant implantation. Aucune variation significative n'a été observée, bien que le pivot 09 présente une teneur légèrement plus élevée.

2. Analyse du comportement de la culture dans les deux pivots

L'expérimentation menée sur les pivots 09 et 10 de l'exploitation COSIDER AGRICO Hdjira a permis d'analyser et de comparer le comportement du blé dur en conditions irriguées sahariennes. Plusieurs paramètres agronomiques suivants ont été mesurés pour évaluer l'adaptation de la culture aux conditions locales et l'efficacité des itinéraires techniques mis en œuvre.

2.1. Caractères agronomiques

L'étude agronomique réalisée sur les deux pivots (09 et 10) de l'exploitation COSIDER AGRICO Hdjira a permis d'évaluer plusieurs composantes essentielles du rendement du blé dur. Ces caractères, influencés à la fois par des facteurs variétaux, édaphiques et climatiques, traduisent l'adaptation de la culture aux conditions agro écologiques locales et la performance des itinéraires techniques appliqués.

2.1.1. Nombre de plants au m²

L'analyse de la variance (ANOVA) indique qu'aucune différence significative n'a été observée entre les deux pivots (09 et 10) en ce qui concerne le nombre de plantes établies par mètre carré. La figure 11 montre toutefois une légère supériorité du pivot 09, avec 465,4 plants/m², contre 461,2 plants/m²

Chapitre III : Résultats et discussion

dans le pivot 10. Ces valeurs sont proches et traduisent une levée homogène et réussie dans les deux cas.

La densité de peuplement constitue une composante essentielle du rendement en culture céréalière. Elle dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels la qualité des semences, les conditions climatiques au moment du semis (température, humidité du sol), la profondeur de semis, et la densité de grains semés (Zhang J. et al. 2023) [116]. En effet, une densité optimale favorise un bon enracinement, un tallage équilibré et limite la compétition entre les plants. A l'inverse, un excès ou une insuffisance de peuplement peut entraîner une baisse de rendement ou une vulnérabilité accrue aux stress abiotiques.

Par ailleurs, le nombre de pieds par mètre carré constitue la base de l'architecture de rendement, conditionnant les phases ultérieures comme le tallage, le nombre d'épis, et la formation des grains (Bastos, L. M., et al. 2020) [117]. Ainsi, même si la différence entre les deux pivots est faible, ce paramètre mérite un suivi particulier, notamment dans un contexte aride où l'hétérogénéité de levée peut impacter le développement global de la culture.

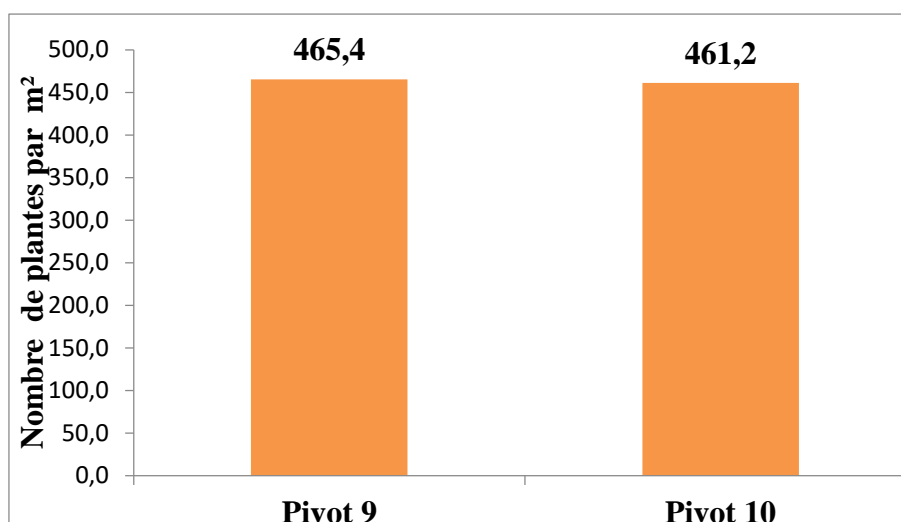


Figure 21 : Variation du nombre de plants par mètre carré dans les pivots 09 et 10. Les valeurs sont statistiquement équivalentes mais légèrement supérieures dans le pivot 09.

2.1.2. Nombre de talles au m²

L'analyse de la variance (ANOVA) montre qu'il n'existe pas de différence significative entre les deux pivots (09 et 10) en ce qui concerne le nombre de talles par mètre carré. La figure 12 indique que la valeur observée au niveau du pivot 9 est légèrement supérieure (1587,8 talles/m²) à celle du pivot 10 (1586,4 talles/m²), sans que cette variation ne soit statistiquement significative.

Chapitre III : Résultats et discussion

Le tallage constitue un caractère essentiellement variétal, mais également influencé par les conditions environnementales et agronomiques telles que la densité de semis, la profondeur de plantation, la fertilité du sol et l'absorption azotée (Zhang, X. et al. 2023) [118]. En conditions favorables, un bon tallage reflète le potentiel de ramification de la variété, augmentant ainsi les chances de formation d'épis fertiles.

Selon (Ishag, H. M. et all 1974 [119], une augmentation du nombre de talles herbacées peut engendrer une augmentation du nombre de talles épiées, bien qu'elle soit souvent accompagnée d'une mortalité élevée des talles non productives. D'autres études, comme celles de (Saini, A. et all 2023) [120], suggèrent que le tallage n'est pas toujours influencé par la variété, mais davantage par les conditions édaphiques et la conduite culturale. La profondeur de semis, la quantité d'azote disponible, et la teneur en argile du sol peuvent, par exemple, influencer le développement ou la régression des talles (Woźniak, A., & Rachoń, L. 2020) [121].

Ainsi, bien que ce paramètre n'ait pas différé significativement entre les deux parcelles, il demeure un critère agronomique important à surveiller dans les systèmes céréaliers irrigués, notamment en milieu saharien.

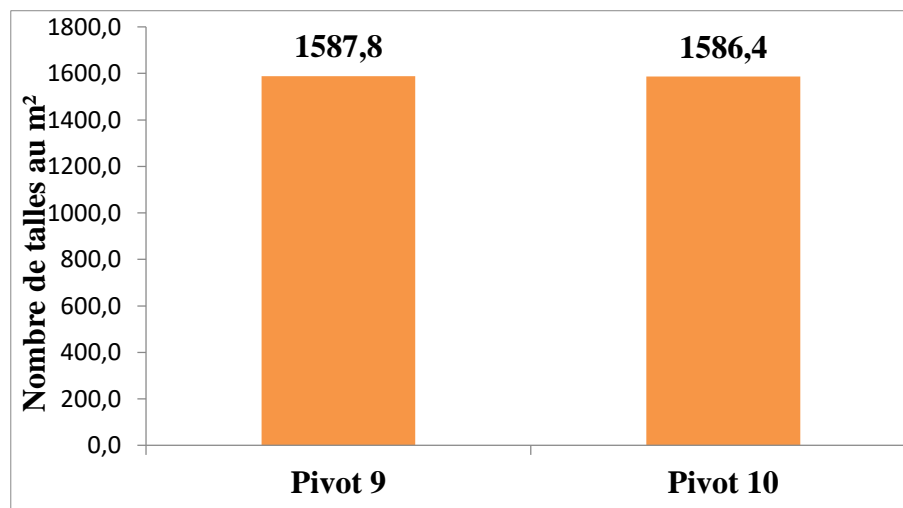


Figure 22: Variation du nombre de talles par mètre carré dans les pivots 09 et 10. Les valeurs sont proches, traduisant une homogénéité du tallage dans les deux sites expérimentaux.

2.1.3. Coefficient de tallage

L'analyse de la variance n'a révélé aucune différence significative entre les deux pivots (09 et 10) concernant le coefficient de tallage, un paramètre essentiel dans l'évaluation du potentiel de

Chapitre III : Résultats et discussion

ramification du blé dur. Comme le montre la figure 13, les deux pivots présentent une valeur identique de 3,4, traduisant une homogénéité des conditions de croissance et de la réponse variétale au tallage.

Le coefficient de tallage est défini comme le rapport entre le nombre de talles développées et le nombre de plantes établies. Il reflète la capacité de la plante à produire des tiges secondaires, susceptibles de porter des épis, et joue donc un rôle déterminant dans la constitution du rendement final (Mmbando, G. S. 2025) [122].

Le tallage est à la fois un caractère variétal et un indicateur de performance agronomique. En conditions favorables (fertilité du sol, disponibilité en eau et en azote, densité de semis modérée), un coefficient élevé est généralement associé à une meilleure valorisation du peuplement (Bastos L. M. and al. 2020) [117]. Toutefois, un tallage excessif peut entraîner une concurrence intra-spécifique entre les talles, générant une mortalité accrue des talles secondaires, surtout si les conditions deviennent limitantes au cours du cycle.

Ainsi, la valeur observée dans les deux pivots indique un niveau de ramification maîtrisé, compatible avec les objectifs de rendement en culture irriguée dans un contexte saharien.

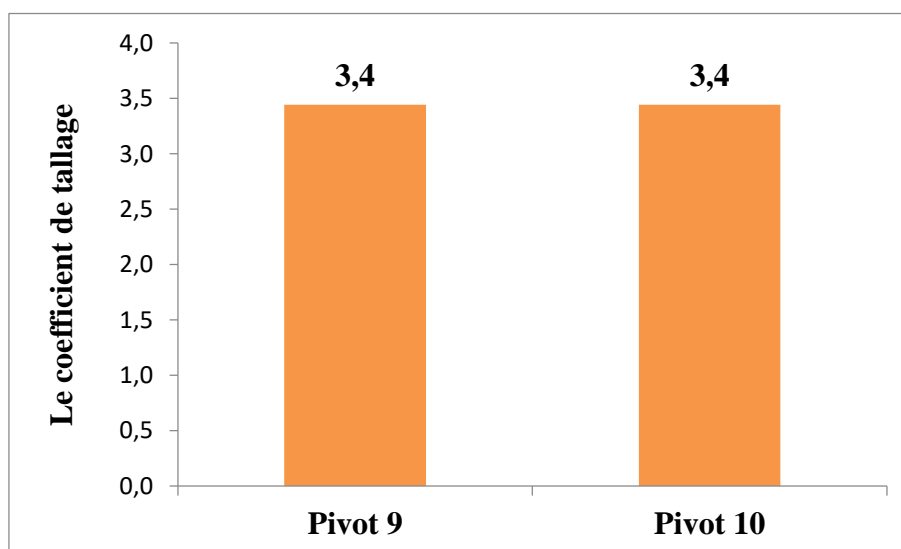


Figure 23 : Variation Coefficient de tallage mesuré dans les pivots 09 et 10. Les deux parcelles présentent une valeur identique (3,4), traduisant une réponse agronomique équivalente.

2.1.4. Nombre d'épis au m²

L'analyse de la variance indique qu'il n'existe pas de différence significative entre les deux pivots (09 et 10) en ce qui concerne le nombre d'épis par mètre carré. Comme l'illustre la figure 14, le pivot

Chapitre III : Résultats et discussion

10 affiche une densité légèrement supérieure (463,9 épis/m²) par rapport au pivot 9 (458,2 épis/m²), bien que cette différence ne soit pas statistiquement significative.

Le nombre d'épis par mètre carré est une composante majeure du rendement en blé. Il résulte de l'interaction entre plusieurs facteurs agronomiques et environnementaux. Selon (**Fischer, 2011**) [123], cette composante est fortement influencée par :

- Le facteur génétique (capacité de tallage de la variété),
- La densité de semis,
- La nutrition azotée,
- Et l'alimentation hydrique, notamment durant la période de tallage et de montaison.

La réussite du peuplement épiaison dépend également de la qualité du lit de semences, de la vigueur germinative et des conditions climatiques au moment de l'implantation. Comme le soulignent (**Reed, R. C et al 2022**) [124], un bon équilibre entre densité et ressources disponibles permet d'optimiser le nombre d'épis fertiles sans générer de compétition excessive entre les plantes.

En pratique, le nombre d'épis est la composante que l'agriculteur peut le mieux contrôler, notamment par le choix de la densité de semis adaptée au potentiel de rendement du sol et à la variété cultivée (**Yang, L. et al. 2023**) [125]. Il constitue donc un levier stratégique dans la conduite de la culture, en particulier en milieu irrigué comme c'est le cas dans cette étude.

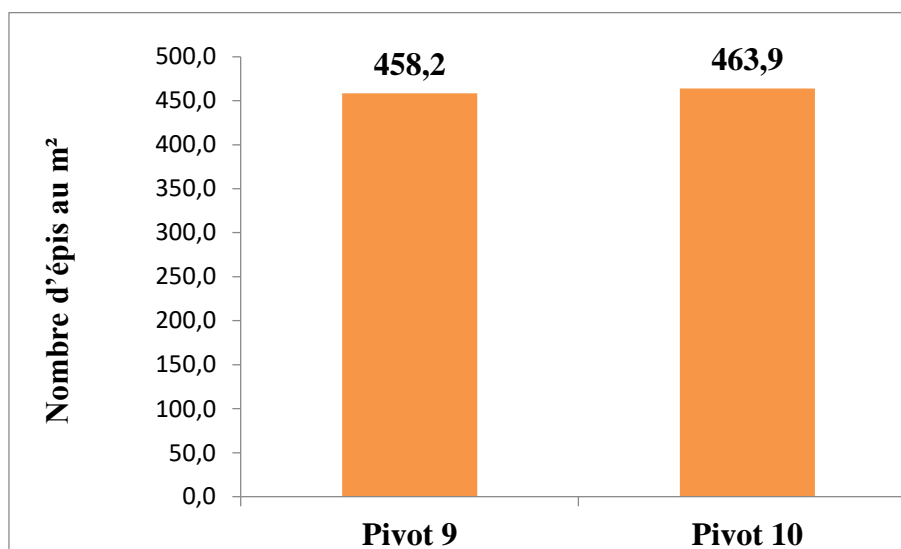


Figure 24 : Variation du nombre d'épi par m² en fonction des pivots. Les deux pivots présentent des valeurs proches, sans écart significatif. Le pivot 10 montre une densité légèrement supérieure.

Chapitre III : Résultats et discussion

2.1.5. Nombre d'épillets par épi

L'analyse de la variance indique qu'il n'existe pas de différence significative entre les deux pivots concernant le nombre moyen d'épillets par épi. Comme l'indique la figure 15, le pivot 9 présente une valeur légèrement plus élevée (17,4 épillets/épi) que le pivot 10 (16,9 épillets/épi), bien que cet écart ne soit pas statistiquement significatif.

Le nombre d'épillets par épi est un paramètre morphologique important, car chaque épillet est susceptible de produire plusieurs fleurs fertiles et donc des grains. Ce caractère est largement déterminé par la génétique variétale, mais aussi influencé par les conditions de croissance durant les phases précoces de développement, en particulier pendant la montaison (Yu, X., et al., 2023) [126].

Cependant, selon (Prieto, P., et al. 2020) [127], un nombre élevé d'épillets est souvent corrélé à une épiaison tardive, ce qui peut être un inconvénient en climat méditerranéen aride ou semi-aride, où le cycle court est privilégié pour éviter les stress thermiques en fin de cycle.

Le nombre d'épillets peut aussi être affecté indirectement par la densité des épis : lorsque le peuplement est trop dense, la compétition pour les ressources peut limiter le développement complet de chaque épi. Ce paramètre doit donc être interprété dans une logique d'équilibre physiologique global entre densité, nutrition et conditions climatiques.

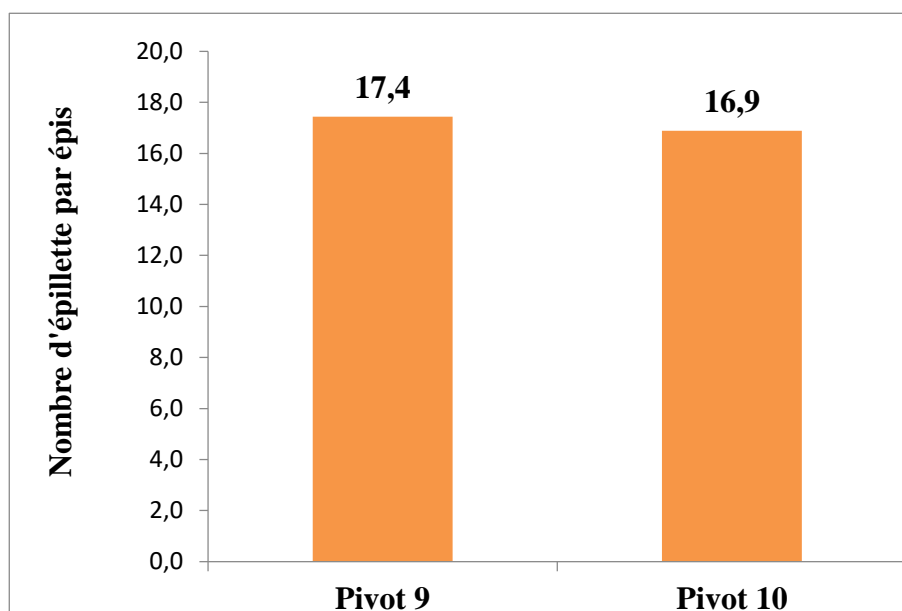


Figure 25 : Variation de nombre d'épillets par épis selon les pivots. L'écart est faible entre les deux pivots, et aucune différence significative n'est observée.

Chapitre III : Résultats et discussion

2.1.6. Nombre de grains au m²

L'analyse de la variance ne révèle aucune différence significative entre les deux pivots pour le paramètre nombre de grains par mètre carré. La figure 16 montre néanmoins une légère supériorité du pivot 10, avec une moyenne de 24 515,4 grains/m², contre 23 786,3 grains/m² pour le pivot 9.

Le nombre de grains par unité de surface est une composante essentielle du rendement, directement influencée par le nombre d'épis par m², le nombre de grains par épi, ainsi que par les conditions de fécondation et de remplissage (L. Vicentinet al. 2020) [128]. Il s'agit d'un indicateur agronomique fondamental, car il résulte de l'interaction entre facteurs génétiques (variété), agronomiques (densité de semis, fertilisation azotée) et environnementaux (stress hydrique, températures post-anthèse).

Selon (Boulelouah, N. et al. 2022) [129], le rendement en grains est généralement mieux corrélé au nombre total de grains produits qu'au poids moyen des grains, notamment dans les milieux semi-arides où les conditions climatiques limitent le PMG.

Ainsi, même si les écarts entre les pivots ne sont pas significatifs statistiquement, la tendance observée peut refléter une meilleure efficacité de tallage ou de fécondation dans le pivot 10, à analyser en lien avec les autres composantes de rendement.

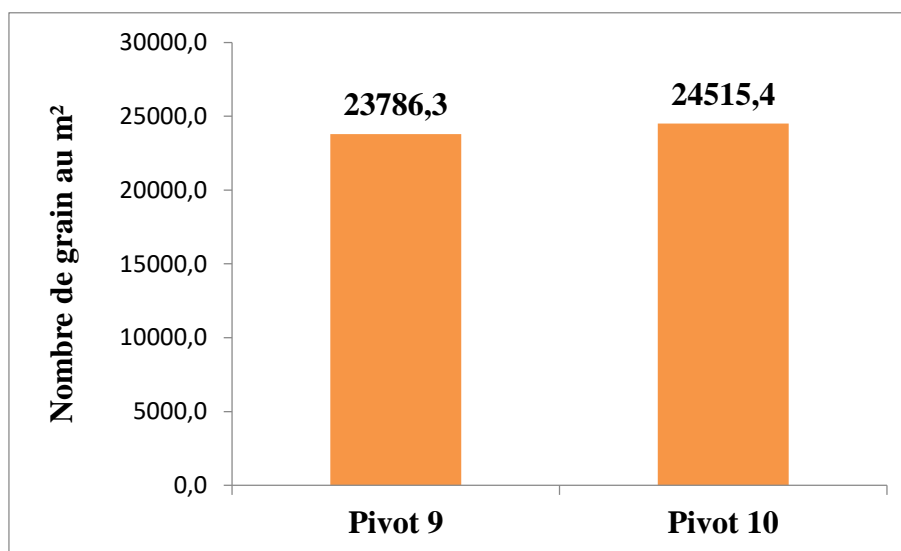


Figure 26 : Variation de nombre de grains par m² en selon les pivots. Une différence modérée est observée, sans signification statistique.

2.1.7. Nombre grains par épi

L'analyse de la variance montre qu'il n'existe aucune différence significative entre les deux pivots en ce qui concerne le nombre moyen de grains par épi. Comme l'indique la figure 17, une légère

Chapitre III : Résultats et discussion

supériorité est enregistrée au niveau du pivot 9 avec 52,2 grains/épi, contre 51,6 grains/épi au pivot 10.

Le nombre de grains par épi est l'une des principales composantes du rendement, fortement influencée par des facteurs génétiques (variété), mais également environnementaux (températures, disponibilité hydrique durant la floraison et le remplissage), ainsi que par la densité d'épis/m² (Slafer et al. 2014) [130]. En effet, une densité élevée d'épis peut induire une compétition accrue pour les ressources, réduisant ainsi le nombre de grains formés par épi (González et al. 2011) [131].

De plus, la fertilité des épillets, déterminée par la réussite de la floraison et la fécondation, joue un rôle essentiel. Une gestion optimisée de l'irrigation et de la nutrition azotée peut donc contribuer à améliorer cette composante (Elía et al. 2020) [132].



Figure 27 : Variation de nombre de grains par épi en selon les pivots. Une différence faible, non significative, est observée en faveur du pivot 9.

2.1.8. Poids de mille grains (PMG)

L'analyse de la variance indique l'existence d'une différence hautement significative entre les deux pivots pour le poids de mille grains (PMG). Comme l'illustre la Figure 18, la valeur enregistrée au pivot 9 est de 45,5 g, contre 41,4 g au pivot 10.

Le PMG est une composante essentielle du rendement, car il reflète la capacité de la plante à transférer les nutriments absorbés ou produits de métabolisme vers les grains durant la phase de remplissage. Il est fortement influencé par les conditions climatiques post-anthèse, notamment la température et la

Chapitre III : Résultats et discussion

disponibilité en eau, ainsi que par la nutrition minérale, en particulier les apports en azote et en potassium (N. Akhtar, et al 2013) [133].

Selon (Ullah, N. et al. 2024) [134], une bonne assimilation post-floraison et une nutrition équilibrée peuvent accroître significativement le PMG, surtout dans les zones soumises à un stress hydrique ou thermique. Par conséquent, le PMG est souvent utilisé dans les modèles empiriques d'estimation du rendement.

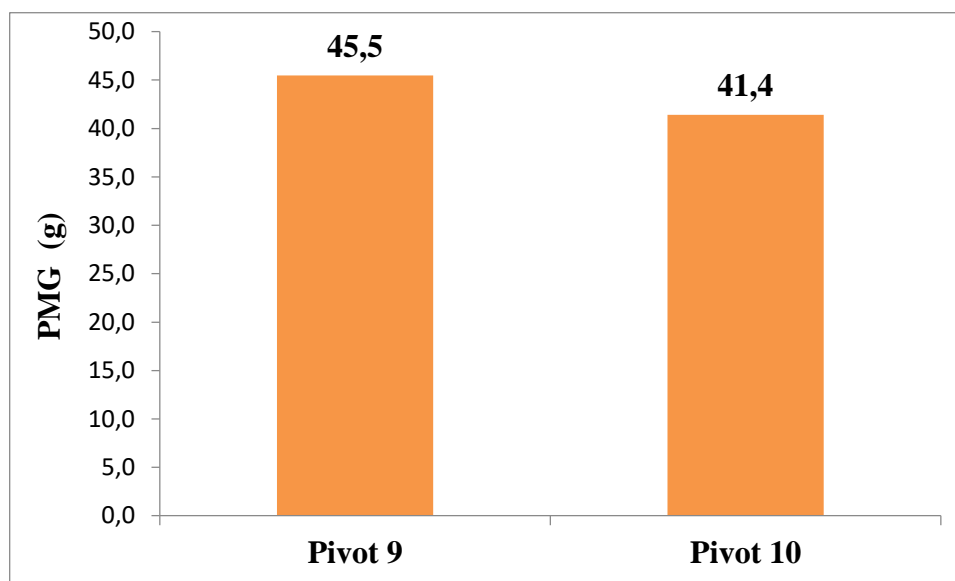


Figure 28 : Variation du poids de mille grains (PMG) en selon les pivots. Le pivot 9 montre une supériorité significative du PMG par rapport au pivot 10.

2.1.9. Rendement grain calculé

L'analyse de la variance montre qu'il n'existe pas de différence significative entre les deux pivots en ce qui concerne le rendement en grains exprimé en kg/ha. Toutefois, des écarts numériques ont été relevés.

Comme l'illustre la figure 19, le pivot 9 présente un rendement de 1,09 g/m², légèrement supérieur à celui du pivot 10, estimé à 1,03 g/m².

Ce rendement est calculé à partir des composantes du rendement : le nombre d'épis par m², le nombre de grains par épi, et le poids de mille grains (PMG). Ces trois paramètres, bien qu'individuellement influencés par des facteurs variés (variété, nutrition, irrigation, stress thermique), interagissent pour déterminer la performance globale de la culture (Talukder, R. et al. 2023) [135].

Chapitre III : Résultats et discussion

Dans les systèmes irrigués en zone aride, la gestion fine des apports hydriques et des nutriments, ainsi que le choix variétal, peuvent permettre d'atteindre des rendements très élevés, comme ceux observés ici, malgré l'absence de différence statistiquement significative (Bouazzama, B.et al, 2024) [136]. Cela suggère une bonne uniformité des pratiques culturales et des conditions édaphiques entre les deux pivots.

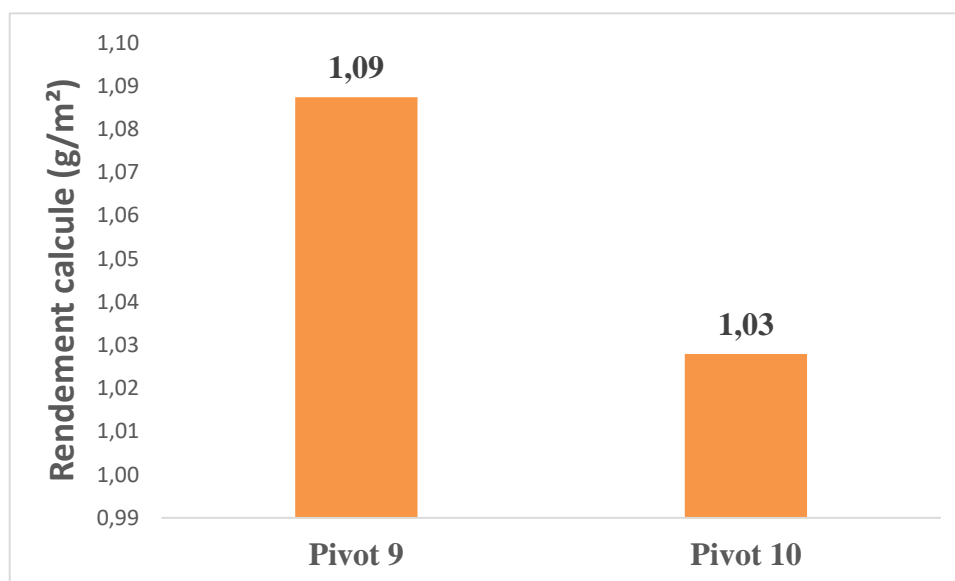


Figure 29 : Variation du rendement calculé (g/m²) en fonction des pivots. Le pivot 9 présente un rendement légèrement supérieur à celui du pivot 10, bien que la différence ne soit pas statistiquement significative.

2.2. Caractères De Croissances

Les caractères de croissance du blé dur, tels que la longueur des épis (avec ou sans barbes) et la hauteur des tiges, constituent des indicateurs morphologiques essentiels, souvent corrélés au potentiel de rendement. Dans cette étude, ces paramètres ont été analysés au niveau de deux pivots (09 et 10), sous conditions climatiques arides.

2.2.1. Longueur d'épis avec barbes

L'analyse statistique des données montre l'absence de différence significative entre les deux pivots (09 et 10) en ce qui concerne la longueur des épis, barbes comprises. Toutefois, la figure 20 révèle une légère supériorité du pivot 10, dont la longueur moyenne des épis atteint 19,4 cm, contre 17,3 cm pour le pivot 9.

Chapitre III : Résultats et discussion

La longueur de l'épi est un caractère agronomique important, car elle est souvent corrélée à la fertilité de l'épi et au nombre d'épillets, influençant ainsi le nombre potentiel de grains. Cependant, elle peut aussi être influencée par des facteurs génétiques (variété cultivée), nutritionnels (disponibilité en azote et phosphore), et climatiques, notamment la disponibilité hydrique pendant la phase de montaison à floraison (Liu, H. et al. 2024) [137].

La présence de barbes, caractéristiques du blé dur, joue également un rôle dans la photosynthèse de l'épi, surtout en conditions de stress hydrique. Des études ont montré que les barbes peuvent contribuer jusqu'à 20 à 30 % de la photosynthèse totale de l'épi en période de remplissage du grain, ce qui les rend particulièrement importantes dans les milieux arides comme celui de Touggourt (Maydup, M. L. et al. 2014) [138].

La variation observée entre les deux pivots pourrait donc être liée à des différences microclimatiques, d'irrigation, ou à une hétérogénéité du sol, bien que la non-significativité statistique indique que cet écart reste dans la marge de variabilité normale.

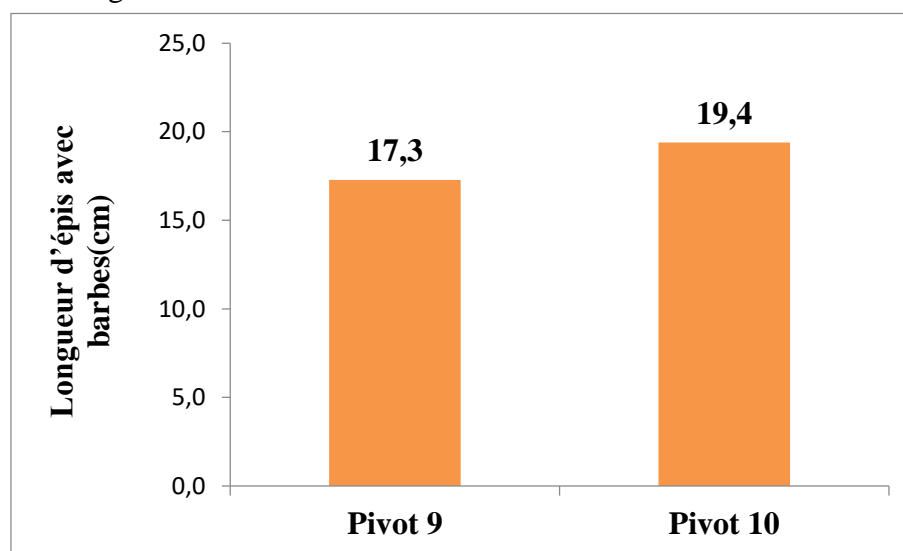


Figure 30 : Variation de la longueur d'épi avec barbes en fonction des pivots

2.2.2. Longueur d'épis sans barbe

L'analyse de la variance montre qu'il n'existe aucune différence significative entre les deux pivots (09 et 10) concernant la longueur de l'épi sans les barbes. Toutefois, la figure 21 met en évidence une légère supériorité du pivot 10 avec une longueur moyenne de 6,9 cm, contre 6,8 cm pour le pivot 9.

La longueur de l'épi sans barbes est un paramètre morphologique indicateur du développement floral et du potentiel de portance en épillets. Bien qu'elle ne soit pas directement liée au rendement grainier,

Chapitre III : Résultats et discussion

elle reste utile pour évaluer la morphologie variétale, surtout en conditions d'adaptation à des milieux arides (A. P.Aboughadareh, et al. 2020) [139].

La faible variation entre les deux pivots s'explique vraisemblablement par une homogénéité dans les conditions de conduite culturale (date de semis, irrigation, fertilisation) et par l'utilisation de la même variété, ce qui limite l'expression des différences morphologiques (Bendjama, A., & Ramdani, S. 2022) [140].

Enfin, la contribution des épis au rendement n'est pas uniquement fonction de leur longueur, mais dépend aussi du nombre d'épillets, de la fertilité des fleurs et du remplissage des grains, qui peuvent être influencés par la nutrition azotée et les conditions de température post-anthèse (Slafer & Savin, 2020) [141].

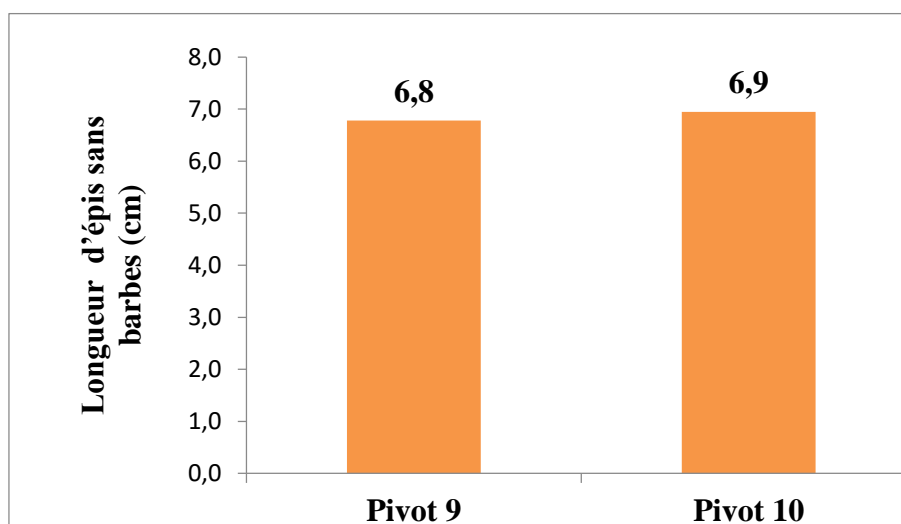


Figure 31 : Variation de La longueur d'épis sans barbes en fonction des pivots

2.2.3. La hauteur de la tige

L'analyse de la variance montre qu'il n'existe aucune différence significative entre les deux pivots concernant la hauteur des tiges. Toutefois, comme l'illustre la figure ci-après, la hauteur moyenne enregistrée au pivot 9 (66,6 cm) est légèrement supérieure à celle observée au pivot 10 (65,7 cm).

La hauteur de la tige est un paramètre agronomique important car elle influence la résistance à la verse, l'efficacité photosynthétique et la capacité de tallage. Des recherches ont montré que les plantes de petite taille sont généralement plus productives en conditions arides, car elles présentent une meilleure stabilité mécanique et une répartition plus efficace des ressources vers les organes reproducteurs (Javed, H. M. et all 2024) [142].

Chapitre III : Résultats et discussion

De plus, une faible hauteur permet d'échapper aux dommages causés par les vents forts et limite les pertes dues à la verse, en particulier dans les systèmes irrigués sous pivot, où les contraintes mécaniques sont fréquentes (Piñera-Chávez, F. J, 2016) [143].

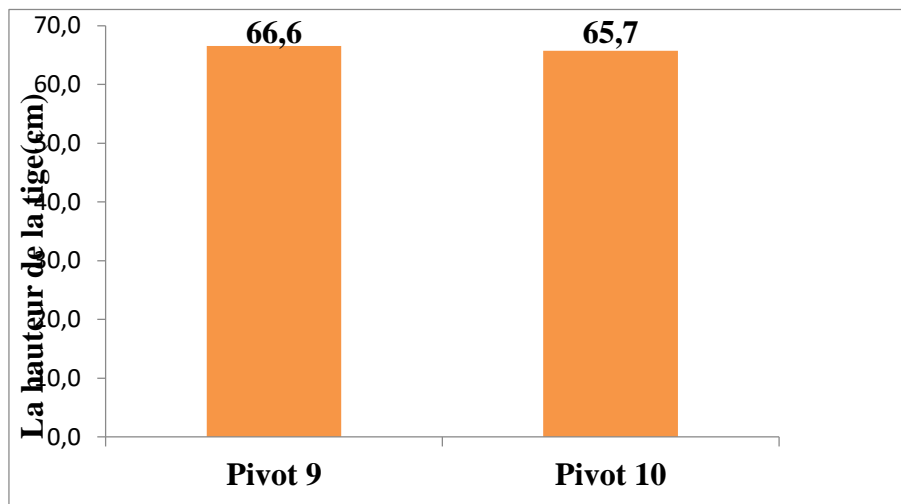


Figure 32 : Variation de La hauteur de la tige en fonction des pivots

Conclusion

Les résultats de cette étude mettent en évidence des différences significatives dans les paramètres physico-chimiques du sol et les performances agronomiques du blé dur entre les pivots 09 et 10. Bien que certaines variations ne soient pas statistiquement significatives, elles révèlent des tendances importantes en matière d'acidification, de conductivité électrique et de rendement. L'analyse souligne également l'importance d'une gestion rigoureuse des apports en eau et en nutriments pour maximiser la productivité des cultures dans un contexte saharien. Ces résultats contribuent à une meilleure compréhension des défis et des opportunités pour l'agriculture irriguée en Algérie, tout en soulignant la nécessité d'une surveillance continue des paramètres du sol pour garantir la durabilité des systèmes de culture.

Conclusion générale

Conclusion

Conclusion générale

Les résultats obtenus au cours de cette étude comparative entre les deux pivots de culture révèlent l'existence de différences notables dans les paramètres physico-chimiques du sol et dans les performances agronomiques du blé dur (*Triticum durum* Desf.), bien que certaines de ces différences ne soient pas statistiquement significatives. Ces variations, souvent subtiles mais structurelles, traduisent des dynamiques agronomiques complexes influencées par la nature du sol, les pratiques culturales appliquées, les conditions climatiques locales et les précédents culturaux.

En particulier, les évolutions observées du pH, de la conductivité électrique (CE) et du calcaire total indiquent une influence mesurable des régimes d'irrigation et de fertilisation sur la chimie du sol. L'acidification modérée dans l'un des pivots, combinée à une baisse de la CE, pourrait suggérer une lixiviation des éléments solubles, potentiellement bénéfique à court terme, mais à surveiller à long terme. De même, les performances agronomiques, évaluées à travers des critères tels que le nombre d'épis/m², le poids de mille grains (PMG) ou le rendement calculé (kg/ha), témoignent d'une interaction forte entre la dynamique du sol et la réponse physiologique de la culture.

Cette étude met en lumière l'importance d'une gestion intégrée et raisonnée de l'irrigation, de la fertilisation et des rotations culturales, surtout dans un environnement saharien fragile, marqué par la rareté de l'eau, l'aridité du climat, et la faible teneur en matière organique des sols. Elle confirme que la durabilité des systèmes de culture repose sur un suivi rigoureux des indicateurs pédologiques et sur l'adaptation permanente des pratiques culturales aux conditions locales. Les perspectives futures incluent notamment :

- **L'expérimentation de nouvelles variétés de blé dur mieux adaptées aux stress abiotiques (chaleur, salinité, sécheresse) ;**
- **L'optimisation des doses et du fractionnement des apports en eau et en éléments fertilisants, notamment l'azote, à travers des outils de pilotage agro climatique et des capteurs ;**
- **L'intégration d'approches agro écologiques, telles que l'introduction de cultures de couverture ou de biofertilisants, pour améliorer la structure du sol et réduire la dépendance aux intrants.**

En effet, cette étude apporte une contribution utile à la compréhension des facteurs déterminants du rendement du blé dur en contexte oasien irrigué, tout en soulignant les leviers techniques et stratégiques disponibles pour renforcer la résilience et la durabilité des systèmes de production céréalière dans les zones arides d'Algérie.

Annexes

Annexe 1

1. Méthodes d'analyses du sol et de l'eau d'irrigation

1.1. Détermination du pH

Le pH du sol a été déterminé par la méthode électro-métrique, fondée sur la loi de Nernst, à l'aide d'un pH-mètre à électrodes combinées. Cette méthode, recommandée par (Mosley, L. M et all 2024) [144], pour les analyses pédologiques classiques, et normalisée par (Mosley, L. M et all 2024) [144], sous la norme NF ISO 10390, permet de mesurer l'activité des ions hydronium (H_3O^+) dans une suspension sol/eau.

L'analyse a été réalisée dans une suspension à ratio 1:5, conformément aux recommandations de (Kargos, G et al, 2018) [145], selon le protocole suivant :

- Prélever et peser 20 g de sol finement tamisé (≤ 2 mm),
- Ajouter 100 ml d'eau distillée,
- Agiter la suspension pendant 10 minutes,
- Laisser reposer 1 heure à température ambiante,
- Filtrer, puis mesurer le pH à l'aide d'un pH-mètre étalonné.

1.2. Détermination de la conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique du sol (CE) est une mesure indirecte de la concentration totale en sels dissous présents dans la solution du sol. Elle a été déterminée à l'aide d'un conductimètre, sur un extrait sol/eau avec un ratio de 1 : 5, à une température de 25 °C, selon la méthode décrite par (FAO. 2021) [146].

La procédure est la suivante :

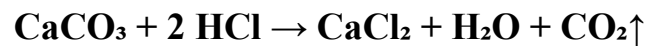
- Prélever 20 g de sol finement tamisé (≤ 2 mm),
- Ajouter 100 mL d'eau distillée,
- Agiter mécaniquement pendant 10 minutes,
- Laisser reposer 1 heure,
- Filtrer la suspension,
- Mesurer la conductivité électrique de l'extrait filtré.

Annexes

1.3. Détermination du calcaire totale

La teneur en calcaire total (CaCO_3) a été déterminée à l'aide d'un calcimètre de Bernard, une méthode volumétrique reposant sur la réaction entre le carbonate de calcium et l'acide chlorhydrique (HCl). Cette réaction libère du dioxyde de carbone (CO_2), dont le volume est mesuré dans un tube gradué.

La réaction chimique s'écrit comme suit :



Cette méthode est décrite par (Aubert, 1978) et demeure une référence dans les analyses de routine pour les sols calcaires. Les résultats sont exprimés en pourcentage de CaCO_3 total.

Annexes 2

1 Analyse de variance de pH

1.1 Analyse de variance de pH avant la mise en place de la culture

pH ₀	SS	Degr. of Freedom	MS	F	P
Intercepte	1155,788	1	1155,788	6611,269	0,000000
Pivot	0,234	1	0,234	1,339	0,259667
Erreur	3,846	22	0,175		

1.2 Analyse de variance de pH à la maturité de la plante

pH	SS	Degr. of Freedom	MS	F	P
Intercepte	1130,528	1	1130,528	7000,438	0,000000
Pivot	1,460	1	1,460	9,042	0,006488
Erreur	3,553	22	0,161		

2. Analyse de variance de la CE

2.1 Analyse de variance de la CE avant la mise en place de la culture

CE ₀	SS	Degr. of Freedom	MS	F	P
Intercepte	451,3603	1	451,3603	296,6750	0,000000
Pivot	0,0104	1	0,0104	0,0068	0,934802
Erreur	33,4707	22	1,5214		

2.2 Analyse de variance de CE à la maturité de la plante

CE	SS	Degr. of Freedom	MS	F	P
Intercepte	359,6778	1	359,6778	432,3494	0,000000
Pivot	1,7013	1	1,7013	2,0451	0,166748
Erreur	18,3021	22	0,8319		

3. Analyse de variance de calcaire total

CaCO ₃	SS	Degr. of Freedom	MS	F	P
Intercepte	37,50000	1	37,50000	1056,428	0,000000
Pivot	0,03227	1	0,03227	0,909	0,350739
Erreur	0,78093	22	0,03550		

Annexes

4. Analyse de variance de nombre de plants au m²

P/m ²	SS	Degr. of Freedom	MS	F	P
Intercepte	3864200	1	3864200	1168,275	0,000000
Pivot	80	1	80	0,024	0,878189
Erreur	52922	16	3308		

5. Analyse de variance de nombre de talles au m²

T/m ²	SS	Degr. of Freedom	MS	F	P
Intercepte	45340590	1	45340590	682,1443	0,000000
Pivot	8	1	8	0,0001	0,991382
Erreur	1063484	16	66468		

6. Analyse de variance de coefficient de tallage

CT	SS	Degr. of Freedom	MS	F	P
Intercepte	213,5556	1	213,5556	768,8000	0,000000
Pivot	0,0000	1	0,0000	0,0000	1,000000
Erreur	4,4444	16	0,2778		

7. Analyse de variance de nombre d'épis au m²

E/m ²	SS	Degr. of Freedom	MS	F	P
Intercepte	3826300	1	3826300	573,1080	0,000000
Pivot	145	1	145	0,0216	0,884878
Erreur	106822	16	6676		

8. Analyse de variance de nombre d'épillets par épis

Ets/m ²	SS	Degr. of Freedom	MS	F	P
Intercepte	5304,500	1	5304,500	283,7474	0,000000
Pivot	1,389	1	1,389	0,0743	0,788670
Erreur	299,111	16	18,694		

9. Analyse de variance de nombre de grains au m²

G/m ²	SS	Degr. of Freedom	MS	F	P
Intercepte	48464,22	1	48464,22	250,1559	0,000000
Pivot	2,00	1	2,00	0,0103	0,920334
Erreur	3099,78	16	193,74		

Annexes

10. Analyse de variance de nombre de grains par épis

G/E	SS	Degr. of Freedom	MS	F	P
Intercepte	10498777814	1	10498777814	137,8967	0,000000
Pivot	2392214	1	2392214	0,0314	0,861530
Erreur	1218161376	16	76135086		

11. Analyse de variance de poids de milles grains

PMG	SS	Degr. of Freedom	MS	F	P
Intercepte	33955,31	1	33955,31	11542,97	0,000000
Pivot	74,54	1	74,54	25,34	0,000122
Erreur	47,07	16	2,94		

12. Analyse de variance de rendement calculé

RC	SS	Degr. of Freedom	MS	F	P
Intercepte	201361,1	1	201361,1	124,3975	0,000000
Pivot	158,9	1	158,9	0,0981	0,758108
Erreur	25899,0	16	1618,7		

13. Analyse de variance de longueur d'épis avec barbes

EAB	SS	Degr. of Freedom	MS	F	P
Intercepte	6050,000	1	6050,000	567,9270	0,000000
Pivot	20,056	1	20,056	1,8827	0,188964
Erreur	170,444	16	10,653		

14. Analyse de variance de longueur d'épis sans barbes

ESB	SS	Degr. of Freedom	MS	F	P
Intercepte	847,3472	1	847,3472	384,3087	0,000000
Pivot	0,1250	1	0,1250	0,0567	0,814824
Erreur	35,2778	16	2,2049		

15. Analyse de variance de la hauteur de la tige

ESB	SS	Degr. of Freedom	MS	F	P
Intercepte	78738,35	1	78738,35	3659,294	0,000000
Pivot	3,12	1	3,12	0,145	0,708147
Erreur	344,28	16	21,52		

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1]	Telma de Sousa, Miguel Ribeiro, Carolina Sabença et Gilberto Igrejas 2021 The 10,000-Year Success Story of Wheat! 10(9), 2124.
[2]	Zhao, X., Nave, M., Wang, Z. et al. (2023). Population genomics unravels the Holocene history of bread wheat and its relatives. <i>Nature Plants</i> , 9, 403–419.
[3]	Feng, F., & Mascher, M. (2023). Ancient genomes reveal early selection for reduced seed shattering in domesticated wheat. <i>Nature Plants</i> , 9(3), 352–361.
[4]	Out, W. A., Honegger, M., Linseele, V., & Briois, F. (2016). Plant exploitation in Neolithic Sudan: A review in the light of new data from the cemeteries R12 and Ghaba. <i>Quaternary International</i> , 390–391, 1–18.
[5]	Mulazzani, S., Lucarini, G., & Broodbank, J. (2016). The emergence of the Neolithic in North Africa: A new model for the Eastern Maghreb. In C. Manen, T. Perrin, & J. Guilaine (Éds.), <i>La transition néolithique en Méditerranée</i> (pp. 453–461). Arles : Errance & Toulouse : Archives d'Écologie Préhistorique.
[6]	Shewry, P. R., & Hey, S. J. (2015). The contribution of wheat to human diet and health. <i>Food and Energy Security</i> , 4(3), 178–202.
[7]	Madani, I. (2022). Plasticité du système racinaire du blé en condition de carence en N, P ou K révélée par développement d'une méthodologie de phénotypage intégrant les poils absorbants (Thèse de doctorat, Université de Montpellier).
[8]	Groli, E. L., Frascaroli, E., Maccaferri, M., Ammar, K., & Tuberosa, R. (2024). Dissecting the effect of heat stress on durum wheat under field conditions : impacts on stem and leaf traits. <i>Frontiers in Plant Science</i> , 15, 1393349.
[9]	Wang, Z., Li, H., Zhou, X., Mou, Y., Zhang, Y., et al. (2024). Identification, validation and candidate gene analysis of major QTL for supernumerary spikelets in wheat. <i>BMC Genomics</i> , 25, Article 675.
[10]	[Frontiers in Plant Science editorial (2024). Independent genetic factors control spikelet number and fertile floret development in durum wheat. <i>Frontiers in Plant Science</i> , 15, Article 139040.
[11]	Xie, Z., et al. (2023). Deciphering spike architecture formation towards yield improvement. <i>Journal of Plant Biology</i> , 66(3), 223–237.
[12]	Ji, Y., Hewavithana, T., Sharpe, A. G., & Jin, L. (2024). Understanding grain development in the Poaceae family by comparing conserved and distinctive pathways through omics studies in wheat and maize. <i>Frontiers in Plant Science</i> , 15, 1393140.
[13]	Zhang, H., & Wang, Q. (2024). Spatial distribution of functional components in the wheat grain : structural basis and processing implications. <i>Plants</i> , 12(11), 2192.
[14]	Ammar, M. K., Hanafi, R. S., Choucry, M. A., & Handoussa, H. (2023). Structural, functional, nutritional composition and analytical profiling of <i>Triticum aestivum</i> L. <i>Applied Biological Chemistry</i> , 66, Article 48.
[15]	Angiosperm Phylogeny Group. (2016). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants : APG IV. <i>Botanical Journal of the Linnean Society</i> , 181(1), 1–20.
[16]	Chase, M. W., Christenhusz, M. J. M., Fay, M. F., Byng, J. W., Judd, W. S., Soltis, D. E., ... & Stevens, P. F. (2016). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants : APG IV. <i>Botanical Journal of the Linnean Society</i> , 181(1), 1–20.
[17]	Lancashire, P. D., Bleiholder, H., Boom, T. van den, Langelüddeke, P., Stauss, R., Weber, E., & Witzemberger, A. (1991). A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. <i>Annals of Applied Biology</i> , 119(3), 561–601.
[18]	Slafer, G. A., & Rawson, H. M. (1994). Growth stages in wheat: Germination, tillering, double-ridge and terminal spikelet. In <i>Wheat Growth and Physiology</i> (pp. 35–48). FAO Plant Production and Protection Series. Disponible via FAO : Wheat growth and physiology (chap. 3)

Références bibliographiques

[19]	Rodrigues, G. I., Araus, J. L., & Slafer, G. A. (2022). Changes in developmental phases and ecophysiological traits during improvement in Brazilian barley breeding. <i>Frontiers in Plant Science</i> , 13, 103224.
[20]	Li, Z., Wang, J., & Zhang, L. (2024). Physiological and biochemical changes induced by drought stress during the stem elongation and anthesis stages in the <i>Triticum</i> genus. <i>Environmental and Experimental Botany</i> , 228, 106047.
[21]	Ferrante, A., Przetakiewicz, W., & De Vita, P. (2023). Pre-anthesis spike growth dynamics and its association with yield components in wheat under Mediterranean conditions. <i>Field Crops Research</i> , 291, 108860.
[22]	Plaut, Z., Butow, B. J., Blumenthal, C. S., & Wrigley, C. W. (2004). Transport of dry matter into developing wheat kernels and its contribution to grain yield under post-anthesis water deficit and elevated temperature. <i>Field Crops Research</i> , 86(2-3), 185-198.
[23]	Corinne Celestina , Maxwell T. Bloomfield , Katia Stefanova et James R. Hunt 2020 Use of spike moisture content to define physiological maturity and quantify progress through grain development in wheat and barley. <i>Crop and Pasture Science</i> 72(2) 95-104.
[24]	Zadoks, J. C., Chang, T. T., & Konzak, C. F. (2024). A scale and code for the growth stages of cereals (BBCH scale). <i>Journal of Agricultural Science</i> , 162(4), 401–411.
[25]	Liotard, I., Bousset, L., & Rebetzke, G. (2024). Durum wheat productivity today and tomorrow: A review of influencing factors and climate change effects. <i>Resources, Environment and Sustainability</i> , 17, 100170.
[26]	Batlla, D. & Benech-Arnold, R. L. (2015). A framework for the interpretation of temperature effects on dormancy and germination in seed populations showing dormancy. <i>Seed Science Research</i> , 25(2), 1–12.
[27]	Li, Y., Zhao, J., Ma, H., Pu, L., Zhang, J., Huang, X., Yang, H., & Fan, G. (2024). Shade tolerance in wheat is related to photosynthetic limitation and morphological and physiological acclimations. <i>Frontiers in Plant Science</i> , 15, Article 1465925.
[28]	Rankel, K. (2024). <i>Ultimate Guide to Soil for Durum Wheat</i> . Greg.app.
[29]	El-Hendawy, S., Alsamin, B., Mohammed, N., & Refay, Y. (2023). Improving morpho-physiological indicators, yield, and water productivity of wheat through an optimal combination of mulching and planting patterns in arid farming systems. <i>Agronomy</i> , 13(6), 1660.
[30]	Matthews, N., & Jones, H. G. (2024). Durum wheat productivity today and tomorrow: A review of influencing factors and climate change effects. <i>Resources, Environment and Sustainability</i> , 17, 100170.
[31]	Six, J., & Schneider, F. (2022). Transition to conservation agriculture : how tillage intensity and covering affect soil physical parameters. <i>Soil</i> , 8, 213–232.
[32]	Yagmur, M., & Kaydan, D. (2009). The effects of different sowing depth on grain yield and some yield components in wheat cultivars under dryland conditions. <i>African Journal of Biotechnology</i> , 8(2).
[33]	Gadaleta, A., Lacolla, G., Giove, S. L., Fortunato, S., Nigro, D., Mastro, M. A., ... & Vita, F. (2022). Durum wheat response to organic and mineral fertilization with application of different levels and types of phosphorus-based fertilizers. <i>Agronomy</i> , 12(8), 1861.
[34]	Gamal, A. E.-B. M., & El-Miniawy, M. S. (2018). Effect of split application of different N rates on productivity and nitrogen use efficiency of bread wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.). <i>Agriculture & Food Security</i> , 7(1), 52.
[35]	Gadaleta, A., et al. (2022). Durum wheat response to organic and mineral fertilization ... <i>Agronomy</i> , 12(8), 1861.
[36]	Messaoudi, A., Labdelli, F., Rebouh, N. Y., Djerbaoui, M., Kucher, D. E., Hadjout, S., Ouaret, W., Zakharova, O. A., & Latati, M. (2023). Investigating the potassium fertilization effect on morphological and agrophysiological indicators of durum wheat under Mediterranean rain-fed conditions. <i>Agriculture</i> , 13(6), 1142.
[37]	Food Unfolded. (2022). <i>Crops That Feed the World Wheat</i> . FoodUnfolded.

Références bibliographiques

[38]	Frontiers in Agronomy. (2024). Assessing temporal variability in durum wheat performance and stability under changing climatic conditions. <i>Frontiers in Agronomy</i> , 3, 146604.
[39]	FAO. (2023). FAOSTAT statistical database.
[40]	Wei, S.-Y., & Zhou, W.-X. (2025). Dynamic structural resilience of international staple food trade networks. arXiv.
[41]	Martínez-Moreno, F., Ammar, K., & Solís, I. (2022). Global changes in cultivated area and breeding activities of durum wheat from 1800 to date : à historical review. <i>Agronomy</i> , 12(5), 1135.
[42]	USDA FAS. (2025). Grain and Feed Annual : Algeria.
[43]	Braun, F., et al. (2023). Yield components and yield quality of old and modern wheat cultivars as affected by cultivar release date, N fertilization and environment in Germany. <i>Field Crops Research</i> , 302, 109094.
[44]	Senapati, N., Halford, N. G., & Semenov, M. A. (2021). Drought tolerance during reproductive development is important for increasing wheat yield potential under climate change in Europe. <i>Journal of Experimental Botany</i> , 70(9), 2549–2560.
[45]	Bah, M., Traoré, O., & Diop, O. (2024, juillet). Cereal production in Africa : the threat of current plant pathogens in changing climate – a review. <i>Discover Agriculture</i> , 2, Article 33.
[46]	Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S. J., Esker, P., McRoberts, N., & Nelson, A. (2019). The global burden of pathogens and pests on major food crops. <i>Nature Ecology & Evolution</i> , 3, 430–439.
[47]	Ding, Y., Zhang, F., Li, X., & Wang, L. (2024). Fusarium pseudograminearum biomass and toxin accumulation in wheat tissues with and without Fusarium crown rot symptoms. <i>Frontiers in Plant Science</i> , 15, 136–148.
[48]	Mansfield, J., et al. (2023). Advances in understanding bacterial pathogens of cereals. <i>Molecular Plant Pathology</i> , 24(1), 45–62.
[49]	Scalante, M., Sanz-Saez, I., Jacobson, T., Otulak-Kozieł, A., Kozieł, M., Balkcom, S., Zhao, S., & Conner, A. (2024). Plant virus transmission during seed development and implications to plant defense system. <i>Frontiers in Plant Science</i> , 15, Article 1385456.
[50]	Derrouch, D., Chauvel, B., Cordeau, S. & Dessaint, F. (2021). Functional shifts in weed community composition following adoption of conservation agriculture. <i>Weed Research</i> , 62(1), 103–112.
[51]	Zhang, H., Zhu, J., Gong, Z., & Zhu, J.-K. (2022). Abiotic Stress Responses in Plants. <i>Nature Reviews Genetics</i> , 23(2), 104–119.
[52]	Zhang, K., Zhang, R., Yang, Z., Deng, J., Abdullah, A., Zhou, C., Lv, X., Wang, R., & Ma, Z. (2023). Efficient Wheat Lodging Detection Using UAV Remote Sensing Images and an Innovative Multi-Branch Classification Framework. <i>Remote Sensing</i> , 15(18), 4572.
[53]	Djanaguiraman, M., Narayanan, S., Erdayani, E., & Prasad, P. V. V. (2020). Effects of high temperature stress during anthesis and grain filling periods on photosynthesis, lipids and grain yield in wheat. <i>BMC Plant Biology</i> , 20, Article 268.
[54]	Zhang, K., Jia, M., Shen, Y., & Li, S. (2021). Cold stress in wheat: Morphological, physiological and molecular mechanisms. <i>Frontiers in Plant Science</i> , 12, 676884.
[55]	Luo, H., Liu, S., Song, Y., Qin, T., Xiao, S., Li, W., Xu, L., & Zhou, X. (2024). Effects of waterlogging stress on root growth and soil nutrient loss of winter wheat at seedling stage. <i>Agronomy</i> , 14(6), 1247.
[56]	Office National des Statistiques (ONS) Algérie. (2021). Répartition de la superficie des wilayas nouvellement créées [Données]. ONS.
[57]	Institut National de Cartographie et de Télédétection. (2023). Carte administrative de la wilaya de Touggourt (version vectorisée).
[58]	Bennamia, M. M., Boutoutaou, D., Saggai, S., Gheriani, S., & El Fergougui, M. (2024). Study of the relationship between evaporation, soil water deficit, and air temperature in arid regions: Case of the Touggourt zone. <i>Journal of Ecological Engineering</i> , 25(9), 101–115.
[59]	Wu, Y., Li, H., Cui, J., Han, Y., Li, H., Miao, B., Tang, Y., Li, Z. & Zhang, J. (2024). Precipitation variation: a key factor regulating plant diversity in semi-arid livestock grazing lands. <i>Frontiers in Plant Science</i> , 15, Article 1294895.

Références bibliographiques

[60]	Merabti, A., Darouich, H., Paredes, P., Meddi, M. & Pereira, L. S. (2023). Assessing Spatial Variability and Trends of Droughts in Eastern Algeria Using SPI, RDI, PDSI, and Med PDSI—A Novel Drought Index Using the FAO-56 Evapotranspiration Method. <i>Water</i> , 15(4), 626.
[60a]	Direction des Services de l'Agriculture, Wilaya de Touggourt. (2023). Bulletin climatique annuel 2009–2018. Touggourt, Algérie.
[60b]	Climate-Data.org. (2024). Climate statistics for Touggourt [Data set]. Retrieved June 2025,
[61]	Senapati, N., Halford, N. G., & Semenov, M. A. (2021). Vulnerability of European wheat to extreme heat and drought around flowering under future climate. <i>Environmental Research Letters</i> , 16(2), 024052.
[62]	Pi, H., Edwards, B. L., & Li, B. (2023). Understanding soil wind erosion and control practices in arid and semiarid environments [Éditorial]. <i>Frontiers in Environmental Science</i> , 11, Article 1119742. [75] Devein
[63]	Zereg, S., & Belouz, K. (2022). Prediction of reference evapotranspiration in northwestern Africa with limited data using factorial and SVM regressions. <i>Modeling Earth Systems and Environment</i> , 8, 5129–5142.
[64]	El-Shirbeny, M. A., & Ali, A. M. (2021). Agricultural Water Monitoring for Water Management Under Pivot Irrigation System Using Spatial Techniques. <i>Earth Systems and Environment</i> , 5, 341–351.
[65]	iao, P. & Hu, S.-J. (2023). Estimation of evapotranspiration in the desert–oasis transition zone using the water balance method and groundwater level fluctuation method: case of <i>Haloxylon ammodendron</i> at the edge of the Gurbantunggut Desert. <i>Water</i> , 15(6), 1210.
[66]	Benmouiza, K. (2023). Solar zoning maps of Algeria based on sunshine duration data and Kriging method. <i>International Journal of Heat and Technology</i> , 41(3), 217–228.
[67]	Oulimar, I., Bouchouicha, K., Menguellati, F., Bailek, N., & Bellaoui, M. (2024). Solar radiation measurements in the Adrar region of Algeria: Radiometric stations, statistics, and comparison with MERRA2 data. In Ziani, S. et al. (Eds.), <i>Lecture Notes in Electrical Engineering</i> , Vol. 1224, 63–71.
[68]	Blenda, A. et al. (2024). Durum Wheat at Risk in a Climate Change Scenario: The Carotenoid Content is Affected by Short Heat Waves. <i>Journal of Agricultural and Food Chemistry</i> , 72(14), 11258–11267.
[69]	Betayeb Abdelhamid (2018), Caractérisation de la nappe mi pliocène de la région d'El Hadjira. Mémoire de fin d'étude, département de géologie, université de de KASDI MERBAH Ouargla, P 55, p (34_37.
[70]	ERESS, 1969). Étude Régionale pour l'Évaluation et la Sauvegarde des Systèmes aquifères. Carte hydrogéologique des deux nappes du Sahara septentrional avec le sens d'écoulement des deux nappes.
[71]	Telli Siham (2022), étude des sols de la région d'El Hadjira. Mémoire de fin d'étude, département de science agronomique, université de KASDI MERBAH OUARGLA, P 77, p (32-34).
[72]	Baize, D., Girard, M.-C., Boulaine, J., Cheverry, C., & Ruellan, A. (2008). Référentiel pédologique français. Association Française pour l'Étude du Sol (AFES).
[73]	USS Working Group WRB. (2022). World Reference Base for Soil Resources: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps (4th ed.). International Union of Soil Sciences (IUSS).
[74]	Chennouf, K., Mokhtari, F., Tliba, O. B., & Abdessamie, Z. (2022). Caractérisation de la salinité des sols de la région d'Oued Souf par plusieurs extraits aqueux. Mémoire de Master, Université d'El-Oued.
[75]	Oueriemmi, H., Zoghلامي, R. I., Le Guyader, E., Mekki, F., Suidi, Y., Bennour, A., Moussa, M., Sbih, M., Saidi, S., Morvan, X., & Ouessar, M. (2025). Addressing Soil Fertility Challenges in Arid Agriculture: A Two-Year Evaluation of Combined Soil Organic Amendments Under Saline Irrigation. <i>Soil Systems</i> , 9(1), 16.
[76]	FAO. (2022). Wheat production systems in North Africa and the Middle East : Challenges and innovation pathways.
[77]	Bouzerzour, H., & Hdj Sahraoui, Y. (2022). Adaptation variétale et pratiques culturales du blé dur en climat aride d'Algérie. <i>Cahiers Agricultures</i> , 31(3), 26–35.

Références bibliographiques

[78]	INRAA (Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie). (2023). Guide technique de la culture du blé dur en zone saharienne. Alger : Ministère de l'Agriculture.
[79]	INIA – Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. (2021). Catálogo de variedades de trigo duro: Ficha técnica de Vitron R1. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, España.
[80]	Allam, A., Tirichine, A., Madani, H., Benlamoudi, W., & Attali, Y. (2015). Agronomic and morphological evaluation of durum wheat cultivars (<i>Triticum durum</i> Desf.) cultivated in the palm-groves of the Oued Righ valley, Algerian southeast. <i>Revue des Bioressources</i> , 5(2), 10-10.
[81]	Saidi ahlam 2018 Université Mohamed BOUDIAF de M'Sila
[82]	Islam, M. N., Oviedo-Ludena, M. A., Kutcher, H. R., et al. (2024). Cropping sequence affects the structure and diversity of pathogenic and non-pathogenic soil microbial communities. <i>Plant and Soil</i> , 495, 517–534.
[83]	Villamil, M. B., Bollero, G. A., Bullock, D. G., & RG Darmody, FW Simmons. (2006). Residue retention and precision nitrogen management effects on soil physicochemical properties and productivity of maize-wheat-mungbean system in Indo-Gangetic Plains. <i>Frontiers in Sustainable Food Systems</i> , 8, 1259607.
[84]	Kebede, E. (2021). Contribution, utilization, and improvement of legumes-driven biological nitrogen fixation in agricultural systems. <i>Frontiers in Sustainable Food Systems</i> , 5, 767998.
[85]	Baboev, S., & Kulmamatova, D. (2023). Influence of pre-sowing irrigation on seed generation in winter wheat. <i>BIO Web of Conferences</i> , 78, 03014.
[86]	Hobson, D., Harty, M., Tracy, S. R., & McDonnell, K. (2022). The effect of tillage depth and traffic management on soil properties and root development during two growth stages of winter wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.). <i>SOIL</i> , 8, 391–406.
[87]	FAO. (2021). Irrigation techniques and water productivity in arid and semi-arid areas. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
[88]	Hazmoune, T., & Benlaribi, M. (2004). Étude comparée de l'effet de la profondeur de semis sur les caractères de production de trois géotypes de <i>Triticum durum</i> Desf. en zone semi-aride. <i>Sciences & Technologie. C, Biotechnologies</i> , 22, 94–99.
[89]	Choqiri, A. (2025). Effects of seeding rate on growth parameters and yield components of soft wheat in a no-till system in the Saïs area of Morocco. <i>Moroccan Journal of Agricultural Sciences</i> , 6(2), 85–91.
[90]	Zhang, H., Li, X., & Wang, Y. (2024). Optimized NPK fertilizer recommendations based on topsoil available nutrient criteria for wheat in drylands of China. <i>Journal of Integrative Agriculture</i> , 23(7), 2421–2433.
[91]	FAO. (2023). Fertilizer use by crop in the Near East. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
[92]	Fathi, A., & Mehdiya Afra, J. (2023). Plant growth and development in relation to phosphorus: A review. <i>Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca Agriculture</i> , 80(1).
[93]	Khouchi, S., Delaplace, P., & Bargaz, A. (2023). Polyphosphate fertilizer use efficiency strongly relies on soil physicochemical properties and root–microbial activities. <i>Geoderma</i> , 429, 116281.
[94]	FAO. (2022). Efficient fertilizer use in arid agriculture. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations.
[95]	Ma, Z., Zhang, Z., Wang, X., Yu, Z., & Shi, Y. (2024). Effect of Nitrogen Management Practices on Photosynthetic Characteristics and Grain Yield of Wheat in High-Fertility Soil. <i>Agronomy</i> , 14(10), Article 2197.
[96]	Li, S., Wang, X., Kou, C., Lv, J., & Gao, J. (2022). Crop yield, nitrogen recovery, and soil mineral nitrogen accumulation in extremely arid oasis cropland under long-term fertilization management. <i>Atmosphere</i> , 13(5), 754.
[97]	Zwart, S. J., & Bastiaanssen, W. G. M. (2004). Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. <i>Agricultural Water Management</i> , 69(2), 115–133.

Références bibliographiques

[98]	Tari, A. F. (2016). The effects of different deficit irrigation strategies on yield, quality, and water-use efficiencies of wheat under semi-arid conditions. <i>Agricultural Water Management</i> , 167, 1-10.
[99]	Imran et Amanullah (2022). Assessment of chemical and manual weed control approaches for effective weed suppression and maize productivity enhancement under maize–wheat cropping system. <i>Gesunde Pflanzen</i> , 74(3), 167–176.
[100]	Philippe E. Hulme 2023 La résistance des mauvaises herbes aux différents modes d'action des herbicides est due à l'intensification agricole 292, 108819.
[101]	Oweis, T., Hachum, A., & Pala, M. (2020). Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in West Asia and North Africa. <i>Agricultural Water Management</i> , 228, 105872.
[102]	Hou, Y., Miao, Y., Khan, Z. R., & Li, B. (2024). Establishing a knowledge structure for yield prediction in cereal crops using unmanned aerial vehicles. <i>Frontiers in Plant Science</i> , 15, Article 1401246.
[103]	Benbelkacem, A., & Kellou, D. (2000). <i>Physiologie et techniques culturales des céréales</i> . INA Éditions.
[104]	Hossain A. Al Masum A. Saadi S. Benkraiem R. Nirmal D.(2022)7. Firm-Level Climate Change Risk and CEO Equity Incentives.
[105]	Sakuma, S., Golan, G., Guo, Z., & Peleg, Z. (2019). Unleashing floret fertility in wheat through the mutation of a homeobox gene. <i>Proceedings of the National Academy of Sciences</i> , 116(39), 19773–19778.
[106]	Liu, X., Chen, F., Wang, J., & Zhang, Y. (2022). Internode elongation, spike insertion height and yield responses to nitrogen application in wheat varieties. <i>Field Crops Research</i> , 283, 108634.
[107]	INRAE. (2021). <i>Guide d'analyse des sols : Méthodes de prélèvement et d'interprétation des résultats</i> . Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement.
[108]	FAO. (2022). <i>Soil fertility management in dryland cereal systems</i> . Rome.
[109]	Noreen, A., Wang, X., & Ahmad, M. (2025). Rehabilitation of soil salinity and sodicity using diverse amendments and plants: A critical review. <i>Discover Environment</i> , 3, Article 53.
[110]	Bouhleb, M., Khaskhoussy, K. & Hachicha, M. (2024). Improvement of salt leaching efficiency and water content of soil through irrigation with electro-magnetized saline water. <i>Water</i> , 16(20), 3010.
[111]	Omar, M. d. M., Shitindi, M. J., Massawe, B. H. J., Pedersen, O., Meliyo, J. L., & Fue, K. G. (2024). Modeling the electrical conductivity relationship between saturated paste extract and 1 : 2.5 dilution in different soil textural classes. <i>Frontiers in Soil Science</i> , 4, Article 1421661.
[112]	Munns, R., & Gilliam, M. (2015). Salinity tolerance of crops—what is the cost? <i>New Phytologist</i> , 208(3), 668–673.
[113]	Moreno-Lora, A., & Delgado, A. (2023). Zinc and phosphorus availability to wheat as affected by humic substances in calcareous and siliceous growth media. <i>Spanish Journal of Agricultural Research</i> , 21(3), e1102.
[114]	Rengasamy, P. (2016). Soil salinity and sodicity. In D. Sparks (Ed.), <i>Advances in Agronomy</i> (Vol. 135, pp. 125–171).
[115]	Gupta, B., & Huang, B. (2014). Mechanism of salinity tolerance in plants: Physiological, biochemical, and molecular characterization. <i>International Journal of Genomics</i> , 2014, 701596.
[116]	Zhang, J., Mu, J., Hu, Y., Ren, A., Lei, B., Ding, P., Li, L., Sun, M., & Gao, Z. (2023). Effect of planting patterns and seeding rate on dryland wheat yield formation and water use efficiency on the Loess Plateau, China. <i>Agronomy</i> , 13(3), 851.
[117]	Bastos, L. M., Carciochi, W., Lollato, R. P., Jaenisch, B. R., I. A. Ciampitti (2020). Winter wheat yield response to plant density as a function of yield environment and tillering potential: A review and field studies. <i>Frontiers in Plant Science</i> , 11, 54.
[118]	Zhang, X., Liu, M., Zheng, F., Dong, Y., Hua, Y., Chu, J., He, M., & Dai, X. (2023). Optimizing sowing patterns in winter wheat can reduce N ₂ O emissions and improve grain yield and nitrogen-use efficiency by enhancing N uptake. <i>Frontiers in Plant Science</i> , 14, 1176293.

Références bibliographiques

[119]	Ishag, H. M., & Taha, M. B. (1974). Production and survival of tillers of wheat and their contribution to yield. <i>The Journal of Agricultural Science</i> , 83(1), 117–124.
[120]	Saini, A., Manuja, S., Upadhyay, R. G. , Fayeziadeh, M. R. (2023). Assessing the effect of soil cultivation methods and genotypes on crop yield components in wheat cropping systems. <i>BMC Plant Biology</i> , 24, Article 50001.
[121]	Woźniak, A., & Rachoń, L. (2020). Effect of tillage systems on the yield and quality of winter wheat grain and soil properties. <i>Agriculture</i> , 10(9), 405.
[122]	Mmbando, G. S. (2025). Tiller number: an essential criterion for developing high-yield and stress-resilient cereal crops. <i>Archives of Agronomy and Soil Science</i> , 71(1), 21–xx.
[123]	Fischer, R. A. (2011). Wheat physiology: a review of recent developments. <i>Crop & Pasture Science</i> , 62(2), 95–114.
[124]	Reed, R. C., Bradford, K. J., & Khanday, I. (2022). Seed germination and vigor: Ensuring crop sustainability in a changing climate. <i>Heredity</i> , 128(6), 450–459.
[125]	Yang, L., Noor, H., Sun, M., Ren, A., Ding, P., & Gao, Z. (2022). Effects of planting density on yield, protein and starch content of wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.). <i>Journal of Food and Nutrition Research</i> , 10(11), 801–809.
[126]	Yu, X., Li, X., Zhong, W., Wang, X., & Zhang, H. (2023). Identification and validation of two major QTLs for spikelet number per spike in wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.). <i>Frontiers in Plant Science</i> , 14, 114448.
[127]	Prieto, P., Ochagavía, H., Griffiths, S., & Slafer, G. A. (2020). Earliness per se × temperature interaction: consequences on leaf, spikelet, and floret development in wheat. <i>Journal of Experimental Botany</i> , 71(6), 1956–1968.
[128]	L. Vicentin, D. F. Calderini (2024). The trade-off between grain weight and grain number in wheat is explained by the overlapping of the key phases determining these major yield components. <i>Frontiers in Plant Science</i> , 15, 138042.
[129]	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 (<i>Triticum durum</i> Desf) under Algerian Semiarid Conditions. <i>Agriculture</i> , 12(11), 1937.
[130]	Slafer, G. A., Savin, R., & Sadras, V. O. (2014). Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment. <i>Field Crops Research</i> , 157, 71–83.
[131]	González, F. G., Slafer, G. A., & Miralles, D. J. (2011). Fertile floret survival and grain yield in wheat as affected by timing and intensity of nitrogen availability. <i>European Journal of Agronomy</i> , 35(3), 165–174.
[132]	Elía, M., Slafer, G. A., & Savin, R. (2020). Yield and grain number responses to pre-anthesis conditions in wheat. <i>Field Crops Research</i> , 246, 107693.
[133]	N. Akhtar, I. Noshin, M. Arshad, T. A. Meraj, D. I. Hefft, B. L. Jan, A. Parvaiz (2013). Grain weight response to stress before and after anthesis in wheat and barley. <i>Field Crops Research</i> , 81(1), 29–40.
[134]	Ullah, N., Collins, B., Christopher, J. T., Frederiks, T. M., & Chenu, K. (2024). Pre- and post-flowering impacts of natural heatwaves on yield components in wheat. <i>Field Crops Research</i> , 316, 109489.
[135]	Talukder, R., Ullah, M. M., Rahman, M. M., & Ahmad, S. (2023). Yield components and yield quality of old and modern wheat cultivars as affected by cultivar release date, N fertilization and environment in Germany. <i>Field Crops Research</i> , 302, 109094.
[136]	Bouazzama, B., Boutfirass, M., Bahri, A., & Lehamraoui, H. (2024). Effect of supplemental irrigation on yield and water productivity of durum wheat cultivated under drip irrigation in Tadla, Morocco. <i>Moroccan Journal of Agricultural Sciences</i> , 2024 Mar 14.
[137]	Liu, H., Wang, M., Zhao, X., Zhang, Q., & Li, J. (2024). Genomic insights into the modifications of spike morphology traits during wheat breeding. <i>Plant, Cell & Environment</i> , 47(5), 1289–1303.

Références bibliographiques

[138]	Maydup, M. L., Antonietta, M., Graciano, C., Guiamet, J. J., & Tambussi, E. A. (2014). The contribution of the awns of bread wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) to grain filling: Responses to water deficit and the effects of awns on ear temperature and hydraulic conductance. <i>Field Crops Research</i> , 167, 102–111.
[139]	A. P.Aboughadareh, R. Mohammadi, A. Etminan, L. Shooshta ,N.M.Tabrizi , P. Poczai (2020). Effects of drought stress on some agronomic and morpho-physiological traits in durum wheat genotypes. <i>Sustainability</i> , 12(14), 5610.
[140]	Bendjama, A., & Ramdani, S. (2022). Genetic variability of some agronomic traits in a collection of wheat (<i>Triticum turgidum</i> L. sp.pl.) genotypes under South Mediterranean growth conditions. <i>Italian Journal of Agronomy</i> , 17(1), 31–43.
[141]	Slafer, G. A., & Savin, R. (2020). Developmental basis of yield in wheat and barley. In Sadras, V. O., & Calderini, D. F. (Eds.), <i>Crop Physiology</i> (2nd ed., pp. 283–322). Academic Press.
[142]	Javed, H. M., Naem, A., Shaukat, S., Makhdoom, M., Ghafour, I., Shahzadi, N., Hussain, F., Tipu, A. L. K., & Imran, M. (2024). Exploring the relationship between plant height and yield-contributing attributes of wheat in drought conditions. <i>Biological & Clinical Sciences Research Journal</i> , 2024, Article 854.
[143]	Piñera-Chávez, F. J., Berry, P. M., Foulkes, M. J., Molero, G., & Reynolds, M. P. (2016). Avoiding lodging in irrigated spring wheat. I. Stem and root structural requirements. <i>Field Crops Research</i> , 196, 325–336.
[144]	Mosley, L. M et all 2024). Mosley, L. M., Bargrizan, S., & Smernik, R. J. (2024). Soil pH: Techniques, challenges and insights from a global dataset. <i>European Journal of Soil Science</i> . Advance online publication.
[145]	Kargos, G., Chatzigiakoumis, I., Kollias, A., Spiliotis, D., Massas, I., & Kerkides, P. (2018). Soil salinity assessment using saturated paste and mass soil:water 1:1 and 1:5 ratios extracts. <i>Water</i> , 10(11), Article 1589.
[146]	FAO. (2021). Standard operating procedure for soil electrical conductivity (soil:water 1:5). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Table de matières

Table des matières

Table Des Matières

Page de garde	1	
Dédicaces	2	
Remerciements	3	
Résumé en arabe	4	
Résumé en français	5	
Résumé en anglais	6	
Sommaire	8	
Liste des abréviations	10	
Liste des illustrations graphiques	14	
Les mots clés	17	
Introduction générale	19	
Chapitre 1	Généralité sur le blé	21
	Introduction	22
	1. Origine et histoire du blé	22
	2. Morphologie de blé dur	23
	2.1. Appareil racinaire	23
	2.1.1. Tige et feuille	23
	2.1.2. Epi	23
	2.1.3. Grain	24
	3. Classification et systématique	25
	4. Stades phénologiques du blé dur	26
	4.1. Période végétative	26
	4.1.1. Stade levée	26
	4.1.2. Stade de tallage	26
	4.2. Période reproductrice	26
	4.2.1. Montaison (gonflement)	27
	4.2.2. Epiaison - Floraison	27
	4.2.3. Remplissage du grain	27
	4.2.4. Maturation du grain	27
	5. Exigences du blé	28
	5.1. Exigences pédoclimatiques	28

Table des matières

	5.1.1. Température	29
	5.1.2. Lumière	29
	5.1.3. Sol	29
	5.1.4. Eau	29
	5.2. Exigences culturales	29
	5.2.1. Préparation du sol	29
	5.2.2. Semis	30
	5.2.3. Fertilisation	30
	5.2.3.1. Azote	30
	5.2.3.2. Phosphore	30
	5.2.3.3. Potassium	30
	6. Importance du blé	30
	6.1. Importance alimentaire	31
	6.2. Importance économique	31
	6.2.1. Dans le monde	31
	6.2.2. En Algérie	31
	7. Composantes de rendements	32
	7.1. Nombre d'épi/m ²	32
	7.2. Nombre de grains/épi	32
	7.3. Poids de milles grains (PMG)	32
	8. Principales factures agissant sur le rendement	32
	8.1. Maladie et ravageurs	33
	8.1.1. Parasites et insectes	33
	8.1.2. Champignons	33
	8.1.3. Bactéries	33
	8.1.4. Virus	33
	8.1.5. Mauvaises herbes	33
	8.2. Accidentes physiologiques	33
	8.2.1. Verse	34
	8.2.2. Echaudage	34
	8.2.3. Excès du froid	34
	8.2.4. Excès d'humidité	34
	Conclusion	34

Table des matières

Chapitre 2	Matériels et méthode	35
	Introduction	36
Partie 1 : Présentation de la région d'étude		
	1. Présentation de la région d'étude	36
	1.1. Limite géographique de la région d'étude	36
	1.2. Carte géographique	36
	2. Cadre climatique de la région d'étude	37
	2.1. Le climat	37
	2.2. La pluviométrie	37
	2.3. La température	37
	2.4. Les vents	38
	2.5. L'évaporation	39
	2.6. L'humidité relative de l'air	39
	2.7. Isolation	40
	3. Cadre hydrogéologique de la zone d'étude	40
	3.1. La nappe phréatique	41
	3.2. La nappe de complexe terminal	41
	3.3. La nappe du continental intercalaire	42
	4. Caractéristiques des sols de la zone de Reg	43
	4.1. Description morphologique du solum de P2-RG	43
	4.1.1. Description d'environnement	43
	4.1.2. Description du solum	44
	4.2. Etude analytique	45
	4.2.1. Interprétation	46
	4.2.2. Classification	46
	4.3. Sols de la zone d'étude	46
Partie 2 : Matériels et méthode		
	1. Situation géographique de la station d'étude	47
	2. Matériel végétal	48
	3. Condition de déroulement de l'essai	49
	3.1. Précédent cultural	49
	3.2. Pré irrigation	49
	3.3. Travail de sol	50

Table des matières

	3.4. Semis	50
	3.5. Fertilisation	51
	3.5.1. La fertilisation phosphatée	51
	3.5.2. La Fertilisation Azotée	52
	3.6. Irrigation	53
	3.7. Désherbage	54
	3.8. La récolte	54
	4. Paramètres étudié	55
	4.1. Paramètres de rendement	55
	1. Nombre de plants par m ²	55
	2. Nombre de talles au m ²	55
	3. Coefficient de tallage	55
	4. Nombre d'épi au m ²	55
	5. Nombre d'épillets par épi	55
	6. Nombre de grains par épi	55
	7. Nombre de grains par m ²	55
	8. Poids de mille grains (PMG)	56
	9. Rendement en grains calculé (kg/ha)	56
	4.2. Paramètres de croissance	57
	1. Longueur de l'épi avec barbes	57
	2. Longueur de l'épi sans barbes	57
	3. Hauteur de la tige	58
	5. Caractéristiques physico-chimiques du sol	58
	1. Détermination du pH	58
	2. Détermination de la CE	58
	3. Détermination du calcaire totale	58
	Conclusion	59
Chapitre 3	Résultats et discussion	60
	Introduction	61
	1. Présentation des résultats de sol de région d'étude	61
	1.1. Evolution du pH du sol en fonction des pivots	61
	1.2. Evolution de la conductivité électrique	62
	1.3. Taux du calcaire total	63

Table des matières

	2. Analyse du comportement de la culture dans les deux pivots	64
	2.1. Caractères agronomiques	64
	2.1.1. Nombre de plants au m ²	64
	2.1.2. Nombre de talles au m ²	65
	2.1.3. Le coefficient de tallage	66
	2.1.4. Nombre d'épis au m ²	67
	2.1.5. Nombre d'épillets par épis	69
	2.1.6. Nombre de grains au m ²	70
	2.1.7. Nombre grains par épis	70
	2.1.8. Poids de miles grains (PMG)	71
	2.1.9. Rendement grain calculée	72
	2.2. Caractères de croissances	73
	2.2.1. Longueur d'épis avec barbes	73
	2.2.2. Longueur d'épis sans barbe	74
	2.2.3. La hauteur de la tige	75
	Conclusion	76
Conclusion générale		78
Annexes		79
Références bibliographiques		85
Table des matières		94