



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences Agronomiques

**Thèse pour l'obtention du diplôme de
de doctorat troisième cycle**

En: Sciences Agronomiques
Option : Production végétale

Réf. : Entrez la référence du document

Préparé par:
BERBACHE Mohamed Rami

**Evaluation du modèle APSIM- wheat et application sur
l'expression phénotypique des variétés de blé dur, en région
semi-aride (Sétif).**

Jury:

Mr. MEHAOUA Mohamed Seghir	Professeur	University de BISKRA	Président
M.HADJEB Ayoub	Professeur	Université de BISKRA	Rapporteur
Mme. BEDJAOUI Hanane	MCA	Université de BISKRA	Co-Rapporteur
Mr. NOURANI Ahmed	MRA	CRSTRA BISKRA	Examineur
Mr. GUIMEUR Kamel	MCA	University de BISKRA	Examineur
Mme. BOULELOUH Nadia	MCA	Université de BATNA	invitée

Table des matières

DEDICACE	5
REMERCIEMENTS	6
Liste des tableaux	7
Liste des figures	8
Liste des abréviations	9
Chapitre 1 : INTRODUCTION GENERALE ET BIBLIOGRAPHIE	11
1 Introduction :	1
2 Impact des différents niveaux d'application de l'eau sur les cultures de blé	3
3 Efficience d'utilisation de l'eau	4
4 Impact des niveaux d'application d'azote sur les cultures de blé	6
5 Efficience d'utilisation d'azote	7
6 Simulation de la production des cultures avec le modèle des cultures APSIM	9
7 Présentation de la région d'étude :	12
7.1 Situation géographique :	12
7.1.1 Présentation de cadre physique :	12
7.1.2 Les reliefs :	12
7.1.3 Géologie, sol, topographie :	13
7.2 Étude climatique de la région d'étude :	13
7.2.1 Les vents:	13
7.2.2 Les gelées:	14
7.2.3 Classification du climat selon diagramme de Mr EMBERGER :	14
7.3 Diagnostic de secteur agricole dans la wilaya de Sétif :	14
CHAPITRE 2 : Évaluation de l'efficience de l'utilisation de l'eau pour différentes variétés de blé dur cultivées dans la région de Sétif	16
1 Introduction	17
2 Matériels et méthodes	18
2.1 Lieu d'étude et procédures expérimentales	18
2.2 Évaluation des paramètres étudiés	21
2.2.1 Rendement et leurs composantes	21
2.2.2 Développement phénologique	22
2.2.3 Teneur en eau du sol	23
2.2.4 Efficience d'utilisation de l'eau	23
2.2.5 Indice de tolérance au stress	24
2.3 Analyse statistique	24

3	Résultats	24
3.1	Analyse de la variance du développement phénologique sur la fonction du DAS et du GDD	24
3.2	Cumul de degré jours (GDD C°) des différentes variétés	28
3.3	Elaboration des modèles empiriques pour la détermination des stades phénologique	29
3.4	Analyse de la variance des rendements et de leur composante, WUE, WUEi et STI30	
3.5	Rendement et ses composants, WUE, STI et WUEI de différentes variétés	31
3.6	Elaboration des modèles empiriques pour la détermination du rendement, leurs composants, WUE, WUEi et STI	33
3.7	L'étude du coefficient de piste causale "path coefficient" sur le rendement	34
4	Discussion	35
5	Conclusion	38
1	Introduction	41
2	Matériels et méthodes	42
2.1	Objectif de travail	42
2.2	Protocole expérimental :	43
2.2.1	Matériel végétale :	43
2.2.2	Les équipements scientifiques et les différents matériels utilisés dans les différentes analyses	43
2.2.3	Dispositif mis en place	43
2.2.4	Récolte	44
2.2.5	Paramètres agro-physiologiques mesurés pour les grains et la paille	45
2.3	Analyse statistique	46
3	Résultats	46
3.1	Indicateurs :	46
3.1.1	Taux de protéine :	46
3.2	Description des modèles de prédiction de l'efficacité de l'utilisation d'azote, ses indicateurs, le taux en protéines et l'indice de récolte	48
3.2.1	Pour la variété Mohamed ben Bachir (MBB)	48
3.2.2	Pour la variété Bousselem	49
3.2.3	Pour la variété Oued ElBared	50
3.2.4	Pour la variété Simito	51
3.2.5	Pour la variété Vitron	52
3.3	Les corrélations entre l'efficacité de l'utilisation d'azote, ses indicateurs, le rendement en grains, le taux en protéines et l'indice de récolte	53
3.3.1	Matrice générale :	53
3.3.2	Les matrices partielles	54
3.4	L'effet direct et indirect d'efficacité d'utilisation d'azote, ses indicateurs et le taux de	

protéines sur le rendement	59
4 Discussion	60
5 Conclusion :	62
Chapitre 4 : Utilisation d'APSIM Next Generation pour l'expression phénotypique des caractères quantitatifs du blé en Algérie.	63
1 Introduction	64
2 Matériel et méthodes	66
2.1 Lieu d'étude et procédures expérimentales	66
2.2 Données météorologiques et planification de l'irrigation.	66
3 Description du modèle APSIM Next Generation (APSIM NG)	68
3.1 Calibration et évaluation du modèle APSIM	68
4 Résultats	70
4.1 Résultats de l'analyse de calibrage	70
4.2 Évaluation du APSIM NG	72
5 Discussion	83
6 Conclusion	85
7 Conclusion générale :	89
Liste bibliographie :	92
Résumé :	111
Abstract	112
:ملخص	113

DEDICACE

À mes chers parents en guise de gratitude pour tous leurs sacrifices, soutien, confiance. Vous êtes les êtres les plus chères à mon cœur, aucun mot ne pourra exprimer ma gratitude et mon estime pour vous.

À mes très chers frères : Thiaa eddine, Ahmed Rached

À ma très chère sœur : Malek Dounia

À tous mes amis spécialement : Zaghouani Ameer, Bourezzane Kawther, Zhamkhoum Samira, Boutalbi Houda, Attafi Mouna

À mes camarades de la promotion de Doctorat

À toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Je dédie ce modeste travail

RACHED

REMERCIEMENTS

Avant tous je remercie ALLAH tous puissant.

*A l'issue de ce travail de recherche, je tiens tout particulièrement à remercier Monsieur **HADJEB AYOUB**, Maître de conférences au département Agronomique de Biskra, pour avoir accepté de m'encadrer et de diriger avec beaucoup d'attention et de soin cette thèse. Je lui suis très reconnaissant pour sa disponibilité, sa bienveillance et son soutien permanent, et avoir prêté un intérêt constant au sujet de la thèse.*

*J'exprime ma profonde gratitude à **Mme BEDJAOUI HANANE** Maître de Conférences à l'Université de Biskra, pour la confiance qu'il m'a accordé en acceptant la direction de mon mémoire, son dévouement, sa disponibilité et ses conseils judicieux pour moi. C'est un honneur pour moi d'avoir travaillé avec elle.*

*J'adresse aussi mes remerciements aux **membres du jurys**, d'avoir accepté d'examiner le document et faire partie du jury de soutenance.*

*Je remercie très vivement **Mme. BOULELOUAH. Nadia** Maître de Conférences à l'Université de Batna1, Je la remercie pour son aide, sa patience, ses conseils précieux qui ont conduit à l'achèvement ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de mes plus profonds respects et ma profonde gratitude.*

Je tiens aussi à remercier aux ingénieur et tous l'équipe de l'institut technique des grandes culture (ITGC) Sétif.

Un très grand merci, à tous ceux qui ont contribué de prêt ou de loin à la réalisation de mon mémoire.

Liste des tableaux

Table 1. Différentes expressions de l'efficience d'utilisation d'azote NUE et leur méthode de calcul.....	8
Table 2. Calendrier et la quantité d'irrigation d'appoint (mm)	21
Table 3. Effet variétales et environnementales sur la détermination des stades phénologique en fonction de degrés jours et jour journalière.....	27
Table 4. modèles de prédiction pour chaque stade phénologique et leur coefficient de détermination.....	29
Table 5. Analyse de la variance des essais et les variétés sur le rendement de blé et leurs composantes, WUE, WUEi et STI	30
Table 6. Modèles de prédiction du rendement, leur composants, WUE et STI	33
Table 7. L'effet direct et indirect avec le coefficient de corrélation (r) des paramètres sur le rendement	34
Table 8. Caractéristiques des variétés de blé dur étudiées	43
Table 9. les équipements scientifiques utilisé dans l'analyse de l'azote totale	43
Table 10. Quantité d'azote disponible dans le sol avant le semi	44
Table 11. Analyse d'ANOVA deux facteur sur le taux de protéine%	46
Table 12. Analyse d'ANOVA deux facteur sur l'efficience d'utilisation d'azote agronomique	47
Table 13. Analyse d'ANOVA deux facteur sur l'efficience d'utilisation d'azote agro-physiologique	47
Table 14. Analyse d'ANOVA deux facteur sur l'efficience d'absorption d'azote	48
Table 15. Analyse d'ANOVA deux facteur sur le coefficient apparent d'utilisation d'azote	48
Table 16. Modèles de prédiction des indicateurs de l'efficience d'utilisation d'azote, le taux de protéine et l'indice de récolte.....	49
Table 17. Modèles de prédiction des indicateurs de l'efficience d'utilisation d'azote, le taux de protéine et l'indice de récolte.....	50
Table 18. Modèles de prédiction des indicateurs de l'efficience d'utilisation d'azote, le taux de protéine et l'indice de récolte.....	51
Table 19. Modèles de prédiction des indicateurs de l'efficience d'utilisation d'azote, le taux de protéine et l'indice de récolte.....	52
Table 20. Modèles de prédiction des indicateurs de l'efficience d'utilisation d'azote, le taux de protéine et l'indice de récolte.....	53
Table 21. Caractérisation supplémentaire du sol.....	66
Table 22. Calendrier d'irrigation et la quantité apportée dans les deux Saisons	67
Table 23. Les paramètres génétiques des variétés dans APSIM NG	71
Table 24. erreur moyenne et l'erreur moyen relative entre les valeurs estimée-observée des variables de sorties pour chaque variété.....	82

Liste des figures

Figure 1. Cycle de l'eau dans un milieu agricole (Leenhardt & Voltz, 2020).....	4
Figure 2.cycle de l'azote dans un sol cultivé	6
Figure 3.structure de modèle de culture APSIM	11
Figure 4. Carte des zones de la wilaya de Sétif (DSA., 2016)	13
Figure 5:Diagramme bioclimatique d'EMBERGER	14
Figure 6.présentation de dispositif expérimental à installer sur le terrain.....	20
Figure 7. Quantité d'eau disponible dans le sol (QE) dans les 3 essai. S1 ; essai1, S2 ; essai2, S3 ; essai3.....	23
Figure 8. Cumul de degré jours (GDD) pour atteindre différents stades de développement ...	29
Figure 9.variation entre les essais et les variétés sur le rendement, leur composantes, WUE, WUEi et STI.....	33
Figure 10. Démonstration graphique de coefficient de piste causale des paramètres phénologique, environnementale et les composantes du rendement sur le rendement	35
Figure 11.Matrice de corrélation entre les paramètres étudié pour toutes les variétés	54
Figure 12.Matrice de corrélation entre les paramètres étudié pour la variété MBB	55
Figure 13.Matrice de corrélation entre les paramètres étudié pour la variété Bousselem	56
Figure 14.Matrice de corrélation entre les paramètres étudié pour la variété Oued ElBared .	57
Figure 15.Matrice de corrélation entre les paramètres étudié pour la variété Simito	58
Figure 16.Matrice de corrélation entre les paramètres étudié pour la variété Vitron	59
Figure 17.Analyse du coefficient de piste causale de la variable dépendent "rendement en grains" et des variables indépendants " taux de protéines, GHI, efficience d'utilisation d'azote et ses indicateurs"	60
Figure 18.Données de la précipitation, température minimale et maximale dans la région d'étude pour les deux Seasons agricole.....	67
Figure 19. Démonstration graphique du calibrage de APSIM-Wheat.	72
Figure 20. Simulation de la date de floraison dans les deux essais.....	73
Figure 21.estimation-observation du jours de la floraison pour les deux essais séparés.	73
Figure 22.prédictions-observations du jours de la maturité	74
Figure 23.estimation-observation du jours de la Maturité pour les deux essais séparés.....	74
Figure 24.prédictions-observations enregistrée pour le nombre des grains.m ²	75
Figure 25.prédictions-observations enregistrée pour le nombre des grains.m ² dans les deux essais séparément.	75
Figure 26.prédictions-observations enregistrée pour le poids du grain.....	77
Figure 27.prédictions-observations enregistrée pour le poids du grain dans les deux essais...	77
Figure 28.prédictions-observations enregistrée pour le rendement.....	78
Figure 29.prédictions-observations enregistrée pour le rendement dans les deux essais.....	78
Figure 30.prédictions-observations enregistrée pour la concentration de la protéine dans les grains	79
Figure 31..prédictions-observations enregistrée pour la concentration de la protéine dans les grains dans les deux essais	80

Liste des abréviations

DJ1	Temps thermique pour atteindre GS12.
DJ2	Temps thermique pour atteindre GS25.
DJ4	Temps thermique pour atteindre GS51.
DJ5	Temps thermique pour atteindre GS69.
DJM	Temps thermique pour atteindre GS90.
QE1	Teneur en eau disponible du sol de GS0 à GS12,
QE2	Teneur en eau disponible du sol de GS12 à GS25,
QE3	quantité d'eau disponible GS25-GS39
QE4	Teneur en eau disponible du sol de GS39 à GS51
QE5	Teneur en eau disponible du sol GS51 à GS69
QE6	Teneur en eau disponible du sol GS69 à GS90
DS4	Jours après semis pour atteindre l'épiaison.
DS5	Jours après le semi pour atteindre la floraison.
DM	Jours après le semi pour atteindre la maturité.
NE	Nombre des épis.m ⁻² .
NGE	Nombre des grains. épi ⁻¹ .
NGM	Nombre des grains.m ⁻² .
PMG	Poids de mille grains.
REND	Rendement.
REND.F	Rendement final.
NE.m⁻²	Nombre des épis.m ⁻² .
NG. E⁻¹	Nombre des grains. épi ⁻¹ .
NG.m⁻²	Nombre des grains.m ⁻² .
WUE	Efficienc e d'utilisation d'eau,
WUEI	Efficienc e d'utilisation d'eau d'irrigation,
STI	L'indice de la tolérance au stress.
r	Coefficient de corrélation.
DAS4	Nombre du jours entre GS39-GS51
Nup	N absorbé
NUE	Efficienc e d'utilisation d'azote agronomique
NUE_p	Efficienc e d'utilisation d'azote agro-physiologique
CAU	Coefficient apparent d'utilisation d'azote
GHI	Indice de récolte
DAS5	Nombre du jours entre GS51-GS69.

Chapitre 1 : INTRODUCTION GENERALE ET BIBLIOGRAPHIE

1 Introduction :

Pendant de nombreuses décennies, la faim et la sécurité alimentaire ont été parmi les questions politiques les plus importantes (Eickhout et al., 2006). Le blé (*Triticum durum*) est considéré comme un aliment crucial pour la subsistance au monde (Chawla & Balasaheb, 2023) avec une production impressionnante de 808 million tonne en 2022 et une moyenne de rendement qui atteint 30 Qx/ha (FAOSTAT, 2024a). Dans le contexte mondial actuel, l'Algérie, avec une production insuffisante d'environ 3 millions de tonnes en 2022 et un rendement de 16 qx/ha (FAOSTAT, 2024a), a vu sa disponibilité en blé diminuer, ce qui a favorisé l'importation.

Cependant, le secteur agricole est confronté à des défis persistants, notamment le plafonnement du potentiel de rendement, la diminution de la disponibilité de l'eau pour l'irrigation, les pressions liées au variation climatique et l'utilisation déséquilibrée des engrais au niveau des exploitations agricoles (El-Beltagy & Madkour, 2012; Tardieu, 2013; Boulelouah et al., 2022).

Dans le contexte actuel, l'agriculture fait face à des défis sans précédent, notamment en raison du variation climatique et de l'épuisement des ressources naturelles. En Algérie, le blé dur (*Triticum durum*) est la culture dominante, occupant 18,5 % des terres agricoles en 2019 (Direction des Statistiques Agricoles et des Systèmes d'Information, 2019). Le faible rendement de blé enregistré peut s'expliquer par plusieurs facteurs, notamment le fait que les zones de culture du blé sont généralement situées dans des régions semi-arides, caractérisées par un manque d'eau et des irrégularités des précipitations inter- et intra-annuelles, ce qui constitue un défi majeur pour la production céréalière, tout comme dans de nombreuses autres régions du monde confrontées à la pénurie d'eau (Dong et al., 2011; Araya et al., 2019).

Un défi crucial auquel les chercheurs sont confrontés est l'impératif d'augmenter la production alimentaire tout en utilisant moins d'eau. La menace imminente d'une pénurie d'eau, due à des facteurs tels que la surconsommation, représente un risque majeur pour la durabilité de la production agricole. (Li et al., 2004).

L'eau et les fertilisants sont des facteurs essentiels pour la production des cultures, et leur application en quantités adéquates pendant la saison de culture est nécessaire pour assurer une croissance optimale et un rendement satisfaisant (Shekhar et al., 2018; Bhausahab et al., 2021; Berbache et al., 2024). L'eau joue un rôle crucial dans l'absorption des nutriments (Aliasgharzad et al., 2006; Shekhar et al., 2017; Boulelouah et al., 2022) et influence la plupart des processus physiologiques végétaux tels que la photosynthèse, la transmission de matériaux photosynthétique à des graines, le développement cellulaire et la transmission des éléments nutritifs dans les plantes (Shashank Shekhar & Raghuwanshi, 2021). Le manque d'eau crée des

INTRODUCTION GENERALE ET BIBLIOGRAPHIE

conditions défavorables pour l'absorption des nutriments et les plantes subissent un stress (Shekhar et al., 2021; Boulelouah et al., 2022). Le stress hydrique affecte la capacité des cultures à absorber les nutriments du sol, en particulier l'azote. Dans les zones semi-aride de l'Algérie, l'urée se distingue comme l'engrais prédominant (Boulelouah et al., 2022).

L'azote, un nutriment crucial et très volatil dans le sol, est soumis à des dynamiques complexes (Shekhar et al., 2021), et peut rendre plus accessible aux plantes dans des sols bien humidifiés, une condition généralement maintenue par des pratiques d'irrigation efficaces. Néanmoins, les défis associés à la gestion de l'azote sont multiples. L'irrigation excessive et les fortes précipitations ont le potentiel de transporter les nitrates au-delà de la zone de racine, ce qui augmente les pertes par lixiviation et représente un risque de pollution des eaux souterraines (Boulelouah et al., 2022). De plus, une irrigation inadéquate peut entraîner la production d'ammoniac, susceptible de s'évaporer dans l'air ambiant. Trouver le bon équilibre dans les pratiques d'irrigation est essentiel, non seulement pour atténuer ces risques, mais aussi pour optimiser les conditions végétales favorables à une meilleure photosynthèse et à une absorption efficace de l'eau et des nutriments. La réalisation de cet équilibre délicat est cruciale pour favoriser la croissance des plantes et garantir l'utilisation judicieuse des engrais dans la poursuite de pratiques agricoles durables.

En revanche, pour atteindre cet objectif, une approche consiste à mener des expériences de terrain à long terme et à grande échelle (Qi et al., 2017), ce qui est difficile à réaliser sur le plan économique (Viscarra Rossel & Mcbratney, 1998). Alternativement, l'utilisation d'outils plus avancés, tels que les modèles de croissance des plantes, peut réduire l'utilisation des ressources et du temps tout en fournissant des informations précieuses similaires (Wallach et al., 2006). Le modèle de croissance tient compte du système sol-plante-climat ainsi que des itinéraires techniques qui sont étroitement liés à la croissance des cultures. Il utilise des formules mathématiques pour décrire les processus physiologiques, écologiques, physiques et chimiques, permettant ainsi une simulation précise du développement de la plante (ZHANG et al., 2023). Actuellement, les modèles de croissance sont devenus l'un des outils puissants de la production végétale pour étudier les interactions complexes dans le système sol-plante-climat (E. Wang et al., 2019; Z. Zhao et al., 2015, 2019), et les scientifiques développent plus d'une centaine de modèles, parmi lesquels le plus mature est le « Agricultural Production Systems sIMulator (APSIM) » (D. P. Holzworth et al., 2015).

L'objectif de notre étude est de déterminer l'efficacité de l'utilisation de l'eau et de l'azote en relation avec les différentes variétés cultivées dans les zones semi-arides, ainsi que la variation environnementale affectée par l'effet du variation climatique et la disponibilité des ressources

nutritionnelles pour la plante au cours de son développement, dans le but d'augmenter le rendement du blé dur. Au cours de cette étude, nous réaliserons un calibrage et une application du modèle de croissance APSIM afin d'évaluer sa performance dans la prédiction des stades phénologiques et des différents paramètres quantitatifs des variétés.

Cette étude est divisée en quatre parties ; une bibliographique et 3 parties :

Partie bibliographique.

Chapitre 2 : Évaluation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour différentes variétés de blé dur cultivées dans la région de Sétif.

Chapitre 3 : Analyse de l'effet génétique et environnemental sur l'efficacité d'utilisation de l'azote en relation avec le rendement et le taux de protéines chez différentes variétés de blé dur.

Chapitre 4 : Utilisation d'APSIM Next Generation pour l'expression phénotypique des caractères quantitatifs du blé en Algérie.

2 Impact des différents niveaux d'application de l'eau sur les cultures de blé

Le stress hydrique constitue un obstacle majeur à la production agricole dans le monde entier, et ses effets deviennent de plus en plus graves en raison de la variation climatique. Comprendre le moment et la durée des périodes de stress hydrique ainsi que leur impact sur les différentes phases de croissance est essentiel pour élaborer des stratégies efficaces de gestion de l'eau.

Des études ont examiné la relation entre les niveaux d'irrigation et la production agricole, démontrant le potentiel d'amélioration des rendements et de l'efficacité de l'utilisation de l'eau grâce à des pratiques optimisées de gestion de l'eau (Moteva & Kostadinov, 2019; Yang et al., 2022; Zeynoddin et al., 2023). En élargissant le débat sur les effets du stress hydrique, des études récentes se sont penchées sur son impact sur le blé d'hiver. Les résultats suggèrent que les conditions de stress modéré à sévère peuvent considérablement réduire les paramètres photosynthétiques, entraînant une diminution de la hauteur, de la biomasse et de la taille des grains. En particulier, des conditions de stress modéré peuvent être considérées comme optimales pour la croissance hivernale du blé, favorisant une production durable et une utilisation efficace des ressources en eau naturelles. Dans l'ensemble, la recherche sur les effets du stress hydrique sur la croissance et le rendement des cultures souligne l'importance cruciale de la disponibilité en eau pendant toutes les phases de croissance (Kang et al., 2002; W. Zhao et al., 2020; El-Hashash et al., 2022; Zamani et al., 2024). Les périodes de déficit pendant le remplissage des grains ont diminué le rendement de 17 % et de 33 %, respectivement. La diminution du poids des feuilles et des talles ainsi que du nombre de grains a également entraîné une réduction du potentiel de rendement (Eck, 1988), en plus, W. Zhao et al., (2020) ont constaté que les variations saisonnières des paramètres photosynthétiques ont diminué de manière

significative sous un stress modéré à sévère, entraînant une faible efficacité d'utilisation de l'eau (WUE).

Ces études fournissent des informations précieuses sur l'interaction complexe entre la disponibilité en eau, les étapes de croissance des cultures et les résultats en termes de rendements, mettant l'accent sur la nécessité de stratégies de gestion de l'eau sur mesure pour optimiser la productivité agricole.

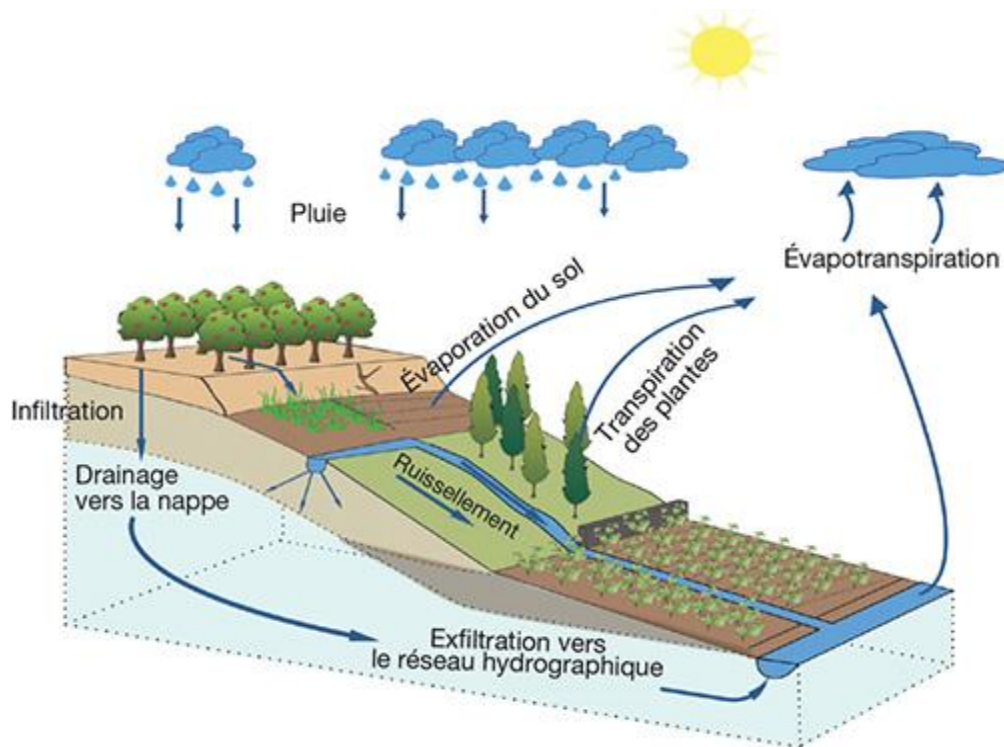


Figure 1. Cycle de l'eau dans un milieu agricole (Leenhardt & Voltz, 2020)

3 Efficience d'utilisation de l'eau

L'efficacité de l'utilisation de l'eau est exprimée soit comme le rapport entre la biomasse totale produite et l'évapotranspiration, soit comme le rapport entre le rendement des cultures et l'eau reçue par irrigation et par précipitations (Qiu et al., 2008; Tadayon et al., 2012). Le WUE, ou l'Efficienc e d'Utilisation de l'Eau (en anglais water use efficiency), est défini comme la capacité d'une plante à absorber des concentrations de carbone et à prévenir la perte d'eau excessive en contrôlant la fermeture des stomates. Il revêt une importance particulière car il mesure l'efficacité avec laquelle une plante utilise l'eau pour produire de la biomasse ou des grains.

L'efficienc e d'utilisation de l'eau est un concept crucial dans la culture du blé, qui est l'une des céréales les plus largement cultivées dans le monde. En effet, sa culture s'étend sur environ 219 millions d'hectares avec une production atteignant 808 millions de tonnes en 2022 (FAOSTAT, 2024a), avec un rôle important dans la sécurité alimentaire et nutritionnelle de l'Algérie.

INTRODUCTION GENERALE ET BIBLIOGRAPHIE

L'efficacité de l'utilisation de l'eau et de l'azote reste souvent faibles (Fageria & Baligar, 2005; Ladha et al., 2005; Dong et al., 2011). Par conséquent, une gestion optimale de l'eau et des nutriments joue un rôle très important dans l'amélioration de l'WUE, de l'Efficiences d'Utilisation de l'Azote (NUE en anglais nitrogen use efficiency), ainsi que dans la croissance et le rendement des cultures (Qiu et al., 2008; Belete et al., 2018; Boulelouah et al., 2022; Berbache et al., 2024). WUE et NUE sont des indicateurs essentiels pour évaluer l'efficacité des systèmes d'irrigation. Par conséquent, une gestion adéquate de l'irrigation et des nutriments peut augmenter les rendements jusqu'à 70 % (Dong et al., 2011; Ercoli et al., 2013; Araya et al., 2019). Ainsi, des recherches sur la WUE sont nécessaires pour garantir la sécurité alimentaire future et atténuer les effets du changement climatique sur la production agricole.

Nombreux facteurs peuvent affecter la WUE dans la culture du blé, y compris le climat, le sol et les pratiques culturales. Par exemple, les températures élevées et les faibles précipitations peuvent augmenter l'évapotranspiration et réduire la WUE. Les sols sableux ont une capacité de rétention d'eau plus faible que les sols argileux, ce qui peut également entraîner une réduction de la WUE. De plus, un léger déficit en eau peut augmenter la WUE dans les zones où le manque d'eau est reconnu (W. Zhao et al., 2020).

Le WUE est un concept crucial dans la production de blé, et il existe plusieurs pratiques pouvant être utilisées pour l'améliorer. Diverses études ont été menées sur l'importance de distinguer les pertes non bénéfiques des pertes bénéfiques lors des opérations d'irrigation. Elles ont suggéré que l'évaporation pouvait être réduite et la transpiration augmentée grâce à la modification de la fréquence d'irrigation, du système d'irrigation et d'autres pratiques (Burt et al., 1997). Cependant, dans les champs, il est extrêmement difficile de partitionner l'évapotranspiration en évaporation et en transpiration (Howell, 2001; Zwart & Bastiaanssen, 2004). En outre, une étude réalisée par Fletcher et al., (2018) sur 11 géotypes de blé visait à déterminer la transpiration. Ils ont constaté que la transpiration ne permettait pas de différencier entre les géotypes en raison de mauvaises estimations lorsque l'apport d'eau était minime. C'est pourquoi il a été suggéré que la transpiration puisse être estimée à partir de données relatives aux précipitations, à l'irrigation et à la teneur en eau du sol. Kang et al., (2002) ont mesuré divers paramètres tels que la teneur en eau du sol, l'accumulation de la masse sèche, l'indice de la photosynthèse, le rendement et la consommation totale d'eau afin de calculer l'efficacité de l'utilisation de l'eau et l'indice de récolte. Ils ont suggéré qu'un faible stress avant la floraison, suivi d'une humidité élevée par la suite, étaient les conditions optimales pour un régime d'irrigation limité.

Plusieurs études sur l'efficacité d'utilisation de l'eau suggèrent que la WUE peut être améliorée de quatre façons : en augmentant la production par unité d'évapotranspiration (ET), en réduisant

les pertes d'eau productives par lessivage, en choisissant des variétés adaptées et en gérant l'eau de manière quantitative et fréquente. (Howell, 2001; Zwart & Bastiaanssen, 2004; Feldman et al., 2018).

4 Impact des niveaux d'application d'azote sur les cultures de blé

L'azote (N) est un macronutriment essentiel pour la croissance et le développement du blé d'hiver. La fertilisation azotée est cruciale pour obtenir des rendements élevés, mais il est important d'optimiser les apports d'azote et les délais d'application afin de maximiser le rendement des cultures et l'efficacité de l'utilisation de l'eau (WUE), tout en minimisant les impacts sur l'environnement. La quantité optimale de N pour le blé dépend d'un certain nombre de facteurs, y compris la culture, le type de sol, le climat et les pratiques d'irrigation (Ercoli et al., 2013; Sawsen Ayadi, 2016; Belete et al., 2018).

Boulelouah et al., (2022) ont constaté que le taux optimal d'azote pour la production de blé dur cultivé dans les zones semi-arides était de 120 unités d'azote par hectare (UN/ha). Toutefois, des taux d'application d'azote supérieurs au niveau optimal peuvent avoir un impact négatif sur le rendement, avec des effets négatifs sur l'aspect environnemental et économique. Un apport insuffisant en azote entraîne généralement une diminution de la croissance des racines, une réduction du taux de photosynthèse et une sénescence précoce des feuilles (Vagusevičienė et al., 2012).

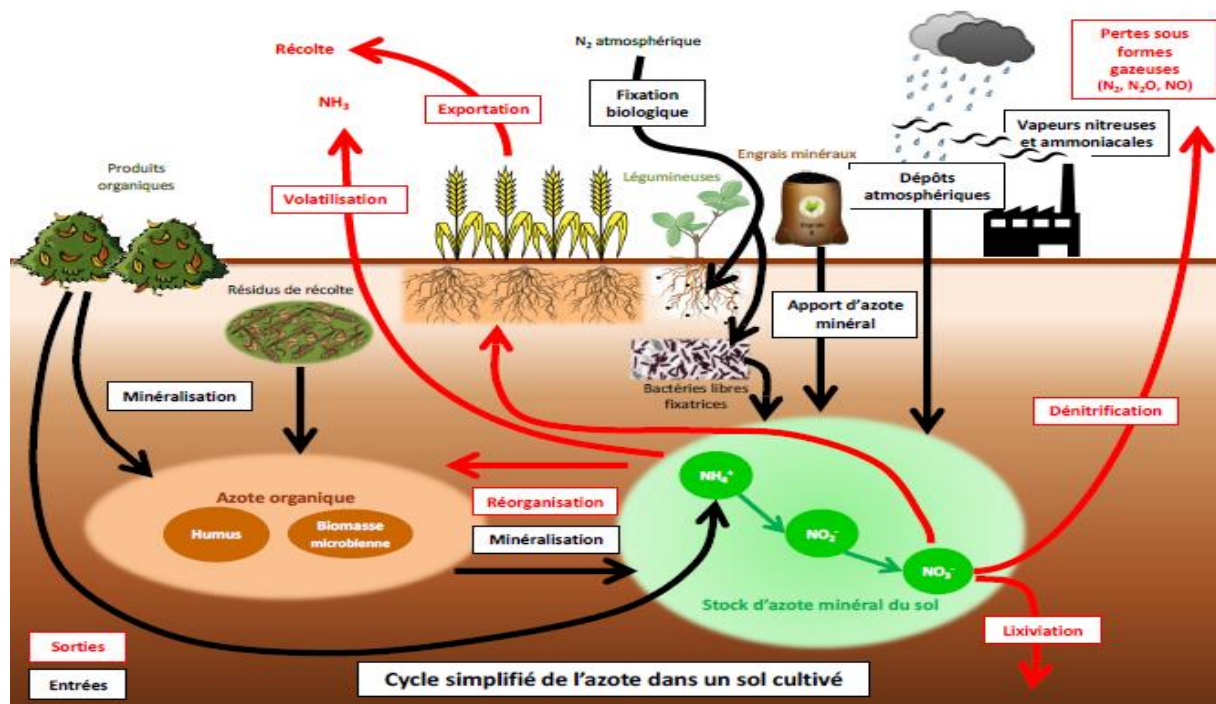


Figure 2. cycle de l'azote dans un sol cultivé

5 Efficience d'utilisation d'azote

L'une des principales raisons de la limitation du rendement et de la qualité des céréales est le manque de connaissances en matière de fertilisation azotée (N). Raun & Johnson, (1999) ont signalé qu'en général, 33 % de l'engrais azoté appliqué (par exemple, l'urée) est retenu ou présent dans le sol, tandis que le reste est perdu par la lixiviation et la volatilisation, ce qui est directement lié au degré d'efficacité d'utilisation des engrais. Toutefois, il a été estimé que souvent, 50 % ou moins de l'engrais azoté appliqué aux sols est récupéré par les céréales, et que ce pourcentage diminue à mesure que l'apport en azote augmente (Fageria, 2014).

Dans une autre étude (Raun et al., 1999), les auteurs ont démontré que le NUE peut atteindre 87% pour le blé si l'application de l'azote (N) prend en compte les caractéristiques du sol et les conditions climatiques. En effet, le NUE est étroitement lié aux quantités et à la répartition des précipitations. De plus, la synchronisation des entrées d'azote et le moment optimal de son application jouent un rôle clé dans l'augmentation de la NUE et la réduction des pertes en azote (Souissi & Bahri, 2018). En outre, l'effet du génotype joue un rôle crucial dans la variation de NUE (Gouis et al., 2000). La diversité génétique du NUE observée entre les variétés de blé dur (Giambalvo et al., 2010) a été attribuée à un taux élevé d'absorption d'azote et/ou à une utilisation accrue de l'azote (Dawson et al., 2008). Par conséquent, la sélection de génotypes présentant une NUE élevée pourrait entraîner une réduction de l'application d'azote et, par conséquent, une diminution des risques environnementaux (Giambalvo et al., 2010). L'amélioration de l'efficacité d'absorption et d'utilisation de l'azote (N) peut permettre aux agriculteurs de maximiser le rendement avec une fertilisation modérée en azote, plutôt qu'une fertilisation élevée (Anbessa & Juskiw, 2012).

Il existe plusieurs définitions et méthodes d'évaluation de l'efficience de l'utilisation de l'azote; Moll et al., (1981) ont défini l'efficience d'utilisation de l'azote comme le rendement supplémentaire des grains pour chaque augmentation d'azote appliquée. Lorsque les rendements des parcelles témoins non fertilisées sont disponibles, le caractère d'efficience d'utilisation de l'azote peut être calculé comme la différence entre les valeurs de rendement des parcelles fertilisées et des parcelles témoins (Singh et al., 1998).

La mesure de l'efficience d'utilisation de l'azote (NUE) est une tâche complexe avec de nombreux aspects à considérer. Le tableau ci-après (tableau1) répertorie les différentes méthodes pour évaluer ou quantifier le NUE. Le choix de la méthode dépend de divers facteurs tels que le temps disponible et la disponibilité des données de base.

INTRODUCTION GENERALE ET BIBLIOGRAPHIE

Table 1. Différentes expressions de l'efficacité d'utilisation d'azote NUE et leur méthode de calcul

Les désignations	La formule de calcul	Les abréviations des équations
Efficacité agronomique NUE_A	$NUE_A (kg.kg^{-1}) = Gf / Na + Nd$	G_f : rendement grains de la parcelle N_d : quantité d'azote disponible dans le sol N_a : quantité d'azote appliquée
Efficacité physiologique NUE_p	$NUE_p (kg.kg^{-1}) = BYf / Nf$	BY_f : rendement biologique (grains + paille) de la parcelle N_f : quantité d'azote absorbé par la plante (grains + paille) de la parcelle
Efficacité agro-physiologique NUE_{AP}	$NUE_{AP} (kg.kg^{-1}) = Gf / Nf$	G_f : rendement grains de la parcelle fertilisée N_f : quantité d'azote absorbé par la plante (grains + paille) de la parcelle
Coefficient apparent d'utilisation d'azote CAU	$CAU (\%) = (Nf / Na + Nd) \times 100$	N_f : quantité d'azote absorbé par la plante (grains + paille) de la parcelle N_d : quantité d'azote disponible dans le sol N_a : quantité d'azote appliquée
Efficacité d'utilisation d'azote NUE	$NUE (kg.kg^{-1}) = PE \times ARE$	PE : Efficacité physiologique ARE : Coefficient apparent d'utilisation d'azote

6 Simulation de la production des cultures avec le modèle des cultures APSIM

Depuis les années 1990, la simulation des cultures est devenue un outil important pour soutenir la prise de décisions dans la production agricole. La plupart des modèles de cultures combinent des approches dynamiques avec des hypothèses empiriques. Par conséquent, des recherches continues sont nécessaires pour améliorer la capture et l'exactitude des données dans des conditions météorologiques extrêmes défavorables, comme celles auxquelles on pourrait s'attendre en raison du variation climatique (Challinor et al., 2003).

La modélisation peut aider à mieux comprendre les interactions complexes entre les différentes composantes des systèmes agricoles, ce qui permet également de prédire l'efficacité des stratégies de gestion (Challinor et al., 2003).

Les modèles de cultures existants reposent sur deux approches différentes. La première approche consiste à quantifier la croissance et le développement des cultures ainsi que les conditions climatiques, par exemple EcoCrop, développé à l'origine par Hijmans et al., (2001), « Agricultural Production Systems Simulator (APSIM) » développé par (McCown et al., 1996). La deuxième approche est basée sur un modèle expérimental qui ne concerne qu'une seule variable. En particulier, le but de base des différents modèles de simulation des cultures est de modéliser la façon dont la croissance et le rendement des plantes sont affectés par les changements dans l'environnement (Jamieson et al., 1998). Les données d'entrée dans n'importe quel modèle doivent être de qualité adéquate, afin de réduire l'incertitude dans le résultat de sortie. De plus, la clarté du résultat et de l'explication seront réduites par la complexité excessive des données d'entrée (Passioura, 1996).

APSIM est l'un des modèles de simulation les plus utilisés pour les systèmes de culture dans les zones arides, il est également employé dans les régions méditerranéennes et tempérées de l'Australie (McKeon et al., 1990). En plus, il simule diverses cultures, y compris les systèmes d'élevage, le blé, le flux des sols, de l'eau et des nutriments ainsi que leurs interactions avec les conditions climatiques (McCown et al., 1996). Cette fonction intégrative est très importante car elle facilite l'intégration de sous-modèles au sein de l'APSIM afin de réaliser des simulations plus complexes. Ainsi, le modèle peut simuler un système agricole où il y a une précipitation incertaine ou insuffisante ainsi que la diminution de la fertilité du sol et de la structure du sol, ce qui a un impact économique sur la production future des cultures.

Il a résulté d'une combinaison de deux approches de modèle, notamment le modèle « productivity, erosion and Runoff function to evaluate

INTRODUCTION GENERALE ET BIBLIOGRAPHIE

conservation thechnic (PERFECT)» (Littleboy, 1989), et un modèle de culture pour la recherche opérationnelle APSIM (McCown & Williams, 1989). PERFECT a été utilisé pour combiner la culture existante avec une gestion améliorée du sol, le mouvement de l'eau du sol et l'érosion. En parallèle, l'APSIM a implémenté le modèle de simulation informatique de la croissance, du développement et du rendement du blé de printemps et d'hiver (CERES-wheat) comme modèle de culture pour obtenir une grande sensibilité à la croissance des cultures, à l'eau du sol et à l'azote du sol (McCown et al., 1996).

L'adoption d'un protocole commun de modélisation (CMP) dans le cadre de l'APSIM a simplifié l'APSIM suffisamment pour permettre l'intégration avec des sous-modèles pour simuler des systèmes agricoles plus complexes (Moore et al., 2007).

APSIM Se compose de trois modèles plante, environnement et gestion de la culture. Ces modèles simulent la croissance du blé dans diverses conditions d'eau du sol et d'azote, ainsi que la gestion des résidus de surface et des applications d'engrais (D. P. Holzworth et al., 2014). Ainsi, APSIM simule la croissance et le développement des cultures sous différentes caractéristiques du sol et des options de gestion, y compris divers systèmes de culture. La croissance et le développement des cultures de blé sont simulés sur une base quotidienne, prenant en compte la surface (par mètre carré), ce qui permet de simuler des populations végétales plutôt que des plantes individuelles. Les variables d'entrée requises par APSIM comprennent les conditions environnementales, les caractéristiques du sol, les informations sur les cultures de blé et les données de gestion.

La croissance et le développement du blé dans ce modèle dépendent de l'environnement, notamment de la température, de l'humidité, des précipitations et du rayonnement solaire, ainsi que de l'eau disponible pour les plantes et de l'azote disponible dans le sol. Les données météorologiques quotidiennes, telles que la température, sont intégrées dans les modèles individuels au sein d'APSIM pour fournir des informations sur les précipitations et le rayonnement solaire. L'absorption quotidienne d'eau du sol et d'azote par le modèle des cultures est transmise au modèle Soil-Wat, qui équilibre la distribution de l'eau dans le profil du sol, et au modèle Soil-N, qui gère la dynamique du carbone et de l'azote disponibles dans le sol. Les données sur la couverture des cultures sont également fournies au modèle Soil-Wat pour calculer le ruissellement et l'évaporation.

À maturité, le rendement est simulé comme une sortie du modèle (figure3).

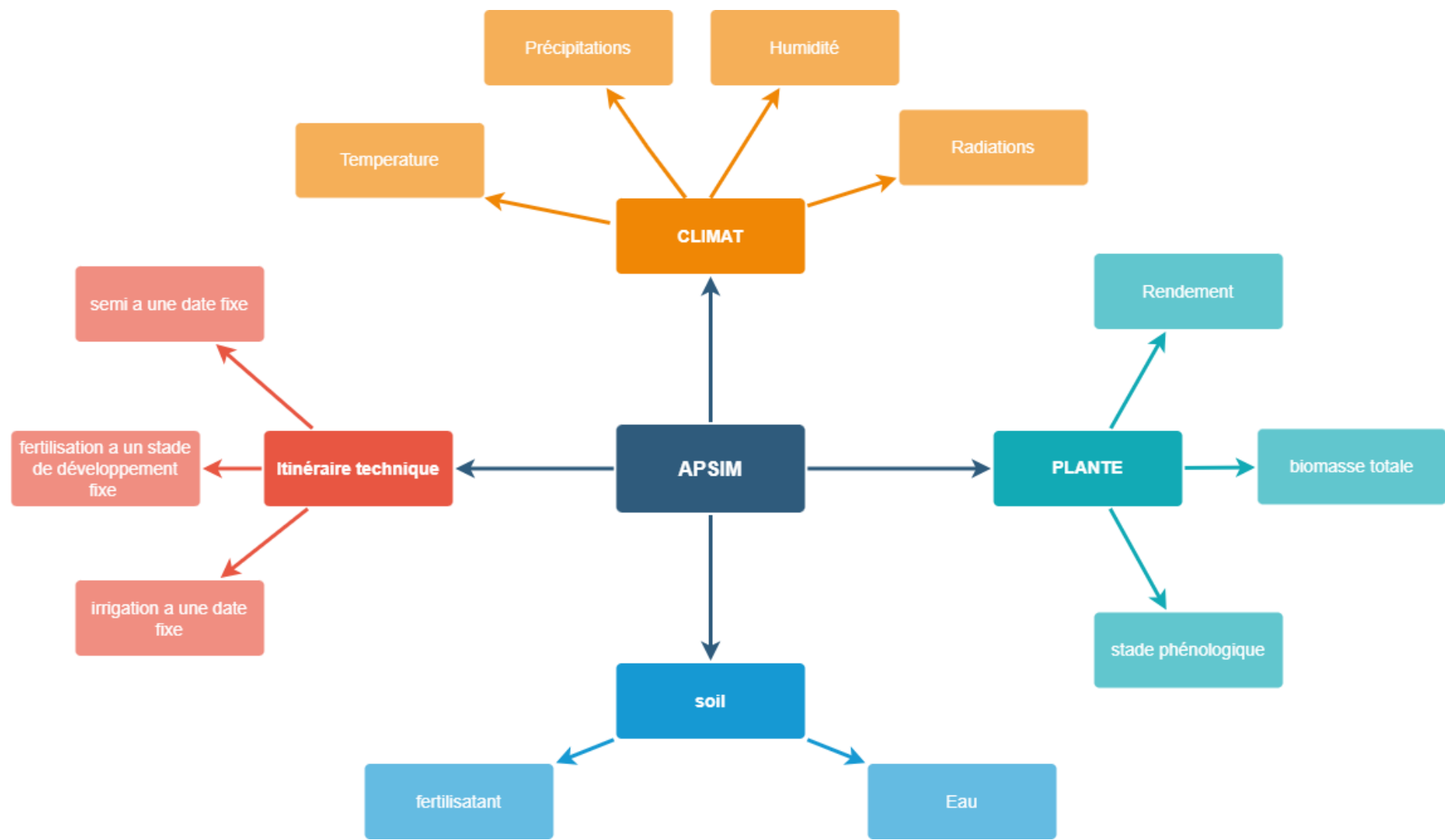


Figure 3. structure de modèle de culture APSIM

L'efficacité de l'APSIM pour simuler la croissance au-dessus et au-dessous du sol, le rendement des céréales, l'absorption d'eau et d'azote, ainsi que les caractéristiques de l'eau du sol et de l'azote des cultures de blé, a été précédemment évaluée dans un climat tempéré aux Pays-Bas et dans d'autres régions (Asseng et al., 2000). À notre connaissance, il n'existe aucun précédent dans la littérature sur l'utilisation de l'APSIM dans les systèmes de culture du blé dans les zones semi-arides de l'Algérie. Étant donné que les simulations des cultures nécessitent l'étalonnage et la validation dans des conditions locales, cela souligne l'importance de cette étude pour évaluer l'applicabilité de l'APSIM dans un nouvel environnement agricole.

7 Présentation de la région d'étude :

7.1 Situation géographique :

7.1.1 Présentation de cadre physique :

La wilaya de Sétif s'étend sur une superficie de 6 504 km² (630 000 ha), représentant 0,27% du territoire national. Elle est positionnée entre les latitudes 36°50 et 35° Nord, et les longitudes 5° Ouest et 6° Est. Ses frontières sont délimitées au Nord par les wilayas de Jijel et Bejaia, à l'Est par la wilaya de Mila, au Sud par les wilayas de Batna et M'sila, et à l'Ouest par la wilaya de Bordj-bou-Argeridj. Sétif est renommée pour son rôle majeur dans la culture céréalière et était jadis surnommée le « grenier de Rome », en raison de son importante capacité de production de blé dur.

7.1.2 Les reliefs :

De manière générale, la région de Sétif se compose principalement de hauts plateaux, où l'on identifie trois types de zones, comme le montre la figure 4.

7.1.2.1 Zone montagneuse :

Cette région couvre plus de 40% de la superficie de la wilaya et se compose de trois massifs montagneux distincts: les montagnes de la zone nord (Babor), s'étirant sur environ une centaine de kilomètres avec une altitude maximale de 2004 mètres; les montagnes des Bibans, dont la partie orientale englobe le nord-ouest de la wilaya ; et enfin, les montagnes du Hodna, qui s'étendent vers le sud et le sud-ouest, culminant à 1890 mètres au Djebel Boutaleb.

7.1.2.2 Zone des hauts pleins :

Il s'agit d'une vaste zone qui couvre la moitié de la superficie totale de la wilaya. Elle est relativement plate, avec des altitudes oscillantes entre 900 et 1200 mètres.

7.1.2.3 Zone de dépression sud et sud-est :

Localisée dans le sud et le sud-est de la wilaya, cette zone présente rarement des altitudes dépassant les 900 mètres. Occupant environ 10% de la superficie de la wilaya, elle est principalement plate et se distingue par la présence de 'chotts', des dépressions salées.

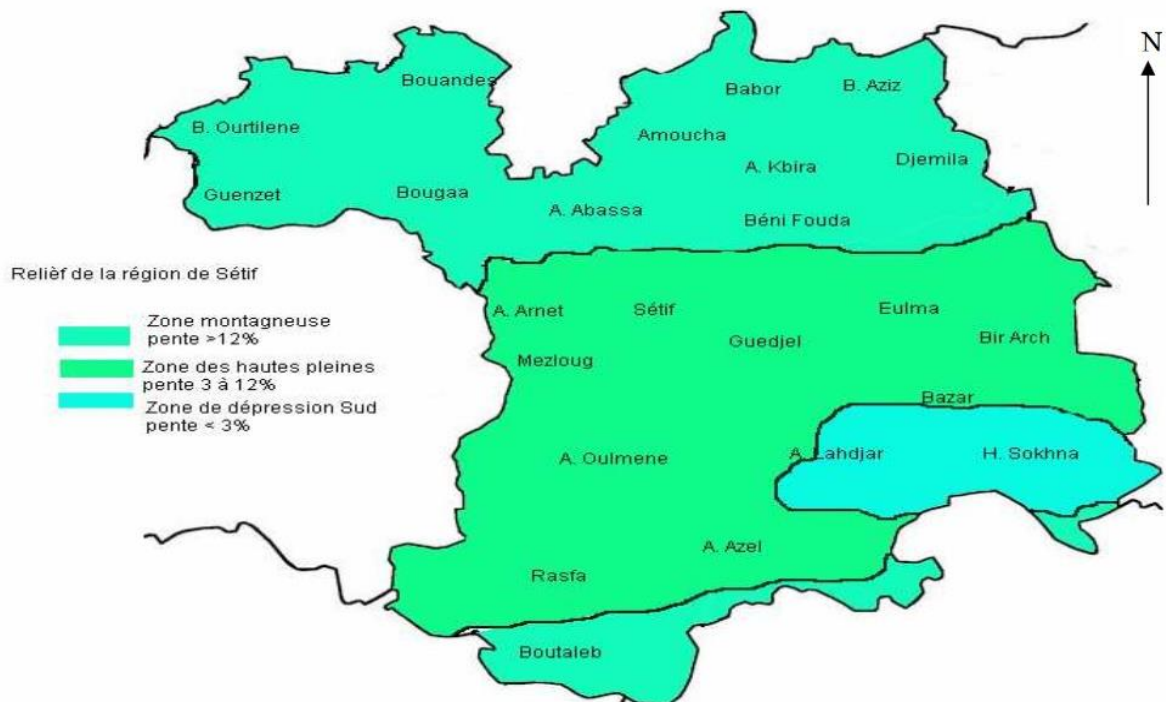


Figure 4. Carte des zones de la wilaya de Sétif (DSA., 2016)

7.1.3 Géologie, sol, topographie :

La wilaya de Sétif couvre une vaste étendue abritant cinq types de sols distincts. Les sols calcaires dominent, occupant la moitié de sa superficie, suivis des sols insaturés, calciques, salins et alluviaux.

Dans les zones montagneuses, les sols calcaires et alluviaux sont prédominants.

Les hautes plaines sont principalement caractérisées par des sols calciques et calcaires, avec une qualité variable d'un endroit à un autre. Dans le nord, certains sols sont riches en argile mais moins fertiles en humus.

Environ 40% des terres se situent dans les zones de piémonts, où les précipitations moyennes atteignent environ 500 mm par an. Les 60% restants se trouvent dans les plaines, où les précipitations annuelles varient généralement entre 250 et 400 mm.

7.2 Étude climatique de la région d'étude :

7.2.1 Les vents:

Les vents les plus courants et souvent les plus dommageables sont ceux du sud, connus sous le nom de siroccos. Ils débutent généralement au mois de mai et peuvent se prolonger jusqu'au mois d'octobre.

7.2.2 Les gelées:

Les gelées sont très fréquentes dans cette région, se produisant généralement de novembre à fin avril. Elles peuvent causer des dommages significatifs sur le rendement des cultures céréalières en altérant la fertilité des épis.

7.2.3 Classification du climat selon diagramme de Mr EMBERGER :

Le quotient pluviométrique d'EMBERGER (figure5) est calculé par la formule suivante :

$$Q = 2000 \frac{P}{M^2 - m^2}$$

Avec :

Q: coefficient pluviométrique d'EMBERGER

P: précipitation moyenne annuel (mm)

M: moyenne des maxima du mois le plus chaud en kelvin

m: moyenne des minima du mois le plus froid en kelvin

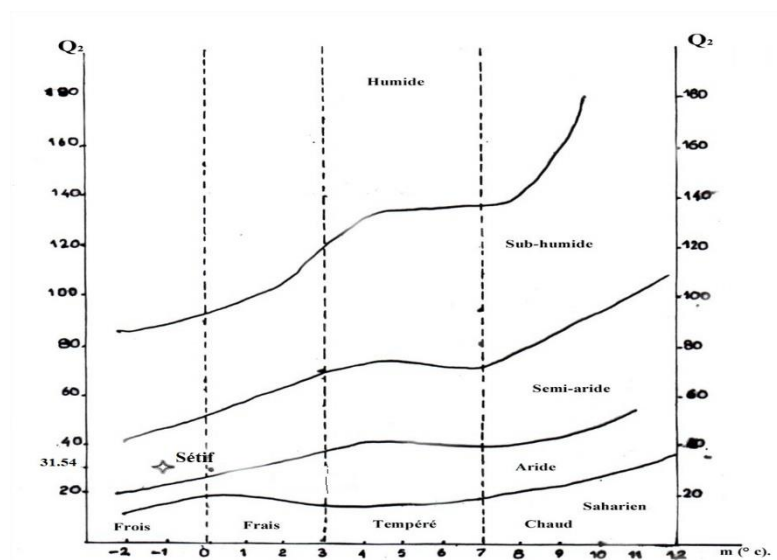


Figure 5:Diagramme bioclimatique d'EMBERGER

La zone d'étude relève de l'étage bioclimatique semi-aride, marqué par un climat continental typiquement méditerranéen. Les étés sont chauds et secs, tandis que les hivers sont froids.

7.3 Diagnostique de secteur agricole dans la wilaya de Sétif :

En 2019, la superficie agricole totale était de 654 777,2 hectares, dont 364 728,17 hectares étaient considérés comme utilisables pour l'agriculture, représentant ainsi 55,7 % de la superficie totale de la wilaya. La jachère occupait 97 675,8 hectares, soit 14,95 % de la superficie agricole totale (Direction des Statistiques Agricoles et des Systèmes d'Information, 2019).

La culture des céréales domine l'activité agricole dans la wilaya de Sétif, occupant une superficie estimée à plus de 198 170 hectares, ce qui représente 72 % de la superficie agricole utile (SAU). Parmi ces céréales, le blé dur prédomine dans les hautes plaines sétifiennes, couvrant 127 438 hectares, soit 62 %. L'orge occupe 24 % de cette superficie, tandis que le blé tendre représente 10 % (Direction des Statistiques Agricoles et des Systèmes d'Information, 2019).

CHAPITRE 2 : Évaluation de l'efficience de l'utilisation de l'eau pour différentes variétés de blé dur cultivées dans la région de Sétif

1 Introduction

L'eau est un élément essentiel que les êtres humains doivent consommer pour maintenir une alimentation adéquate (Pimentel et al., 2004). L'augmentation de la demande d'eau est principalement liée à la production agricole (Hoekstra & Chapagain, 2007), qui contrôle environ 80 % des flux virtuels (*Water in Agriculture*, 2023). Ces aliments sont nécessaires en raison de l'expansion de la population, qui devrait dépasser 10 milliards d'ici 2050 (FAOSTAT, 2023). Avec des terres arables limitées, les menaces à la sécurité alimentaire doivent être résolues par l'agriculture intensive (Teixeira et al., 2014). L'une de ces techniques agricoles intensives est l'utilisation de l'irrigation pour atteindre le double de la productivité des systèmes pluviométriques (*Water in Agriculture*, 2023).

En Algérie, le blé dur (*Triticum durum*) est l'aliment le plus cultivé, occupant 18,5 % des terres agricoles en 2019 et produisant environ 3 millions de tonnes avec un rendement estimé à 2 tonnes par hectare (Direction des Statistiques Agricoles et des Systèmes d'Information, 2019). Ce faible rendement des céréales enregistré peut s'expliquer par de nombreux facteurs, principalement la zone de culture du blé généralement située dans des régions semi-arides caractérisées par un manque et des irrégularités des précipitations inter- et intra-annuelles. D'autre part, l'impact significatif des changements climatiques, avec une disponibilité insuffisante des ressources en eau, conduit à des utilisations limitées du système d'irrigation et nécessite une nouvelle compréhension afin de maintenir les sources équilibrées (El-Beltagy & Madkour, 2012). Ajoutons à cela l'augmentation de la température due aux changements climatiques, qui affecte la durée du cycle de croissance et le développement des plantes (Hatfield & Prueger, 2015) et peut induire en erreur quant à l'efficacité de l'irrigation.

La compréhension du développement phénologique des cultures peut contribuer à plusieurs aspects de la gestion de la production (Whish, 2016). Au cours des dernières décennies, plusieurs études (McMaster, 1997; Ahmad et al., 2017) se sont concentrées sur la description des stades de croissance à l'aide de degrés-jours cumulatifs calculés par le GDD (Growth Degree Days), mais, pour autant que nous le sachions, cela n'a jamais été discuté pour les variétés de blé algériennes.

Ainsi, le défi dans cette région semi-aride est de produire plus de blé avec moins d'eau, ce qui peut être accompli en augmentant la productivité de l'eau des cultures, également appelée l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE). En d'autres termes, il s'agit de rendre chaque goutte d'eau plus précieuse (Kijne et al., 2003; Zwart & Bastiaanssen, 2004). Dans la littérature, le WUE est le plus souvent défini comme le rapport entre la biomasse produite et la transpiration (Condon, 2004; Evans & Sadler, 2008; Morison et al., 2008; Tardieu, 2013). Toutefois, dans

les champs, le partitionnement de l'évapotranspiration en évaporation et en transpiration est extrêmement difficile (Howell, 2001; Zwart & Bastiaanssen, 2004). C'est pourquoi il a été suggéré que la transpiration puisse être estimée sur la base de données relatives aux précipitations, à l'irrigation et à la teneur en eau du sol.

Les caractéristiques génétiques ainsi que l'effet des pratiques de gestion de l'eau sur le WUE ont déjà été mentionnés dans la littérature (Zwart & Bastiaanssen, 2004; Feldman et al., 2018). De plus, de nombreuses études confirment que le WUE peut être affecté par le calendrier de l'irrigation, ce qui signifie qu'un arrosage supplémentaire à des stades de croissance spécifiques peut améliorer le rendement des grains et le WUE (Xiao et al., 2010; Erekul et al., 2012; Tadayon et al., 2012; Jogaiah et al., 2013; Man et al., 2016).

À notre connaissance, outre le temps thermique, le WUE a été mal estimé pour les variétés de blé algériennes, dont la production tient compte du nombre de grains comme paramètre le plus important déterminant le rendement des grains (Boulelouah et al., 2022). Ainsi, nous supposons que les étapes de croissance spécifiques où les plantes ont vraiment besoin d'eau sont différentes de celles citées par El-Hashash et al., (2022) qui déterminent le stade de la croissance cible après l'épiaison et après la floraison.

Pour résoudre les problèmes susmentionnés, à savoir le faible rendement des céréales, l'absence d'informations sur le GDD des variétés de blé algérien, le WUE et le calendrier de l'irrigation, nous avons mené une expérience de terrain sur le blé dur visant à (i) déterminer les stades phénologiques de croissance en utilisant le temps thermique et le temps journalier pour évaluer l'effet génétique et clarifier les relations entre le temps de la phase de développement et les conditions environnementales (ii) estimer et évaluer le WUE et leur variation entre les variétés et le statut environnemental, avec la détermination des paramètres impliqués (iii) étudier la relation entre les rendements de blé dur et leurs composantes, le WUE et les conditions de production et de croissance.

2 Matériels et méthodes

2.1 Lieu d'étude et procédures expérimentales

Des expériences sur le terrain ont été menées pendant les saisons 2021/2022 et 2022/2023 à l'Institut Technique des grandes cultures (ITGC) dans la zone semi-aride de Sétif, en Algérie. (36.1641538, 5.3701344). Nous avons calculé et on trouve que le sol avait une texture argileuse,

Évaluation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour différentes variétés de blé dur cultivées dans la région de Sétif

avec un pH de 7,51, une conductivité électrique de 0,23 dS m⁻¹, une capacité au champ égale à 33,9 % et un point de flétrissement de 14,56 %. La densité apparente était de 1,32 (kg/m³).

Dans deux dispositifs expérimentaux, l'un sous pluie et l'autre irrigué, les deux dispositifs sont similaires et factoriels sur la conception de blocs complets randomisés (RCBD), en utilisant 4 répétitions. (Figure 6).

Le 5 janvier 2022 (première année) et le 29 décembre 2023 (deuxième année), cinq variétés de blé dur (Oued ElBared, Boussellam et Mohamed Ben Bachir (MBB) pour les variétés locales, et Simito et Vitron comme des variétés introduites) ont été semées à une densité de plantation de 350 grains par mètre carré à l'aide d'un semoir en ligne d'une largeur de 1,2 mètre (voir photo 1) (ITGC). Au cours de la préparation des sols, du di-ammonique phosphate (DAP)% a été appliqué à une quantité de 100 kg par hectare. À la GS25 et à la GS32, de l'urée contenant 46

Évaluation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour différentes variétés de blé dur cultivées dans la région de Sétif

% de N a été utilisée comme source d'azote à un taux de 120 unités d'azote par hectare.

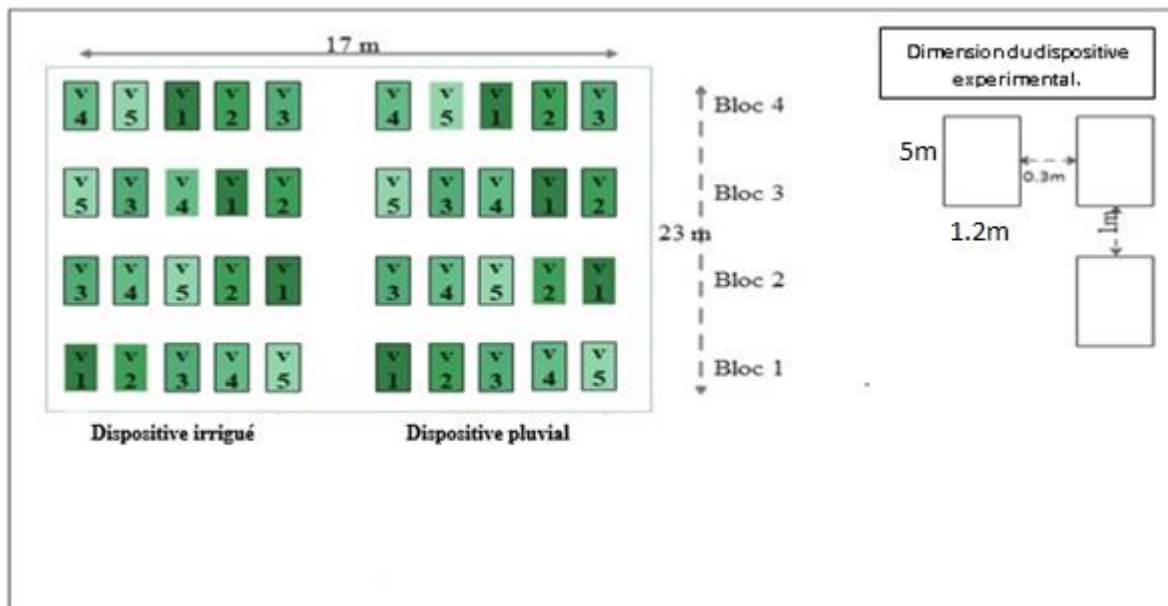


Figure 6. présentation de dispositif expérimental à installer sur le terrain



Photo 1. Semoir en ligne des expérimentations

La répartition des précipitations dépend en effet des données climatiques pendant les deux saisons recueillies à partir de <https://power.larc.nasa.gov/>. En plus, pour les parcelles élémentaires irriguées, une irrigation supplémentaire a été appliquée avec un système goutte à goutte représenté dans la photo 2 (calendrier et la quantité d'irrigation représenté dans le tableau 2).



Photo 2. Système d'irrigation installé

Table 2. Calendrier et la quantité d'irrigation d'appoint (mm)

Stade phénologique*	1 ^{ère} année	2 ^{ème} année
GS0-GS12	15	/
GS25-GS39	/	15
GS39-GS51	/	70
GS51-GS69	/	40
GS69-GS90	90	/

* La détermination des stades phénologique avec l'échelle BBCH du zadoks (Zadoks et al., 1974)

2.2 Évaluation des paramètres étudiés

2.2.1 Rendement et leurs composantes

2.2.1.1 Nombre des épis/m²

Le nombre d'épis est évalué en effectuant un comptage sur un échantillon prélevé sur une surface de 1 m² dans chaque parcelle élémentaire.

2.2.1.2 Nombre des grains/m²

Le nombre des grains /m² est calculé en utilisant la formule suivante :

Évaluation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour différentes variétés de blé dur cultivées dans la région de Sétif

$$NG = (\text{poids de grains}/m^2 \times 1000)/PMG \text{ (grains.m}^{-2}\text{)} \dots\dots\dots \text{Equation (1)}$$

2.2.1.3 Poids de mille grains

Le poids de mille grains est déterminé en comptant 250 grains de chaque échantillon, puis en pesant ces grains pour obtenir leur poids total. Ensuite, le poids de 1000 grains est calculé en utilisant la formule suivante :

$$PMG \text{ (g)} = \text{poids de 250 grains} \times 4 \dots\dots\dots \text{Equation (2)}$$

Le rendement en grains est exprimé en t. ha⁻¹ (REND) et est déterminé après le passage d'une moissonneuse-batteuse expérimentale (photo 3).



photo 3. Moissonneuse batteuse expérimentale

2.2.2 Développement phénologique

Pendant le développement de la culture, le temps de chaque stade a été déterminé, puis nous calculons le nombre de jours après le semi DAS (DS1; jours après le semis pour atteindre GS12. DS2; Jours après le semi pour arriver à GS25. DS3; Jours après le semi pour atteindre GS39. DS4; nombre des jours après le semi pour atteindre GS51. DS5; Jours après avoir semé pour atteindre GS69. DM; Jours après le semi pour atteinte à GS90) et le temps thermique cible par la somme des degré jours de croissance GDD (DJ1; temps thermique pour GS12. DJ2; temps thermique pour GS25, DJ3; temps Thermique pour GS39, DJ4; temps thermique pour GS51, DJ5; temps thermique à GS69, DJM; temps thermique à GS90 décrit dans l'équation 3.

$$GDD = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base} \dots\dots\dots \text{Equation (3)}$$

Le GDD calculé sur la base de la température moyenne quotidienne, moins une température de

base égale à 0 °C pour le blé d'hiver (Fowler, 2018).

2.2.3 Teneur en eau du sol

Pour déterminer la teneur en eau du sol (QE) à chaque stade nous calculons la somme sur un échelle de temps journalière, nous avons utilisé l'équation 4 basée sur le bilan hydrique du sol (Porporato et al., 2004). Avec l'ajout de la quantité d'irrigation Irr et R(t) où représente la précipitation quotidienne, ETc l'évapotranspiration des cultures et LQ représente le résultat de ruissellement et de drainage de l'eau au-delà de la capacité du champ.

$$QE = R + Irr - ETc - LQ \dots\dots\dots \text{Equation (4)}$$

L'évapotranspiration des cultures (ETc) peut être calculée en multipliant l'évapotranspiration de référence (ET0) par le coefficient de la culture (Kc) (Richard G. ALLEN et al., 2006) comme décrit dans l'équation 5, où l'ET0 a été estimée à partir de données climatiques à la suite de l'approche de Penman-Monteith (Martin Smith et al., 1990) et décrite dans (Balaghi, 2005) et le Kc du tableau FAO-56.

$$ETc = ET0 \times Kc \dots\dots\dots \text{Equation (5)}$$

L'étude a été développée en 3 essais ; deux d'entre eux (1 et 3) représentaient la teneur en eau du sol des parcelles irriguées au cours de la première et de la deuxième année, et l'essai (2) le dispositif pluvial de la première année tel que représenté à la figure 7.

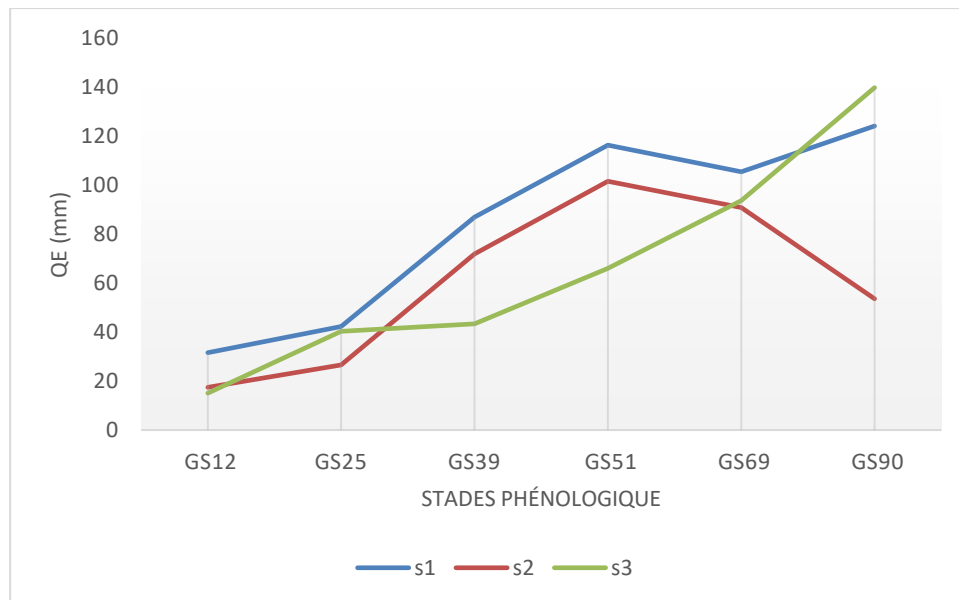


Figure 7. Quantité d'eau disponible dans le sol (QE) dans les 3 essais. S1 ; essai1, S2 ; essai2, S3 ; essai3

2.2.4 Efficacité d'utilisation de l'eau

Pour calculer l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE), le REND (kg.ha⁻¹) de chaque parcelle a

été divisé par la quantité totale de QE (mm) dans toute la saison, et il est représenté dans l'équation 6.

$$WUE = \frac{REND(kg.ha^{-1})}{QE(mm)} \dots\dots\dots \text{Equation (6)}$$

L'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation (WUE_i) a été obtenue par le REND (kg.ha⁻¹) de la parcelle irriguée (REND_{irrigation}) moins le rendement de l'adverse parcelle dans le dispositif pluvial (REND_{pluie}) divisé par la quantité totale d'irrigation dans la saison (irr_quant) (mm) représentée à l'équation 7.

$$WUE_i = \frac{REND_{irrigation} - REND_{pluie}}{irr_quant} \dots\dots\dots \text{Equation (7)}$$

2.2.5 Indice de tolérance au stress

L'indice de tolérance au stress (STI) indiqué dans l'équation 8 a été obtenu en utilisant la formule décrite par Fernandez, (1992) and Puri et al., (2015).

$$STI(\%) = \frac{REND_s \times REND_p}{REND_p^2} \dots\dots\dots \text{Equation (8)}$$

Dont REND_s est le rendement dans des conditions de stress, REND_p représente le potentiel de rendement du grain du géotype et REND_p représente les rendements des grains dans un environnement sans stress.

2.3 Analyse statistique

Les données regroupées de tous les paramètres pour les trois essais ont été soumises à une ANOVA deux facteurs et extraites des graphiques moyens en utilisant le package Rcmdr dans R Software version 4.2.2 pour définir la différence de trait entre les facteurs. RStudio a été utilisé à la fois pour le coefficient de corrélation de Pearson et l'analyse stepwise afin de déterminer la relation entre les traits et de choisir les composants des modèles, également Les packages "lavaan" et "semPlot" ont été utilisés pour obtenir l'analyse du coefficient de piste causale afin de déterminer l'effet direct et indirect caché sous une régression linéaire multiple (Cramer et al., 1999; Khare, 2022).

3 Résultats

3.1 Analyse de la variance du développement phénologique sur la fonction du DAS et du GDD

Les résultats (tableau 3) montrent des différences significatives entre les essais pour à la fois le nombre de jours après le semis (DAS) et le cumul de degrés-jours (DJ) au stade GS12 ($p <$

Évaluation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour différentes variétés de blé dur cultivées dans la région de Sétif

0,0001 pour les deux paramètres). Cela suggère que les conditions expérimentales ont un impact significatif sur le temps écoulé depuis le semis ainsi que sur l'accumulation de la température à ce stade de croissance. De plus, des différences significatives sont observées entre les variétés pour à la fois le DAS et le DJ ($p < 0,05$ pour les deux paramètres), indiquant des variations dans le temps de croissance et dans l'accumulation de la température entre les différentes variétés de blé dur. L'interaction entre les essais et les variétés montre également des différences significatives pour le DAS et le DJ ($p < 0,01$ pour les deux paramètres), suggérant que l'effet des conditions expérimentales sur le temps écoulé depuis le semis et sur l'accumulation de la température peut varier en fonction de la variété utilisée.

Pour le stade de croissance GS25 et GS39, les résultats ne montrent aucune différence significative entre les essais, les variétés ou leur interaction pour à la fois le nombre de jours après le semis (DAS) et le cumul de degrés-jours (DJ) ($p > 0,05$ pour les deux paramètres). Cela indique que, à ce stade de croissance, les conditions expérimentales et les différences génétiques entre les variétés de blé dur n'ont pas eu un impact significatif sur le temps écoulé depuis le semis ni sur l'accumulation de la température. Ces résultats suggèrent une certaine stabilité dans le processus de croissance du blé dur à ce stade, indépendamment des variations expérimentales ou génétiques.

Ces résultats indiquent que les différences observées entre les essais et les variétés sont significatives à la fois pour le nombre de jours après le semis (DAS) et pour le cumul de degrés-jours (DJ) au stade de croissance GS51. Cela suggère que les conditions expérimentales et les différences génétiques entre les variétés de blé dur ont un impact significatif à la fois sur le temps écoulé depuis le semis et sur l'accumulation de la température à ce stade de croissance. Cependant, l'interaction entre les essais et les variétés n'est pas significative pour DAS et DJ, indiquant que l'effet des conditions expérimentales sur ces deux paramètres ne varie pas en fonction de la variété utilisée.

Pour le stade GS69. Le nombre de jours après le semis (DAS) est significativement influencé à la fois par les essais et les variétés, mais l'interaction entre les essais et les variétés n'est pas significative. Le cumul de degrés-jours (DJ) est significativement influencé par les variétés, mais pas par les essais ni par leur interaction. Cela suggère que les conditions expérimentales n'ont pas d'impact significatif sur l'accumulation de la température à ce stade, mais que les différences entre les variétés sont significatives.

Pour le stade de croissance GS90, les analyses montrent que tant le nombre de jours après le semis (DAS) que le cumul de degrés-jours (DJ) sont significativement influencés par les essais, les variétés et leur interaction ($p < 0,0001$ pour tous les cas). Ces résultats suggèrent que les

Évaluation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour différentes variétés de blé dur cultivées dans la région de Sétif

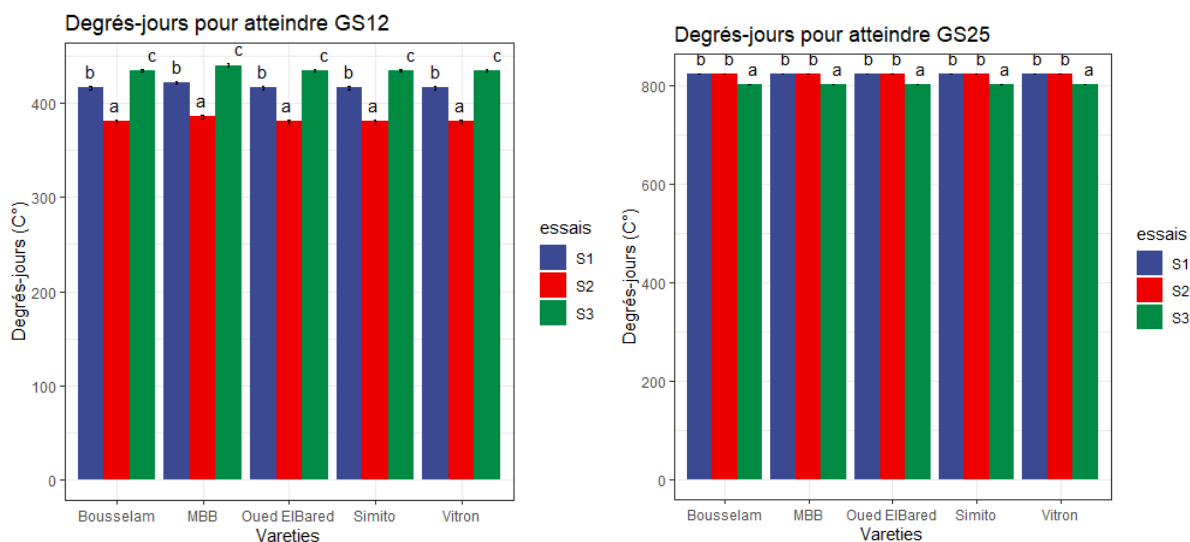
conditions expérimentales, les différences génétiques entre les variétés et leur interaction ont un impact significatif à la fois sur le temps écoulé depuis le semis et sur l'accumulation de chaleur à ce stade de croissance.

Table 3. Effet variétales et environnementales sur la détermination des stades phénologique en fonction de degrés jours et jour journalière.

		Cumul de degré jours (DJ C°) et le nombre des jours après le semi (DAS)											
Paramètres		GS12		GS25		GS39		GS51		GS69		GS90	
		DAS	DJ	DAS	DJ	DAS	DJ	DAS	DJ	DAS	DJ	DAS	DJ
P-Value	Essai (S)	<0.0001	<0.0001	n.s	n.s	n.s	n.s	<0.0001	<0.01	<0.0001	n.s	<0.0001	<0.0001
	Variétés (V)	<0.05	<0.05	n.s	n.s	n.s	n.s	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	(SxV)	<0.01	<0.01	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	<0.0001	<0.0001

3.2 Cumul de degré jours (GDD C°) des différentes variétés

À la figure 8, nous avons observé qu'à la GS12 (a) il n'y avait pas de différence entre les variétés dans le même essai, la différence seulement dans la variété MBB où il a été distingué des autres variétés puisqu'il a accumulé 450 °C dans le troisième essai. Pour toutes les variétés, une différence significative a été observée entre les essais. Pour GS25 et GS39, les graphs (b) et (c) étaient l'essai irrigué et pluvieux de la première année donnée la même valeur en contrat avec le troisième essai et ont montré clairement que la chaleur est le facteur réel pour déterminer les deux étapes. De l'étape GS51 à l'étape GS90, il existe une différence distinctive entre les variétés ($p < 0.0001$, tableau 3). Pour GS51, on a observé une grande différence entre les essais S1 et S2 par rapport à S3, en particulier pour Oued ElBared et Vitron, la même observation a également été recodée pour GS69 avec les variétés Bousselam, Oued elBared, et Simito. Avec la variété OuedElBared qui ont enregistré la plus faible valeur de GDD dans tous les essais. Dans les trois essais au GS90 (figure 8 (f)), la variété MBB a enregistré le jour de croissance le plus élevé et a obtenu une accumulation de 2600 °C, suivie de la variété Vitron (2550°C) qui peut être considérée comme une variété à maturation tardive. D'autre part, nous devrions souligner que les deux variétés Boussellam et Oued ElBared ont accumulé 350°C et 300°C respectivement moins que la variété MBB.



Évaluation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour différentes variétés de blé dur cultivées dans la région de Sétif

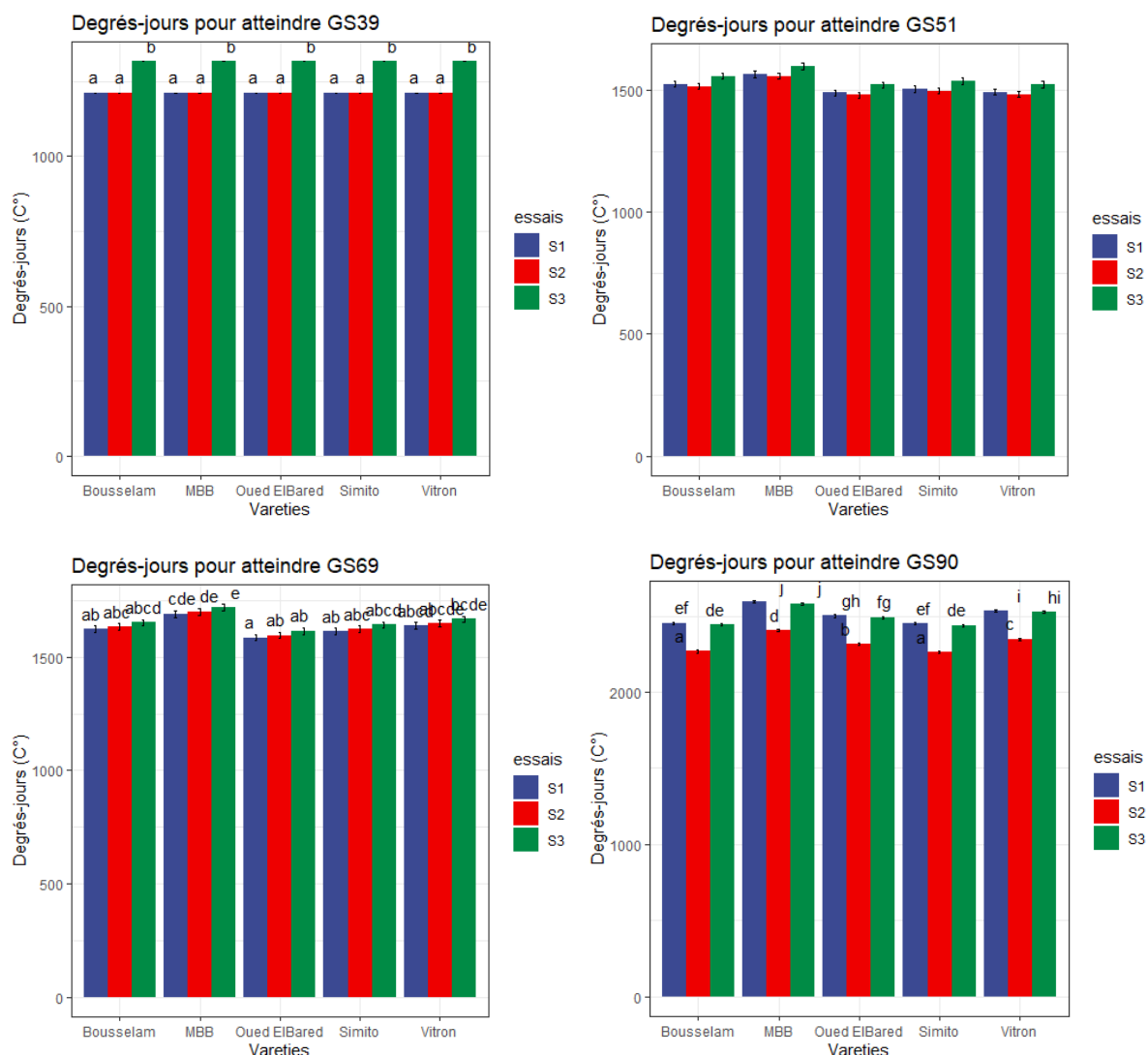


Figure 8. Cumul de degré jours (GDD) pour atteindre différents stades de développement

3.3 Elaboration des modèles empiriques pour la détermination des stades phénologique

Une analyse de régression stepwise a été effectuée afin d'éliminer les traits inefficaces dans le modèle de régression sur plusieurs stades de développement phénologique. Les résultats présentés dans le tableau 4 ont montré une performance élevée des modèles d'extracteur de deux paramètres (DS1 et DS4) révélant un coefficient de détermination (R^2) plus élevé que 0,90, justifié par le temps thermique pour atteindre chaque stade avec QE dans la période antérieure à cet stade, suivi par le modèle du DM qui prévoit par la température et QE au stade de remplissage des grains avec un $R^2=0,79$. Pour le modèle représentant le nombre de jours pour atteindre la floraison, seulement la température cumulative impliquée, mais pas suffisante pour utiliser le modèle obtenu ($R^2 = 0,21$).

Table 4. modèles de prédiction pour chaque stade phénologique et leur coefficient de

détermination

Paramètre	Modèle	R ²
DS1	$y=0.1332 \cdot DJ1 - 0.0593 \cdot QE1 - 16.82$	0.99
DS4	$y=0.056 \cdot DJ4 + 0.2 \cdot QE4 + 21.06$	0.91
DS5	$y=0.04 \cdot DJ5 + 64.02$	0.21
DM	$y=0.034 \cdot DJM + 0.066 \cdot QE6 + 93.90$	0.79

Avec : DJ1 ; temps thermique pour atteindre GS12. DJ4 ; temps thermique pour atteindre GS51. DJ5 ; temps thermique pour atteindre GS69. DJM ; temps thermique pour atteindre GS90. QE1 ; Teneur en eau disponible du sol de GS0 à GS12. QE4 ; teneur en eau disponible du sol du GS39 au GS51. QE6 ; eau disponible dans le sol au GS69 jusqu'à GS90. DS1 ; jours après semis pour atteindre GS12. DS2 ; jour après semis pour atteindre GS25. DS4 ; jour après semis pour atteindre GS51. DS5 ; jour après semis pour atteindre floraison. DM ; jour après semis afin d'atteindre la maturité.

3.4 Analyse de la variance des rendements et de leur composante, WUE, WUEi et STI

L'analyse des résultats révèle des informations significatives sur différents paramètres mesurés lors de l'expérience. Pour le paramètre $NE.m^{-2}$, les tests montrent que les variations observées entre les différents essais sont statistiquement significatives ($p < 0,0001$), ce qui suggère une influence notable des conditions expérimentales sur le nombre d'épis par mètre carré. De plus, les différences entre les variétés sont également significatives ($p < 0,05$), indiquant une diversité dans la performance des variétés en termes de production d'épis. L'interaction entre les essais et les variétés est également significative ($p < 0,0001$), soulignant que l'impact des conditions expérimentales sur le nombre d'épis par mètre carré dépend des variétés utilisées. De manière similaire, pour le paramètre $NG.E^{-1}$, les essais, les variétés et leur interaction présentent tous des valeurs de p significativement basses ($p < 0,0001$), mettant en évidence l'influence des conditions expérimentales et des variétés sur le nombre de grains par épi. Cette tendance se poursuit avec le paramètre $NG.m^{-2}$, où les essais, les variétés et leur interaction montrent des différences significatives ($p < 0,0001$) dans le nombre total de grains par mètre carré. Ces résultats suggèrent une variabilité substantielle dans la production de grains par unité de surface en fonction des conditions expérimentales et des variétés de blé dur. En outre, des tendances similaires sont observées pour d'autres paramètres tels que le PMG (poids moyen de grain) et le REND (rendement), où les essais, les variétés et leur interaction ont des effets significatifs ($p < 0,0001$), mettant en évidence l'impact des conditions expérimentales et des variétés sur ces mesures de performance. En revanche, pour le paramètre STI (indice de tolérance au stress), bien que les variétés et leur interaction présentent des valeurs de p significativement basses ($p < 0,0001$), les essais ne montrent pas de différences significatives ($p = n.s.$), indiquant que ce paramètre n'est pas influencé de manière significative par les variations expérimentales. En résumé, ces résultats mettent en évidence l'importance des conditions expérimentales et des variétés dans la détermination de divers paramètres agronomiques du blé dur, offrant des informations précieuses pour l'amélioration de la production agricole.

Table 5. Analyse de la variance des essais et les variétés sur le rendement de blé et leurs composantes, WUE, WUEi et STI

Le rendement et leurs composantes, WUE, WUEi and STI								
Paramètres					REND (t.	WUE	WUEI	STI
	$NE.m^{-2}$	$NG.E^{-1}$	$NG.m^{-2}$	PMG(g)	ha ⁻¹)	(kg.mm ⁻¹)	(kg.mm ⁻¹)	

Évaluation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour différentes variétés de blé dur cultivées dans la région de Sétif

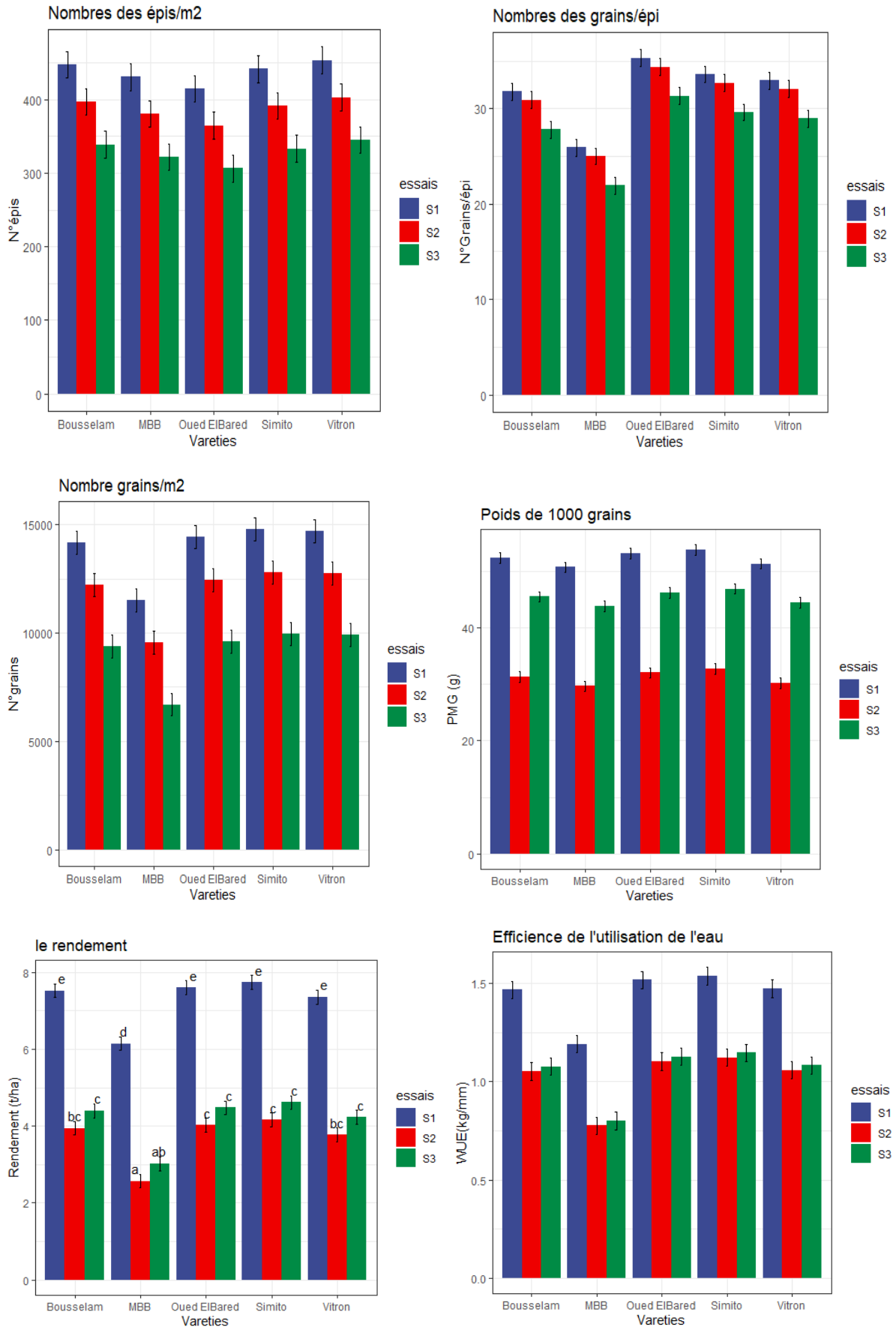
P-	essais (S)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	n.s	<0.0001
Val	Variétés (V)	<0.05	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
ue	essai^Variété	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

NE.m⁻²; nombre des épis.m⁻². **NG.E⁻¹**; nombre des grains.épi⁻¹. **NG.m⁻²**; nombre des grains.m⁻². **PMG**; poids de mille grains. **REND**; rendement, **WUE**; efficacité d'utilisation d'eau, **WUEI**; efficacité d'utilisation d'eau d'irrigation, **STI**; l'indice de la tolérance au stress.

3.5 Rendement et ses composants, WUE, STI et WUEI de différentes variétés

Les résultats montrés à la figure 9 déterminent les effets des essais et des variétés V pour tous les composants de rendement, WUE, STI et WUEI. Dans la figure 9(a), il apparaît une grande différence entre les variétés et les essais ; avec l'essai S3 représente les moins valeur, Boussellem obtenir une valeur correspondant à QE de GS12 à GS25, pour les autres, la QE après GS25 a un effet dans le NE.m⁻². Pour le NG.E⁻¹ (b), une valeur proche a été enregistrée entre les essais de la première année à l'exception du MBB et du Vitron, alors qu'elle peut s'expliquer par le temps de floraison tardif. Pour le PMG, la différence entre les variétés ayant la valeur la plus élevée de 57g a été enregistrée pour Simito dans l'essai 1 et une relation de QE après GS69 a été exceptionnelle. La figure 9 (e), révèle une grande variation en REND entre différents essais et variétés avec une valeur appropriée pour Boussellam et Oued ElBared. Le Boussellam a obtenu une valeur supérieure de 8,2 t.ha⁻¹ par rapport aux autres variétés de S1. Simito et Vitron ont tous deux enregistré un REND élevé dans l'essai pluviale (S2) avec 4,6 tha-1 et 4,3 t.ha⁻¹, respectivement, avec une valeur inférieure de 2,6 t.ha⁻¹ obtenue par MBB. Les résultats WUE (f) sont similaires à ceux enregistrés en REND (e). Pour le WUEI (g), Boussellam et Oued El Bared ont obtenu les valeurs les plus élevées de l'WUEi avec 4,6 kg.mm⁻¹ et 3,9 kg.mm⁻¹, respectively. Pour STI, Boussellam et MBB qui ont eu les valeurs les plus faibles de 0,19, 0,17 et 0,60, 0,63 dans la première et la deuxième année respectivement, et considéré les variétés intéressantes dans les deux essais.

Évaluation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour différentes variétés de blé dur cultivées dans la région de Sétif



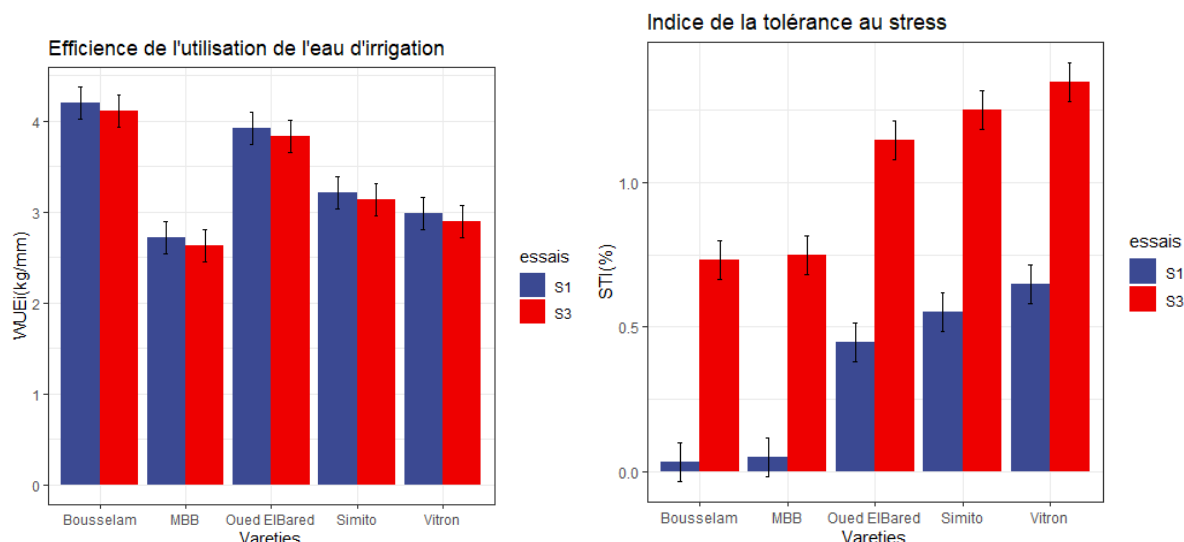


Figure 9. variation entre les essais et les variétés sur le rendement, leur composantes, WUE, WUEi et STI

3.6 Elaboration des modèles empiriques pour la détermination du rendement, leurs composantes, WUE, WUEi et STI

L'élaboration des modèles en ajoutant et en supprimant successivement les traits exprimés par une régression stepwise ont été utilisés pour extrapoler des modules appropriés contenant un ensemble de variables indépendantes qui influencent de manière significative la variable dépendante. En outre, en utilisant la même analyse pour décrire le modèle de rendement par rapport à tous les autres paramètres mentionnés précédemment et les résultats représentés dans le tableau 6.

L'analyse stepwise a révélé l'effet significatif du temps thermique et de la disponibilité en eau du sol pour décrire le rendement, la composante du rendement et le WUE avec un coefficient de détermination de $R^2=0.92$, $R^2=0.54$, $R^2=0.69$, $R^2=0.69$ et $R^2=0.93$ pour REND, NE, NG.E, NGM, PMG et WUE respectivement. En outre, le temps thermique et journalier pour atteindre un stade phénologique avec la teneur en eau du sol pendant la période végétative justifiait 77% des STI.

Table 6. Modèles de prédiction du rendement, leur composantes, WUE et STI

Paramètres	Modèle	R^2
NE	$y=171.4 \cdot DJ2+29.8 \cdot DJ5-19.09 \cdot QE1+28.37 \cdot QE4-6.922 \cdot QE5-497.9 \cdot DS5$	0.54
NG.E	$y=-0.944 \cdot DJ1-0.027 \cdot DJ4+1.43 \cdot DJ5-0.154 \cdot DJ6+15.77 \cdot QE1-11.27 \cdot QE2-0.208 \cdot QE5-24.36 \cdot DS5+3.05 \cdot DM$	0.69
NGM	$y=-195.05 \cdot DJ1-266.38 \cdot DJ5-53.99 \cdot DJM+1806.65 \cdot QE1+291.52 \cdot QE4-216.91 \cdot QE6-4435.94 \cdot DS5-653.92 \cdot DM+210850.18$	0.69
PMG	$y=-0.57 \cdot DJ1+0.89 \cdot DJ4-0.017 \cdot DJM+11.72 \cdot QE1-6.92 \cdot QE2-0.804 \cdot QE4-14.75 \cdot DM+890.53$	0.93
REND	$y=-0.218 \cdot DJ1+0.378 \cdot DJ5-0.033 \cdot DJM+3.17 \cdot QE1-1.6 \cdot QE2+0.24 \cdot QE4-0.075 \cdot QE5-0.11 \cdot QE6+0.467 \cdot DM+298.12$	0.92

Évaluation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour différentes variétés de blé dur cultivées dans la région de Sétif

WUE	$y = -0.05 * DJ1 + 0.09 * DJ5 - 0.007 * DJM + 0.73 * QE1 - 0.41 * QE2 + 0.065 * QE4 - 0.02 * QE6 - 1.54 * DS5 + 0.11 * DM + 72.03$	0.79
STI	$Y = 0.02 * DJ1 - 0.06 * DJ5 - 1.05 * QE2 - 0.16 * QE4 + 0.03 * QE5 - 0.04 * DS4 + 1.04 * DS5 + 19.85$	0.77
REND.F	$y = -0.02 * DJ1 - 0.086 * DJ2 - 0.006 * DJM + 0.262 * QE1 + 0.025 * QE5 + 0.092 * DM - 0.069 * NGE - 0.005 * NE - 0.093 * PMG - 0.0002 * NGM + 7.98 * WUE + 73.12$	0.99

DJ1; temps thermique pour atteindre GS12. **DJ2**; temps thermique pour atteindre GS25. **DJ4**; temps thermique pour atteindre GS51. **DJ5**; temps thermique pour atteindre GS69. **DJM**; temps thermique pour atteindre GS90. **QE1**; Teneur en eau disponible du sol de GS0 à GS12, **QE2**; Teneur en eau disponible du sol de GS12 à GS25, **QE4**; Teneur en eau disponible du sol de GS39 à GS51, **QE5**; Teneur en eau disponible du sol GS51 à GS69, **QE6**; Teneur en eau disponible du sol GS69 à GS90, **DS4**; jours après semis pour atteindre l'épiaison. **DS5**; jours après le semis pour atteindre la floraison. **DM**; jours après le semis pour atteindre la maturité. **NE**; nombre des épis.m². **NGE**; nombre des grains.epi⁻¹. **NGM**; nombre des grains.m². **PMG**; poids de mille grains. **REND**; rendement. **REND.F**, rendement final.

3.7 L'étude du coefficient de piste causale "path coefficient" sur le rendement

La technique du coefficient de piste causale a été utilisée pour décomposer les coefficients de corrélation entre le rendement et les autres paramètres liés au rendement en effets directs et indirects *via* d'autre paramètre ou de voies alternatives. Pour cette analyse, NGM a été utilisé comme paramètre représentatif de NE et NGE et a supprimé WUE pour nettoyer les données et éviter la multicollinéarité dans la structure de l'équation du modèle (SEM)

L'analyse du coefficient de piste causale a été utilisée pour déterminer les effets directs et indirects de chaque composant sur le rendement. Comme le montre le tableau 7, le PMG et le NGM ont eu un effet direct sur le REND avec 0,67 et 0,54 respectivement. Les autres paramètres affectent le REND indirectement via ces composants de manière positive ou négative ; pour le QE avant la levée de blé (entre le semis et la levée) et entre l'épiaison et la floraison a un effet indirect positif via les deux composants PMG et NGM avec 0.42, 0.23 et 0.31, 0.16, le Cumul de degré jours et le nombre des jours après le semis jusqu'à la maturité a une influence positive indirecte seulement *via* PMG avec une valeur de 0.48 et 0.35 respectivement.

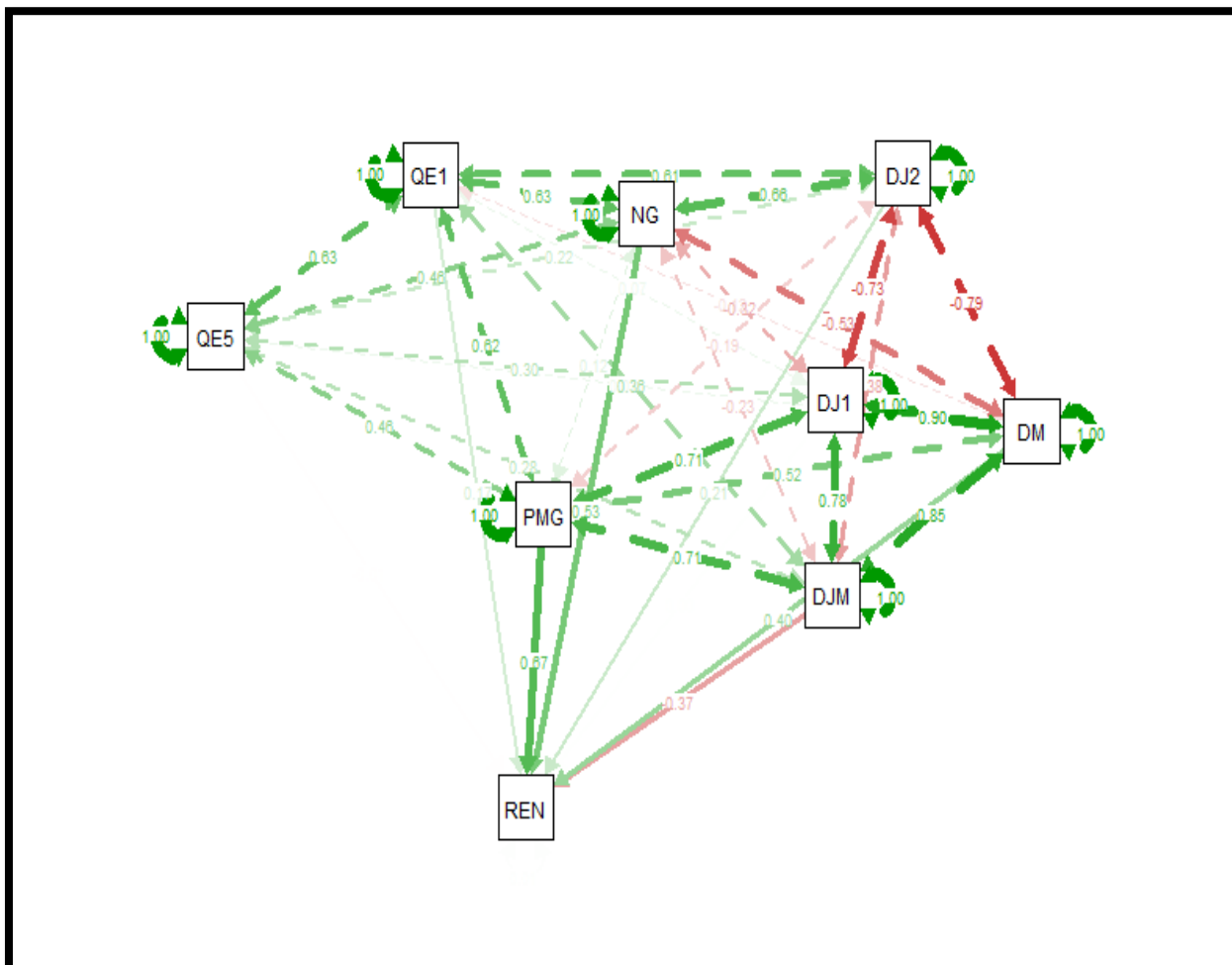
Table 7. L'effet direct et indirect avec le coefficient de corrélation (r) des paramètres sur le rendement

	NGM	PMG	DJ1	DJ2	DJM	DM	QE1	QE5	r avec REND
NGM	0.52	0.08	0	0.14	0.12	-0.21	0.11	0	0.76
PMG	0.06	0.67	0	-0.04	-0.26	0.21	0.11	0	0.75
DJ1	0.17	0.48	0	-0.15	-0.29	0.36	0.01	0	0.43
DJ2	0.34	-0.13	0	0.21	0.14	-0.32	0.1	0	0.34
DJM	-0.12	0.48	0	-0.08	-0.37	0	0.06	0	-0.03
DM	-0.28	0.35	0	-0.17	0	0.4	-0.02	0	0.28
QE1	0.33	0.42	0	0.13	-0.13	-0.05	0.17	0	0.92
QE5	0.24	0.31	0	0.05	-0.1	0.04	0.11	0	0.65

Évaluation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour différentes variétés de blé dur cultivées dans la région de Sétif

DJ1; temps thermique pour atteindre GS12. **DJ2**; temps thermique pour atteindre GS25. **DJM**; temps thermique pour atteindre GS90. **QE1**; Teneur en eau disponible du sol de GS0 à GS12, **QE5**; Teneur en eau disponible du sol GS51 à GS69. **DM**; jours après le semis pour atteindre la maturité. **NGM**; nombre des grains.m⁻². **PMG**; poids de mille grains. **REND**; rendement. **r** ; coefficient de corrélation.

Les résultats présentés dans le tableau 7 prendre pour faire une démonstration graphique a fin de clarifier les flux disponibles au sein de modèle (figure 10)



DJ1; temps thermique pour atteindre GS12. **DJ2** ; temps thermique pour atteindre GS25. **DJM**; temps thermique pour atteindre GS90. **QE1** ; Teneur en eau disponible du sol de GS0 à GS12, **QE5**; Teneur en eau disponible du sol GS51 à GS69. **DM** ; jours après le semis pour atteindre la maturité. **NG**;nombre des grains.m⁻². **PMG** ;poids de mille grains. **REN** ; rendement.

Figure 10. Démonstration graphique de coefficient de piste causale des paramètres phénologique, environnementale et les composantes du rendement sur le rendement

4 Discussion

Cette étude a pour objectif de déterminer les stades phénologiques de croissance en utilisant le temps thermique (degrés-jours DJ) et le temps journalier (nombre de jours après le semis DAS), d'évaluer l'effet génétique, de clarifier les relations entre le temps du stade de la croissance et les conditions environnementales, avec une estimation de l'WUE et de ses variations entre les

Évaluation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour différentes variétés de blé dur cultivées dans la région de Sétif

variétés et l'état environnemental, en déterminant les paramètres significativement impliqués. De plus, elle vise à étudier la relation entre le rendement, ses composants, l'WUE et les conditions de croissance de la culture.

Dans le tableau 3, nous avons étudié les différences entre les stades phénologiques de développement en jours (DAS) et le temps thermique cumulatif (DJ) entre un ensemble de variétés locales et introduites, développées dans trois essais, en tenant compte de la quantité d'eau disponible (QE) et de la température, afin d'évaluer le comportement du génotype dans différents environnements. Globalement, nos résultats sont cohérents avec des recherches antérieures montrant l'effet de la température et du stress hydrique sur différents génotypes de blé (Cosentino et al., 2019; Chowdhury et al., 2021; Xiao et al., 2021; Yashavanthakumar et al., 2021).

Nos recherches démontrent que l'unité de température est plus efficace que les jours nécessaires pour une phase de développement spécifique, et cette approche a été suivie dans divers modèles de cultures (Keating et al., 2003; Jones et al., 2003); dans le module APSIM-wheat Zheng et al., (2015) , en particulier, la période entre le semis et l'émergence a été étudiée et les interprétations ont été discutées. Sur la base de nos résultats, et similaires à ces résultats sur la température, La QE a eu un effet sur la durée de la période semi-levée. De plus, de nombreuses recherches, lors de l'estimation des phases de développement phénologique, visent généralement les stades de la floraison et de la maturité (Saiyed et al., 2009; Wolkovich et al., 2012; Aslam et al., 2017a). Aslam et al., (2017) mentionnent que la méthode DJ avec un ajustement de la photopériode peut déterminer efficacement le nombre de jours nécessaires pour le stade de la floraison, ce qui est en accord avec les conclusions tirées par notre étude, qui a enregistré que la température ne détermine que 21 % du nombre de jours nécessaires pour la prédiction de la floraison. Cela contredit en quelque sorte les conclusions de Saiyed et al., (2009) et Wang et al., (2015) qui ont suggéré que le DJ expliquait plus de 84 % de la variation dans le nombre de jours nécessaires pour la floraison. Selon Wang et al., (2015), pour la phase de maturité, le DJ détermine 64 % du nombre de jours nécessaires pour atteindre la maturité. Selon nos résultats, lorsque nous ajoutons le QE, la prédiction de la durée en jours du cycle de croissance, depuis le semis jusqu'à la maturité, est plus acceptable avec un coefficient de détermination (r^2) de 0.79.

Nos résultats ont montré une variation dans la réponse des variétés à différents essais quant au rendement et à ses composants, ce qui a été observé dans diverses recherches (Zhao et al., 2020; Wang et al., 2022; Panfilova et al., 2023). En effet, chaque composant que nous avons analysé était différemment lié au DJ, au QE au stade clé et au DAS à un stade cible, ce qui a donc

affecté le rendement.

D'autre part, nous concluons que l'utilisation de l'STI avec une valeur inférieure est plus appropriée (Lamba et al., 2023) ce qui a été confirmé par le coefficient de corrélation entre le rendement et l'STI, qui est égal à $r = -0,64$. La valeur la plus faible a été enregistrée pour les variétés locales Boussellam et MBB, caractérisées par la tolérance à la sécheresse (Chourghal et al., 2016a), par rapport à la variété introduite Vitron, qui est considérée comme un génotype très sensible (Amokrane et al., 2002). Ce paramètre est utilisé comme critère de sélection approprié pour les génotypes (Fernandez, 1992), et il est utilisé dans plusieurs études pour sélectionner des variétés capables de résister à des températures élevées (Puri et al., 2015; Poudel et al., 2021; Aberkane et al., 2021).

En ce qui concerne le WUE, Feldman et al., (2018) suggèrent que le WUE est fortement héréditaire et considéré comme un caractère polygénique, ce qui peut expliquer les différences entre les génotypes et leurs réponses dans des conditions environnementales déterminantes. Contrairement aux STI, les WUE ont une corrélation positive avec le rendement ($r = 0,96$). De plus, l'analyse stepwise a révélé que le WUE était associé à des paramètres phénologiques et au SWC à différentes périodes de développement, plutôt qu'à la quantité totale d'eau. Toutefois, nous confirmons la possibilité d'améliorer le WUE grâce à une gestion efficace de l'irrigation, au lieu de recourir à des stratégies de sélection (Evans & Sadler, 2008).

Le rendement a été le paramètre le plus important dans cette étude, car une analyse du coefficient de piste causale a été effectuée pour montrer l'effet réel d'autres paramètres sur celui-ci. Le NGM et le TGW étaient les plus pertinents, avec un effet positif direct de 0,53 et 0,67 respectivement, comme le confirment plusieurs auteurs (Aissaoui & Fenni, 2021; Boulelouah et al., 2022). De plus, le temps nécessaire aux plantes pour atteindre la maturité a eu un effet positif sur le GY. Cela peut s'expliquer par le fait que la plante a le temps d'une absorption suffisante des ressources. De plus, le génotype de maturité précoce peut ne pas être utile pour faire face aux risques futurs de la variation climatique (Xiao et al., 2010; Wang et al., 2015; Asseng et al., 2015). Toutefois, il convient d'attirer l'attention sur le fait que la longue période nécessaire pour atteindre la maturité, exprimée en degrés-jours, n'est pas nécessaire, avec un effet direct négatif (-0,37), en particulier dans les zones semi-arides. Dans ces zones, les changements climatiques sont connus pour être particulièrement dangereux et peuvent entraîner une réduction du rendement en raison de la haute température pendant le remplissage des grains (Asseng et al., 2011).

D'autres paramètres ont un effet indirect via le NGM et le PMG, comme la QE dans la première période du semi à la levée, avec un effet positif par le NGM. Cela peut s'expliquer par

Évaluation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour différentes variétés de blé dur cultivées dans la région de Sétif

l'évitement de l'inhibition de la germination et l'augmentation du nombre de plantes (Rui Guo et al., 2013; Khaeim et al., 2022) ce qui peut conduire à la mort si le stade d'émergence n'est pas atteint dans un certain laps de temps (Zheng et al., 2015). Il est intéressant de noter que notre étude a démontré un effet négatif du temps thermique (GDD) à l'émergence sur le NGM. Les mêmes auteurs ont déterminé l'expansion et l'augmentation de la surface foliaire au cours de la phase de levée jusqu'au stade GS25, ce qui permet d'interpréter les corrélations positives entre le temps thermique et le NGM. De plus, le SWC entre l'épiaison et la floraison a eu un effet positif sur le NGM, représentant le pic de la consommation d'eau, ce qui est conforme à Jin et al., (2017) et El-Hashash et al., (2022). Les effets négatifs de la somme des jours nécessaires pour atteindre la maturité et de l'accumulation de température jusqu'à la maturité pourraient être clarifiés par l'effet de la température sur le nombre de grains (Ugarte et al., 2007). De plus, l'effet positif de ces paramètres sur le TGW a été illustré précédemment, en donnant aux plantes suffisamment de temps pour absorber tous les nutriments.

En ce qui concerne l'effet de l'eau entre le stade GS51 et le stade GS69 sur le TGW, il y a un effet positif en raison de la réduction des effets des températures élevées, comme discuté par Calderini et al., (1999), Calderini et al., (2006) and Ugarte et al., (2007), qui ont considéré que la haute température à cette période peut réduire le poids des grains..

5 Conclusion

Dans cette étude, nous avons fourni une caractérisation variétale du développement phénologique basée sur le temps thermique. Nous avons conclu que le couplage des degrés-jours avec le QE permet de déterminer différents stades de croissance, contrairement à l'utilisation du temps journalier. Cependant, pour prédire le moment de la floraison, des paramètres génétiques plus spécifiques tels que la photopériode et la sensibilité à la vernalisation sont nécessaires. Nous avons constaté que les phases phénologiques et le QE de chaque stade sont influencés différemment dans la WUE, mais que la quantité totale d'eau disponible au cours de la saison de croissance est négligée.

Une corrélation significativement élevée a été observée entre le WUE et le rendement REND. En revanche, les STI ont montré une corrélation négative avec le REND, avec une préférence pour les variétés locales par rapport à d'autres. Ces facteurs génétiques, améliorables dans les programmes de sélection, peuvent également être influencés par la gestion de l'irrigation.

Pour maximiser le rendement, il est crucial de gérer efficacement la QE pendant les périodes allant du semis à la levée et de l'épiaison à la floraison, en plus de prendre en compte les

Évaluation de l'efficience de l'utilisation de l'eau pour différentes variétés de blé dur cultivées dans la région de Sétif

composants traditionnels du rendement. Du point de vue de la sélection variétale, les variétés précoces offrent un avantage en termes de rendement par rapport aux variétés tardives. En outre, il est préférable de semer plus tôt pour éviter les effets néfastes des températures élevées en raccourcissant les stades phénologiques et en exploitant l'effet positif de l'augmentation de la durée des stades phénologiques avec le temps quotidien.

**Chapitre 3 : Analyse de l'effet génétique et
environnemental sur l'efficacité d'utilisation de
l'azote en relation avec le rendement et le taux
de protéines chez différentes variétés de blé dur**

1 Introduction

Le blé dur, qui constitue l'aliment de base principal des populations méditerranéennes (Arregui & Quemada, 2008), est fortement affecté par la faible fertilité du sol, ce qui influe sur sa croissance, son développement et son rendement. Le problème de la carence en azote est souvent aigu dans de nombreuses régions où les sols ont généralement une faible teneur en matière organique (Silva et al., 2000). De plus, en raison des cultures continues sur de plus longues périodes (Crews & Peoples, 2004) et de l'anarchie dans l'utilisation de l'azote au fil des années (FAOSTAT, 2024b), l'état nutritionnel des sols algériens est généralement pauvre en azote.

Au cours des dernières décennies, la fertilisation azotée est devenue un outil essentiel pour augmenter le rendement et la qualité des cultures, en particulier pour les céréales, et pour garantir un rendement économique maximal (Hirel et al., 2001). Cependant, le coût énergétique de la synthèse des engrais azotés est très élevé (Smil, 2000), et la fertilisation azotée représente souvent le coût énergétique le plus élevé dans les systèmes de culture à base de céréales (Crews & Peoples, 2004). De plus, en raison de sa grande mobilité dans le système sol-plante-atmosphère, l'azote contribue grandement à la pollution agricole par lessivage, volatilisation et dénitrification (Drinkwater et al., 1998; Limaux et al., 1999). En effet, il a été estimé que souvent 50 % ou moins de l'azote fertilisant appliqué au sol est récupéré par les céréales et que ce pourcentage diminue à mesure que le taux d'engrais azoté augmente (FOULKES et al., 1998; Raun & Johnson, 1999b; Blankenau et al., 2002). Le développement de systèmes de culture et de pratiques de gestion qui améliorent la capacité des cultures à absorber l'azote pourrait minimiser le potentiel de pertes d'azote. L'utilisation efficace de l'azote, également appelée efficacité d'utilisation d'azote (NUE) dans la production de cultures, est devenue un objectif agronomique, économique et environnemental souhaitable (Gouis et al., 2000).

L'efficacité d'utilisation de l'azote est généralement définie comme le rendement en grain produit par unité d'azote disponible dans le sol et les engrais (Moll et al., 1981) ; elle est le produit de deux facteurs physiologiques : (i) l'efficacité d'absorption de l'azote (NUE_p), définie comme la quantité d'azote absorbée par la culture par unité d'azote disponible pour la culture, et (ii) l'efficacité d'utilisation de l'azote (NUE_e), définie comme le rendement en grain par unité d'azote absorbée par la culture.

En ce qui concerne les pratiques de gestion, le choix de la variété végétale est particulièrement important. En effet, plusieurs études ont montré que de nombreuses espèces végétales présentent une variabilité génétique pour l'efficacité d'utilisation de l'azote (Fageria et al.,

2008) et que l'utilisation de la variété la mieux adaptée peut contribuer à améliorer l'efficacité de la manière dont les cultures céréalières acquièrent et utilisent l'azote du sol ou l'azote des engrais. FOULKES et al., (1998) ont constaté que les variétés de blé modernes étaient moins efficaces pour récupérer l'azote du sol que les variétés plus anciennes, ce qui suggère que les anciennes variétés peuvent être le meilleur choix pour les systèmes de culture à faible apport. En revanche, d'autres chercheurs (Gouis et al., 2000; Brancourt-Hulmel et al., 2003a; Guarda et al., 2004) ont constaté que NUpE et NUE avaient augmenté avec l'introduction de variétés améliorées, et que les variétés modernes donnaient les meilleurs résultats même en cas de disponibilité limitée en azote. Sylvester-Bradley & Kindred, (2009) affirment que l'amélioration de la sélection du blé a considérablement augmenté le rendement en grain et que cette amélioration a été associée à une augmentation du taux optimal d'azote ; l'augmentation de l'utilisation d'engrais azotés a compensé l'amélioration du rendement en grain, entraînant une efficacité statique de l'azote aux niveaux optimaux. Les variétés adaptées aux systèmes à faible niveau d'azote devraient combiner une efficacité d'utilisation élevée de l'azote. À cette fin, il est également nécessaire de prendre en compte le fait que l'application d'azote peut affecter significativement les interactions compétitives entre la culture et les mauvaises herbes, et que l'application d'azote augmente souvent la compétitivité des mauvaises herbes plus que celle de la culture (K. V. Dhima & Eleftherohorinos, 2001; K. Dhima & Eleftherohorinos, 2005; BLACKSHAW, 2004; Blackshaw, 2005).

Par conséquent, le développement de variétés de cultures adaptées aux systèmes à faible apport ou biologiques (c'est-à-dire, des variétés avec une efficacité élevée d'utilisation de l'azote même lorsque le taux d'azote dans le sol est faible) nécessite des connaissances sur la manière dont différentes variétés répondent à la fertilisation azotée. Cette étude a évalué les variations de l'efficacité de l'utilisation de l'azote et de ses composants parmi cinq géotypes de blé dur qui diffèrent en termes d'habitude de croissance des plantes, de potentiel de rendement en grain et d'adaptabilité aux environnements stressants.

2 Matériels et méthodes

2.1 Objectif de travail

Le travail réalisé a pour objectif le choix variétal, par l'étude de l'efficacité d'utilisation de l'azote. Les essais expérimentaux ont été réalisés au cours des saisons 2021-2022 et 2022-2023, sous deux systèmes de gestion de la disponibilité d'eau (pluvial-irrigation supplémentaire) au niveau de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Sétif.

2.2 Protocole expérimental :

2.2.1 Matériel végétale :

Dans cette étude, nous avons utilisé cinq variétés de blé dur, à la fois locales et améliorées (MBB, Bousselem, Oued El Bared, Vitron, Simito), cultivées dans les zones semi-arides et très appréciées par les agriculteurs. Les semences ont été fournies par l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC), qui est le seul obtenteur de semences céréalières en Algérie. Les noms, les croisements et l'origine des variétés sont donnés dans le tableau 8.

Table 8. Caractéristiques des variétés de blé dur étudiées

Nom	Croisement	Origine
MBB*	Sélection locale	INRA Algérie
Bousselem	Heider/Martes/Huevos de Oro. ICD-414	CIMMYT-ICARDA
Oued El Bared	GTA DUR/ OFANTO-DZ-ITGC-SET-008-2004/2005/1S-3S-0S	Algérie
Vitron	Turkey77/3/Jori/Anhinga//Flamingo	CIMMYT
Simito	Capeiti8/Valvona	Italie

* Mohamed Ben Bachir

2.2.2 Les équipements scientifiques et les différents matériels utilisés dans les différentes analyses

Le tableau renferme les différents matériels utilisés, dans les analyses de notre étude.

Table 9. les équipements scientifiques utilisé dans l'analyse de l'azote totale

Le matériel utilisé

Étuve
Balance
Minéralisateur
Distillateur
Agitateur
Burette

2.2.3 Dispositif mis en place

L'expérimentation a été installée au niveau de l'Institut technique algérien des cultures de champ (ITGC) dans la zone semi-aride de Sétif pendant la saison 2021/2022 et 2022/2023 cinq variétés

Analyse de l'effet génétique et environnemental sur l'efficacité d'utilisation de l'azote en relation avec le rendement et le taux de protéines chez différentes variétés de blé dur

de blé dur (Oued ElBared, Boussellam, Mohamed Ben Bachir (MBB), Simito et Vitron ont été semés à une densité de plantation de 350 grains.m⁻² à l'aide d'un semoir en ligne des expérimentations d'une largeur de 1.2 m.

Dans deux dispositifs expérimentaux, l'un sous pluviale et l'autre irrigué ; les deux dispositifs sont similaires et factoriels sur la conception de blocs complets randomisés (RCBD) divisée en quatre blocs. Chaque bloc est ensuite subdivisé en cinq parcelles élémentaires, chacune représentant un traitement différent du facteur étudié. Chaque parcelle élémentaire a une superficie de 6 mètres carrés.

L'engrais azoté à utiliser est l'urée, qui contient 46 % d'azote. La dose totale recommandée est de 120 unités d'azote par hectare (UN/ha), fractionnée en deux apports:

Un apport de 1/2 dans le stade débuts tallage.

Un apport de 1/2 dans le stade épis 1cm.

Le choix de la quantité d'apport d'azoté basée sur la recherche qui est établi par (Boulelouah et al., 2022) pour objectif de déterminer la meilleur dose d'azote apportée pour la variété Bousselem dans la même région pour atteindre le maximum efficacité d'utilisation d'azote. La quantité d'azote disponible dans les profils du sol a été mentionnée dans le tableau 10.

Table 10. Quantité d'azote disponible dans le sol avant le semi

Profil	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80
Azote totale %	0.25	0.29	0.31	0.33

2.2.4 Récolte

La récolte des échantillons se fait à l'aide d'une moissonneuse batteuse des expériences de toutes la parcelle. La récolte de chaque parcelle élémentaire sont placés dans des sachets étiquetés, puis transportés au laboratoire pour être conditionnés et analysés.

2.2.5 Paramètres agro-physiologiques mesurés pour les grains et la paille

2.2.5.1 paramètres agronomiques

2.2.5.1.1 Rendement en grains

La récolte de chaque parcelle élémentaire est mise dans des sachets étiquetés sont pesée pour déterminer le rendement par la formule suivante :

$$\text{Rendement (Qx/ha)} = \frac{\text{poids des grains/6m}^2(\text{g})}{1.67} \dots\dots\dots \text{Equation (9)}$$

2.2.5.1.2 Poids de la paille/ha

Le poids de la paille est évalué en pesant la paille récoltée sur une surface de 6 mètres carrés pour chaque échantillon. Ensuite, le poids de la paille par hectare est calculé en utilisant la formule suivante :

$$\text{Poids de la paille (Qx/ha)} = \frac{\text{poids de la paille/6m}^2(\text{g})}{1.67} \dots\dots\dots \text{Equation (10)}$$

2.2.5.1.3 Efficacité agronomique d'utilisation d'azote

L'efficacité agronomique d'utilisation d'azote (NUE_A) est obtenue par la formule suivante :

$$\text{NUEA (kg grains/kgN)} = \frac{\text{RMSG de la parcelle}}{\text{quantité d'azote apporté+azote dans le sol}} \text{Equation (11)}$$

2.2.5.2 Paramètres physiologiques

Le dosage de l'azote dans la plante (grains et paille) a été réalisé en utilisant la méthode Kjeldahl, conformément à la norme(ISO 5983-2, 2009).

2.2.5.2.1 Teneur en protéines

La teneur en protéines des grains est calculée en utilisant la formule suivante :

$$\text{Protéines (\%)} = \text{teneur en N dans les grains} \times 5.7 \dots\dots\dots \text{Equation (12)}$$

2.2.5.2.2 Efficacité agro-physiologique d'utilisation d'azote

L'efficacité agro-physiologique d'utilisation d'azote (NUE_{AP}) est calculée en utilisant la formule suivante :

$$\text{NUEAP} = \frac{\text{RMSG de la parcelle}}{\text{QNT absorbé par la plante dans la parcelle}} \dots\dots\dots \text{Equation (13)}$$

2.2.5.2.3 Coefficient apparent d'utilisation de l'azote

Le coefficient apparent d'utilisation d'azote (CAU) est calculé en utilisant la formule suivante :

$$CAU = \frac{QNT \text{ absorbé par la plante de la parcelle}}{Quantité d'azote apportée} \dots\dots\dots \text{Equation (14)}$$

2.3 Analyse statistique

Les données regroupées de tous les paramètres pour les trois essais ont été soumises à une ANOVA deux facteurs et extraites des graphiques moyens en utilisant le paquet Rcmdr dans R Software version 4.2.2 pour définir la différence de trait entre les facteurs. RStudio a été utilisé à la fois pour le coefficient de corrélation de Pearson et l'analyse stepwise afin de déterminer la relation entre les traits et de choisir les composants des modèles, également Les paquets “lavaan” et “semPlot” ont été utilisés pour obtenir l'analyse du coefficient de piste causale afin de déterminer l'effet direct et indirect caché sous une régression linéaire multiple (Cramer et al., 1999; Khare, 2022).

3 Résultats

3.1 Indicateurs :

3.1.1 Taux de protéine :

C'est le critère le plus importants pour le blé dur, la comparaison entre les différentes variétés dans différents milieu donne une différence entre les variétés (P-value<0.0001) et entre les essais avec un p-value moins de 0.1% (Tableau 11).

Les valeurs les plus élevées sont enregistrées pour la variété Oued ElBared dans l'essai pluvial de la première année et pour MBB dans l'essai irrigué de la saison 2021-2022, atteignant une valeur de 15%. Les valeurs les plus faibles sont enregistrées pour la variété Bousselem dans les conditions pluviales de la première année et irriguées dans la saison 2022-2023, avec une valeur de 10%.

Table 11. Analyse d'ANOVA deux facteur sur le taux de protéine%

Essais	Variétés					P-value essai
	bousselem	MBB	Oued elbared	SIMITO	Vitron	
S1	13.13189	15.46205	13.2085	14.364	13.61069	<0.0001
S2	10.34208	13.77029	15.58973	14.0448	13.77667	
S3	10.43784	11.4912	11.93808	10.78896	13.27234	

Analyse de l'effet génétique et environnemental sur l'efficacité d'utilisation de l'azote en relation avec le rendement et le taux de protéines chez différentes variétés de blé dur

P-value variétés	<0.0001	<0.0001
------------------	---------	---------

3.1.1.1 L'efficacité de l'utilisation d'azote agronomique

La comparaison entre les différentes variétés et conditions par le test ANOVA à deux facteurs a indiqué une différence très hautement significative entre les variétés ($p < 0,1 \%$) et entre les différents essais ($p\text{-value} < 0,0001$). Le même seuil d'acceptation est observé pour l'étude de l'interaction variété^essai.

Table 12. Analyse d'ANOVA deux facteur sur l'efficacité d'utilisation d'azote agronomique

Essais	Variétés					P-value essai
	bousselem	MBB	Oued elbared	SIMITO	Vitron	
S1	53.77119	39.25109	50.7759	52.5595	46.1003	<0.0001
S2	21.38852	18.79506	23.97885	30.6909	28.3821	
S3	30.63333	20.2	32.68333	26.8667	27.9333	
P-value variétés	<0.0001					<0.0001

3.1.1.2 L'efficacité de l'utilisation d'azote agro-physiologique

Ce paramètre étudié vise à déterminer la capacité de transformation de l'azote absorbé en matière sèche des grains. La comparaison effectuée entre les différentes variétés dans différents systèmes d'irrigation, avec l'analyse de la variance à deux facteurs, montre qu'il y a une différence très hautement significative ($p\text{-value} < 0,0001$) entre les différentes variétés dans les différents essais.

Table 13. Analyse d'ANOVA deux facteur sur l'efficacité d'utilisation d'azote agro-physiologique

Essais	Variétés					P-value essai
	bousselem	MBB	Oued elbared	SIMITO	Vitron	
S1	39.7194	69.8086	41.02508	38.2492	39.7631	<0.0001
S2	49.37763	18.47949	33.50043	37.3005	34.7316	
S3	52.62147	46.33301	46.08969	50.3047	40.9904	
P-value variétés	<0.0001					<0.0001

3.1.1.3 L'efficacité d'absorption de l'azote

Ce paramètre représente la quantité totale d'azote disponible dans la plante (grains + paille).

L'analyse d'ANOVA à deux facteurs montre qu'il y a une différence très hautement significative entre les variétés, les essais et l'interaction entre les variétés et les conditions environnementales, avec de faibles valeurs d'absorption enregistrées pour la variété

Analyse de l'effet génétique et environnemental sur l'efficacité d'utilisation de l'azote en relation avec le rendement et le taux de protéines chez différentes variétés de blé dur

Bousselem lors de la première saison sous pluie (65.81 kgN/ha) et pour la variété Simito sous irrigation lors de la deuxième année avec une valeur de 80 kgN/ha. Pour la variété MBB, les valeurs les plus faibles sont enregistrées sous irrigation dans les deux saisons d'expérimentation, avec des valeurs variantes entre 65 et 85 kgN/ha.

Table 14. Analyse d'ANOVA deux facteurs sur l'efficacité d'absorption d'azote

Essais	Variétés					P-value essai
	bousselem	MBB	Oued elbared	SIMITO	Vitron	
S1	204.08288	85.41446	186.218	206.529	174.653	<0.0001
S2	65.81331	153.92069	107.8452	124.921	124.59	
S3	87.82312	65.48416	106.5973	80.2456	102.313	
P-value variétés			<0.0001			<0.0001

3.1.1.4 Coefficient apparent d'utilisation d'azote

Ce paramètre vise à déterminer la capacité de la plante à absorber l'azote disponible dans le sol. L'analyse d'ANOVA a montré une différence significative entre les variétés et les conditions (p-value < 0,0001), avec une différence très hautement significative pour l'interaction Variété^Essai (p-value < 0,0001).

Table 15. Analyse d'ANOVA deux facteurs sur le coefficient apparent d'utilisation d'azote

Essais	Variétés					P-value essai
	bousselem	MBB	Oued elbared	SIMITO	Vitron	
S1	1.360553	0.56943	1.241453	1.376858	1.164353	<0.0001
S2	0.438755	1.026138	0.718968	0.832806	0.830598	
S3	0.585488	0.436561	0.710649	0.534971	0.682086	
P-value variétés			<0.0001			<0.0001

3.2 Description des modèles de prédiction de l'efficacité de l'utilisation d'azote, ses indicateurs, le taux en protéines et l'indice de récolte

3.2.1 Pour la variété Mohamed ben Bachir (MBB)

À travers l'analyse stepwise pour l'élaboration des modèles empiriques pour chaque indicateur de l'efficacité d'utilisation de l'azote, l'indice de récolte et le taux de protéine, on a constaté que tous les indicateurs de NUE sont reliés à l'état de l'eau dans le sol dans une période

Analyse de l'effet génétique et environnemental sur l'efficacité d'utilisation de l'azote en relation avec le rendement et le taux de protéines chez différentes variétés de blé dur

spécifique. L'efficacité d'absorption, la NUE agro-physiologique et le coefficient apparent de l'utilisation de l'azote sont déterminés à partir de la quantité d'eau disponible dans la période semi-levée (GS25-GS39) et épiaison-floraison, avec des coefficients de détermination de plus de 90%. Pour la NUE, l'analyse a montré qu'elle peut prédire la NUE à partir de la quantité d'eau disponible dans la période semi-levée avec une erreur de 10%. En ce qui concerne l'indice de récolte, le modèle de sortie par l'analyse n'est pas significatif, avec une erreur de 5%. Concernant le taux de protéines, l'analyse stepwise montre que la quantité d'eau disponible dans la phase GS39-épiaison peut expliquer 99% de la variation du taux de protéines.

Table 16. Modèles de prédiction des indicateurs de l'efficacité d'utilisation d'azote, le taux de protéine et l'indice de récolte

	Paramètres	Modèles	R2
MBB	Nup	$Y = -12.30 * QE1 + 5.01 * QE3 + 1.78 * QE5$	0.92
	NUE	$Y = 1.58 * QE1$	0.9
	Protéine	$Y = 0.1 * QE4 + 11.38$	0.99
	NUEp	$Y = 16.05 * QE1 - 14.64 * QE3 - 2.51 * QE5 + 467.69$	0.97
	CAU	$Y = -0.08 * QE1 + 0.03 * QE3 + 0.01 * QE5$	0.93
	GHI	n.s	/

Nup ; N absorbé. NUE ; efficacité d'utilisation d'azote agronomique. NUE_P ; efficacité d'utilisation d'azote agro-physiologique. CAU ; coefficient apparent d'utilisation d'azote, GHI ; indice de récolte, QE1 ; quantité d'eau disponible GS0-GS12, QE3 ; quantité d'eau disponible GS25-GS39. QE4 ; quantité d'eau disponible GS39-GS51 ; QE5 ; quantité d'eau disponible GS51-GS69

3.2.2 Pour la variété Bousselem

Après l'analyse stepwise pour la variété Bousselem, on a constaté que tous les indicateurs de NUE sont reliés à l'état de l'eau dans le sol dans une période spécifique. L'efficacité d'absorption et le coefficient apparent de l'utilisation de l'azote sont déterminés à partir de la quantité d'eau disponible dans toute la période de développement, sauf la période GS25-GS39, avec un coefficient de détermination de 0,98. Pour la NUE, l'analyse a montré qu'elle peut prédire la NUE à partir de la quantité d'eau disponible dans la période GS39-épiaison et la période de remplissage des grains, avec un coefficient de détermination de 0,98. Pour la NUEap

Analyse de l'effet génétique et environnemental sur l'efficacité d'utilisation de l'azote en relation avec le rendement et le taux de protéines chez différentes variétés de blé dur

et le taux de protéine, les modèles de sortie par l'analyse ne sont pas significatifs, avec un seuil d'erreur de 5%. Concernant l'indice de récolte, l'analyse stepwise montre que la quantité d'eau disponible dans la phase semi-levée et GS39-épiaison, avec le nombre de jours de cette dernière période, peut expliquer 80% de la variation dans l'indice de récolte.

Table 17. Modèles de prédiction des indicateurs de l'efficacité d'utilisation d'azote, le taux de protéine et l'indice de récolte

	Paramètres	Modèles	R2
		$y = -258.98 * QE1 - 1276.77 * QE2 + 231.44 * QE4 -$	
	Nup	$44.8 * QE5 + 296.64 * QE6 + 2119.72$	0.98
	NUE	$y = 0.57 * QE4 + 0.34 * QE6 - 55.7$	0.98
Bousselem	Protéine	n.s	/
	NUE _p	n.s	/
	CAU	$y = -1.73 * QE1 - 8.51 * QE2 + 1.54 * QE4 - 0.3 * QE5 + 1.98 * QE6$	0.98
	GHI	$y = 2.14 * QE1 - 1.43 * QE4 + 3.08 * DAS4$	0.8

Nup ; N absorbé. NUE ; efficacité d'utilisation d'azote agronomique. NUE_p; efficacité d'utilisation d'azote agro-physiologique. CAU ; coefficient apparent d'utilisation d'azote, GHI ; indice de récolte, QE1 ; quantité d'eau disponible GS0-GS12, QE2 ; quantité d'eau disponible GS12-GS25. QE3 ; quantité d'eau disponible GS25-GS39. QE4 ; quantité d'eau disponible GS39-GS51 ; QE5 ; quantité d'eau disponible GS51-GS69. QE6 ; quantité d'eau disponible dans le remplissage des grains. DAS4 ; nombre du jours entre GS39-GS51.

3.2.3 Pour la variété Oued ElBared

À travers l'analyse stepwise (tableau 18) pour l'élaboration des modèles empiriques pour chaque indicateur de l'efficacité d'utilisation de l'azote, l'indice de récolte et le taux de protéine, on a constaté que l'efficacité d'absorption et le coefficient apparent de l'utilisation de l'azote sont déterminés à partir de la quantité d'eau disponible dans les périodes semi-levée, levée-GS25 et la période de remplissage des grains, avec un coefficient de détermination de

Analyse de l'effet génétique et environnemental sur l'efficacité d'utilisation de l'azote en relation avec le rendement et le taux de protéines chez différentes variétés de blé dur

0,96. Pour la NUE, l'analyse a montré qu'elle peut prédire la NUE à partir de la quantité d'eau disponible dans la période semi-levée et levée-GS25 avec une erreur de 2%. Pour le NUE_p, le taux de protéine et l'indice de récolte, les modèles élaborés par l'analyse ne sont pas significatifs, avec une erreur de 5%.

Table 18. Modèles de prédiction des indicateurs de l'efficacité d'utilisation d'azote, le taux de protéine et l'indice de récolte

	Paramètres	Modèles	R ²
Oued ElBared	Nuptake	$Y = -30.95 * QE1 + 91.48 * QE2 - 15.32 * QE6 - 1394.3$	0.96
	NUE	$Y = 0.98 * QE1 + 0.82 * QE2 - 14.86$	0.98
	Protéine	n.s	/
	NUE _p	n.s	/
	CAU	$Y = -0.21 * QE1 + 0.61 * QE2 - 0.1 * QE6 - 9.3$	0.96
	GHI	n.s	/

Nup ; N absorbé. **NUE** ; efficacité d'utilisation d'azote agronomique. **NUE_p** ; efficacité d'utilisation d'azote agro-physiologique. **CAU** ; coefficient apparent d'utilisation d'azote, **GHI** ; indice de récolte, **QE1** ; quantité d'eau disponible GS0-GS12, **QE2** ; quantité d'eau disponible GS12-GS25. **QE6** ; quantité d'eau disponible dans le remplissage des grains.

3.2.4 Pour la variété Simito

Après l'analyse stepwise pour la variété Simito, on a constaté que tous les indicateurs de NUE sont reliés à l'état de l'eau dans le sol et au temps journalier d'une période spécifique ; l'efficacité d'absorption et le coefficient apparent de l'utilisation de l'azote sont déterminés à partir de la quantité d'eau disponible dans la période semi-levée, GS39-épaison et épaison-floraison, ainsi que le nombre de jours dans la phase GS39-épaison et épaison-floraison, avec un coefficient de détermination de 0,97. Pour la NUE, l'analyse a montré qu'elle peut prédire la NUE à partir de la quantité d'eau disponible dans la période semi-levée et le nombre de jours

Analyse de l'effet génétique et environnemental sur l'efficacité d'utilisation de l'azote en relation avec le rendement et le taux de protéines chez différentes variétés de blé dur

dans la phase GS39-épiaison et épiaison-floraison, avec un coefficient de détermination égal à 0,99. Pour le NUE_{ap}, le modèle élaboré par l'analyse n'est pas significatif, avec un seuil d'erreur de 5%. De plus, on a constaté que la longueur de la période épiaison-floraison a un effet néfaste sur le taux de protéine. Concernant l'indice de récolte, l'analyse stepwise montre que la quantité d'eau disponible dans la phase de remplissage des grains peut expliquer 39 % de la variation dans l'indice de récolte.

Table 19. Modèles de prédiction des indicateurs de l'efficacité d'utilisation d'azote, le taux de protéine et l'indice de récolte

	Paramètres	Modèles	R ²
Simito		$Y=142.89*QE1-86.88*QE4+30.77*QE5+15.30*DAS4-$	
	Nuptake	$44.96*DAS5+3686.24$	0.97
	NUE	$Y=13.67*QE1+1.74*DAS4-3.97*DAS5$	0.99
	Protéine	$Y=-2.77*DAS5+225.21$	0.88
	NUE _p	n.s	/
		$Y=0.95*QE1-0.58*QE4+0.21*QE5+0.1*DAS4-$	
	CAU	$0.3*DAS5+24.57$	0.97
	GHI	$Y=0.23*QE6+47.23$	0.39

Nup ; N absorbé. NUE ; efficacité d'utilisation d'azote agronomique. NUE_P; efficacité d'utilisation d'azote agro-physiologique. CAU ; coefficient apparent d'utilisation d'azote, GHI ; indice de récolte, QE1 ; quantité d'eau disponible GS0-GS12. QE4 ; quantité d'eau disponible GS39-GS51 ; QE5 ; quantité d'eau disponible GS51-GS69. QE6 ; quantité d'eau disponible dans le remplissage des grains. DAS4 ; nombre du jours entre GS39-GS51. DAS5 ; nombre du jours entre GS51-GS69.

3.2.5 Pour la variété Vitron

À partir de l'analyse stepwise pour la variété Vitron, on a constaté que tous les indicateurs de NUE sont reliés soit à l'état de l'eau dans le sol soit à la longueur d'une période. L'efficacité d'absorption est déterminée par la quantité d'eau disponible dans la période levée-GS25 et la période de remplissage des grains, avec la longueur de la période épiaison-floraison. Pour la

Analyse de l'effet génétique et environnemental sur l'efficacité d'utilisation de l'azote en relation avec le rendement et le taux de protéines chez différentes variétés de blé dur

NUE, la disponibilité d'eau dans la période levée-GS25 et la période post-floraison, sans les facteurs qui déterminent 96 % de la variation du NUE. Concernant le NUEap, l'analyse stepwise montre que le modèle exprimé par le nombre de jours de la période épiaison-floraison explique 51 % de la variation du NUEap. Pour le coefficient apparent de l'utilisation d'azote, il est déterminé à partir de la quantité d'eau disponible dans toute la période levée-GS25 et GS39-épiaison, avec un coefficient de détermination de 0,96. Pour le taux de protéine, le modèle élaboré par l'analyse n'est pas significatif, avec un seuil d'erreur de 5 %. Concernant l'indice de récolte, l'analyse stepwise montre que la quantité d'eau disponible dans la phase levée-GS25 peut expliquer 29 % de la variation dans l'indice de récolte.

Table 20. Modèles de prédiction des indicateurs de l'efficacité d'utilisation d'azote, le taux de protéine et l'indice de récolte

	Paramètres	Modèles	R2
Vitron	Nuptake	$Y=10.58*QE2-1.62*QE6+2.9*DAS5-467.64$	0.9
	NUE	$Y=3.5*QE2-0.54*QE6-63.13$	0.96
	Protéine	n.s	/
	NUEp	$Y=0.63*DAS5+116.67$	0.51
	CAU	$Y=0.05*QE2+0.01*QE4-2.12$	0.96
	GHI	$Y=1.46*QE2$	0.29

Nup ; N absorbé. **NUE** ; efficacité d'utilisation d'azote agronomique. **NUEp** ; efficacité d'utilisation d'azote agro-physiologique. **CAU** ; coefficient apparent d'utilisation d'azote, **GHI** ; indice de récolte, **QE2** ; quantité d'eau disponible GS12-GS25. **QE4** ; quantité d'eau disponible GS39-GS51 ; **QE6** ; quantité d'eau disponible dans le remplissage des grains. **DAS5** ; nombre du jours entre GS51-GS69.

3.3 Les corrélations entre l'efficacité de l'utilisation d'azote, ses indicateurs, le rendement en grains, le taux en protéines et l'indice de récolte

3.3.1 Matrice générale :

Les corrélations entre les différentes variables étudiées pour toutes les variétés sont indiquées dans la matrice (figure 11).

D'après la matrice, le lien entre le CAU et le NUEAP montre une corrélation négative de (-0,52). Pour le lien entre le CAU et le NUEA, on observe que la capacité d'absorption d'azote augmente l'efficacité d'utilisation d'azote avec une corrélation élevée de (0,77), et la même

Analyse de l'effet génétique et environnemental sur l'efficacité d'utilisation de l'azote en relation avec le rendement et le taux de protéines chez différentes variétés de blé dur

valeur est observée avec le rendement. En ce qui concerne le lien entre le CAU et le WUE, une corrélation de 0,76 exprime la capacité du WUE à augmenter la capacité d'absorption d'azote. Pour l'efficacité d'utilisation d'azote agronomique (NUEA), on observe une très forte corrélation avec le WUE (0,95) et un lien parfait égal à 1 avec le rendement, ce qui souligne l'importance d'augmenter le NUE.

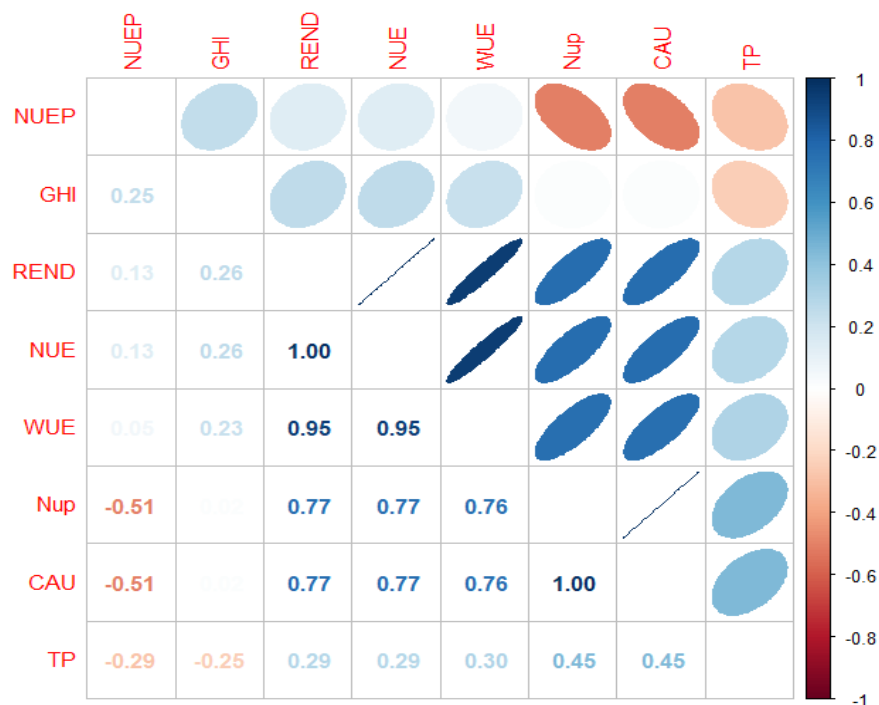


Figure 11. Matrice de corrélation entre les paramètres étudiés pour toutes les variétés

3.3.2 Les matrices partielles

Dans cette partie, nous avons décomposé la matrice générale en matrices représentant les liens pour chaque variété, afin de mieux comprendre la réaction de chaque variété.

3.3.2.1 Pour la variété Mohamed ben Bachir (MBB)

D'après la matrice, un lien de corrélation négative élevée de (-0.75) a été enregistré entre le CAU et le NUeP. Pour le lien entre le CAU et le NUEA, on trouve une corrélation négative non significative avec l'efficacité d'utilisation de l'azote (-0.31), et la même valeur est observée avec le rendement. En ce qui concerne le lien entre le CAU et le WUE, une corrélation non significative de -0.1 a été enregistrée.

En ce qui concerne l'efficacité d'utilisation de l'azote agronomique (NUEA), on trouve une très forte corrélation avec le WUE (0.96) et un lien parfait égal à 1 avec le rendement, ce qui souligne l'importance d'augmenter le NUE. De plus, une corrélation élevée a été enregistrée

Analyse de l'effet génétique et environnemental sur l'efficacité d'utilisation de l'azote en relation avec le rendement et le taux de protéines chez différentes variétés de blé dur

entre le NUE et le taux de protéine, et une corrélation positive élevée (0.84) a été observée entre le NUEP et le rendement.

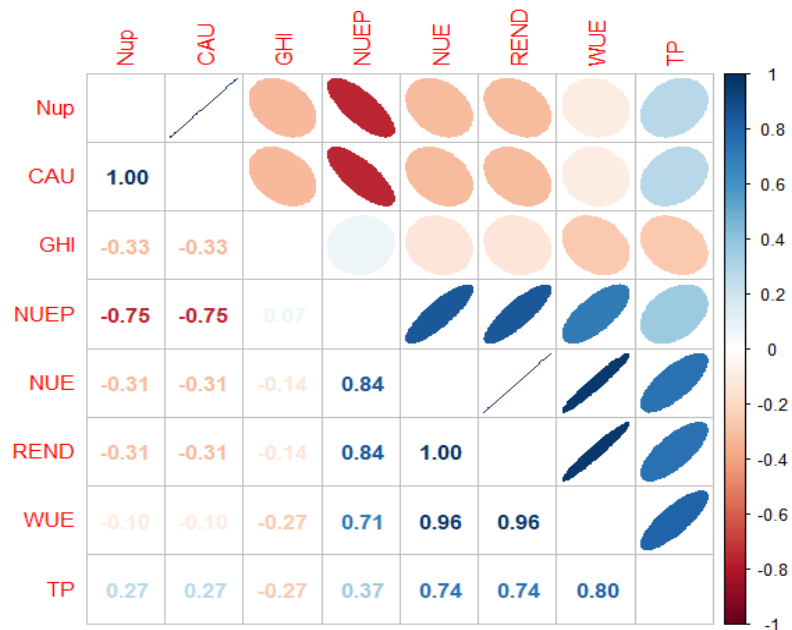


Figure 12. Matrice de corrélation entre les paramètres étudiés pour la variété MBB

3.3.2.2 Pour la variété Bousselem

D'après la matrice, on observe presque le même niveau de liaison que pour la variété MBB entre le CAU et le NUEP (0.79). Pour le lien entre le CAU et le NUEA, on constate un effet positif élevé de la capacité d'absorption d'azote sur l'efficacité d'utilisation de l'azote (0.98), et la même valeur est observée avec le rendement. En ce qui concerne le lien entre le CAU et le WUE, une corrélation de 0.96 a été enregistrée.

Pour l'efficacité d'utilisation d'azote agronomique (NUEA), on trouve une très forte corrélation avec le WUE (0.99) et un lien parfait égal à 1 avec le rendement. De plus, une corrélation élevée a été enregistrée entre le NUE et le taux de protéine (0.82), tandis que ce dernier présente une corrélation négative très élevée avec le NUEP.

Analyse de l'effet génétique et environnemental sur l'efficacité d'utilisation de l'azote en relation avec le rendement et le taux de protéines chez différentes variétés de blé dur

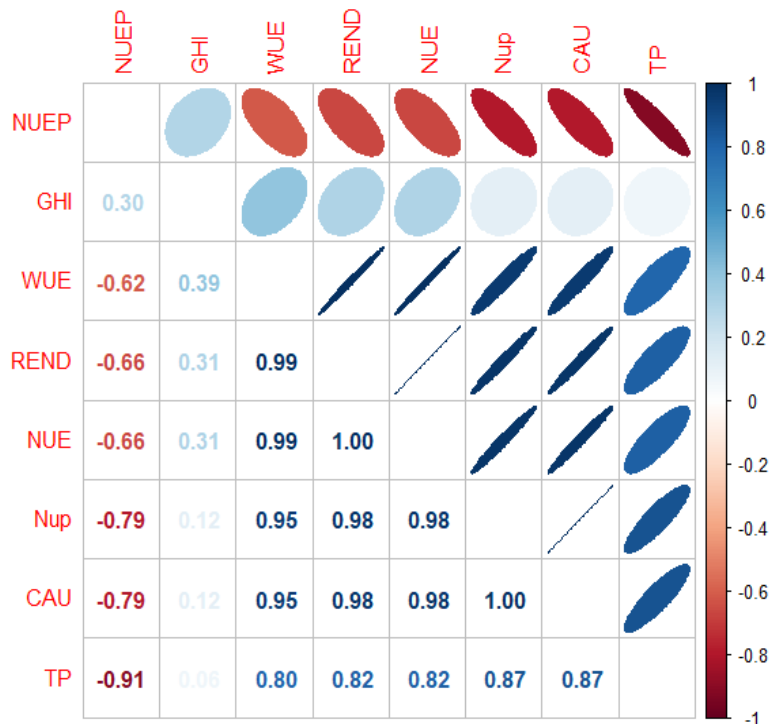


Figure 13. Matrice de corrélation entre les paramètres étudiés pour la variété Bousselem

3.3.2.3 Pour la variété Oued ElBared

D'après la matrice, aucun lien significatif n'a été enregistré entre le CAU et le NUEAP. Pour le lien entre le CAU et le NUEA, on constate un effet positif élevé de la capacité d'absorption d'azote sur l'efficacité d'utilisation de l'azote (0.92). Une corrélation similaire de 0.92 a été observée entre le CAU et le rendement. En ce qui concerne le lien entre le CAU et le WUE, une corrélation de 0.8 a été enregistrée.

Pour l'efficacité d'utilisation d'azote agronomique (NUEA), on trouve une très forte corrélation avec le WUE (0.96) et un lien parfait égal à 1 avec le rendement. De plus, une corrélation négative a été enregistrée entre le NUE et le taux de protéine (-0.44), de même qu'entre le taux de protéine et le rendement.

Analyse de l'effet génétique et environnemental sur l'efficacité d'utilisation de l'azote en relation avec le rendement et le taux de protéines chez différentes variétés de blé dur

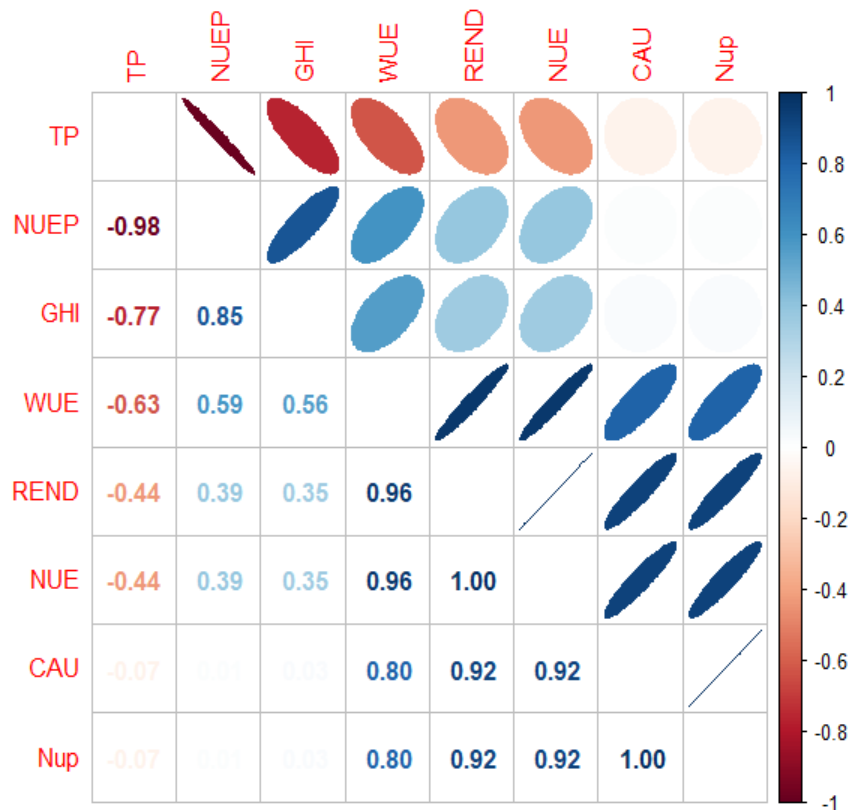


Figure 14. Matrice de corrélation entre les paramètres étudiés pour la variété Oued ElBared

3.3.2.4 Pour la variété Simito

A partir de la matrice, une corrélation négative de -0.73 a été enregistrée entre le CAU et le NUEAP. Pour le lien entre le CAU et le NUEA, on constate un effet positif élevé de la capacité d'absorption d'azote sur l'efficacité d'utilisation de l'azote (0.96). Une corrélation similaire de 0.96 a été observée entre le CAU et le rendement. En ce qui concerne le lien entre le CAU et le WUE, une corrélation de 0.98 a été enregistrée.

Pour l'efficacité d'utilisation d'azote agronomique (NUEA), on trouve une très forte corrélation avec le WUE (0.94) et un lien parfait égal à 1 avec le rendement. De plus, une corrélation positive a été enregistrée entre le NUE et le taux de protéine (0.64), de même qu'entre le taux de protéine et le rendement.

Analyse de l'effet génétique et environnemental sur l'efficacité d'utilisation de l'azote en relation avec le rendement et le taux de protéines chez différentes variétés de blé dur

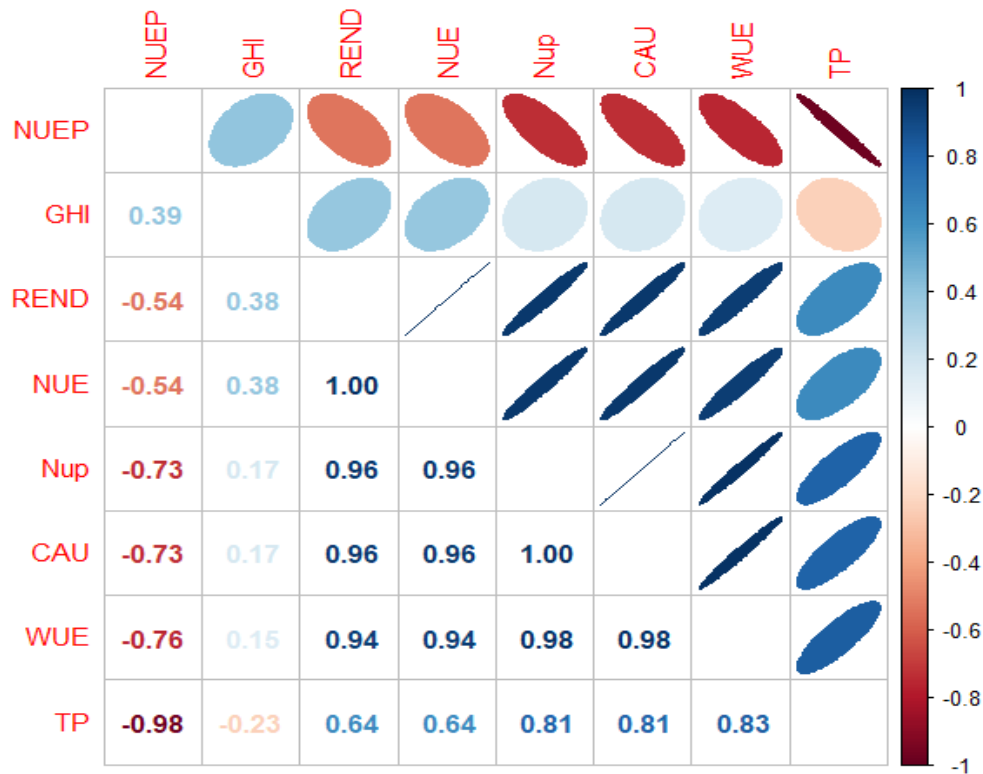


Figure 15. Matrice de corrélation entre les paramètres étudiés pour la variété Simito

3.3.2.5 Pour la variété Vitron

D'après la matrice de corrélation, un lien positif, allant de élevé à très élevé, a été enregistré pour le CAU avec le rendement, le NUE et le WUE, avec des valeurs de 0.95, 0.95 et 0.72 respectivement.

Concernant l'efficacité d'utilisation d'azote agronomique (NUEA), on trouve une très forte corrélation avec le WUE (0.87) et un lien parfait égal à 1 avec le rendement. De plus, une corrélation positive a été enregistrée entre le NUeP et le rapport entre le rendement en grains et la biomasse totale (0.92).

Analyse de l'effet génétique et environnemental sur l'efficacité d'utilisation de l'azote en relation avec le rendement et le taux de protéines chez différentes variétés de blé dur

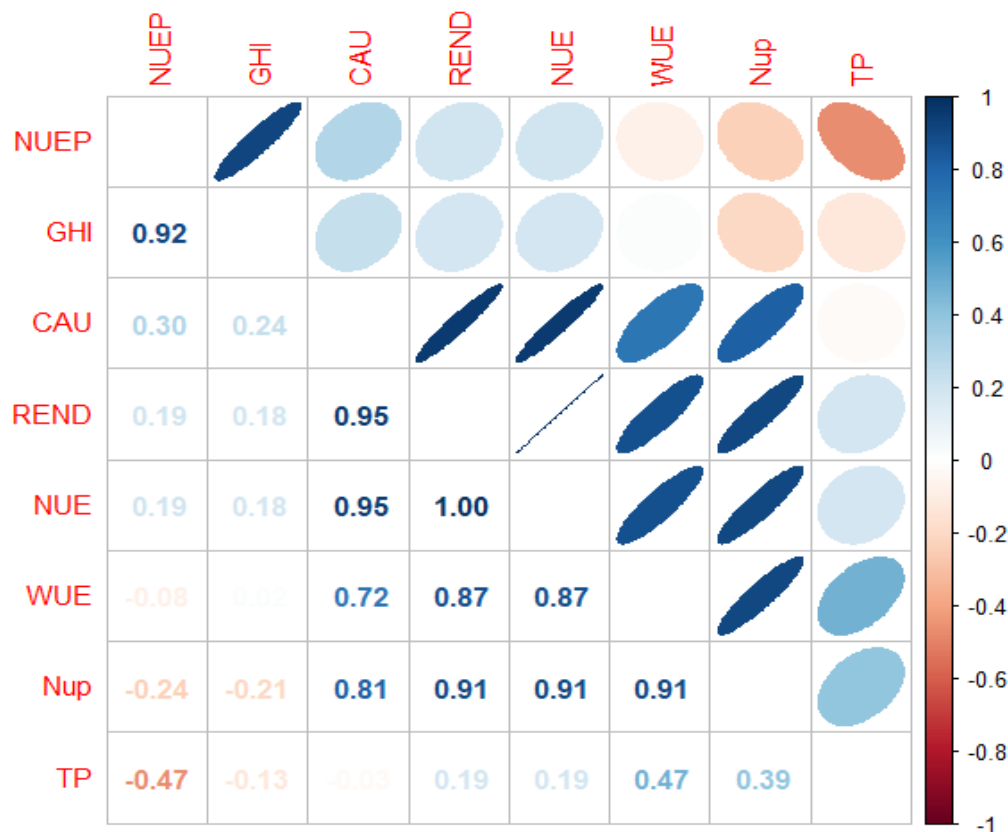


Figure 16. Matrice de corrélation entre les paramètres étudiés pour la variété Vitron

3.4 L'effet direct et indirect d'efficacité d'utilisation d'azote, ses indicateurs et le taux de protéines sur le rendement

L'ensemble des résultats de corrélation a été soumis à une analyse de piste causale afin de déceler l'effet direct et indirect de chacune des variables sur le rendement en grains.

L'analyse du coefficient de piste causale révèle que seule l'efficacité d'utilisation d'azote agronomique a un effet direct égal à 1 sur le rendement.

Pour l'efficacité d'utilisation de l'eau et le rendement, la corrélation mentionnée dans la matrice est expliquée par des effets indirects de WUE via la quantité de l'azote absorbé (0.76) et via l'augmentation de NUE (0.95).

Concernant la quantité d'azote disponible dans la plante, un effet indirect sur le rendement via NUE a été enregistré (0.77).

Pour les autres paramètres, tels que le taux de protéine, le NUeP et le GHI, aucun effet direct sur le rendement n'a été observé, et même les effets indirects via les autres paramètres sont négligeables.

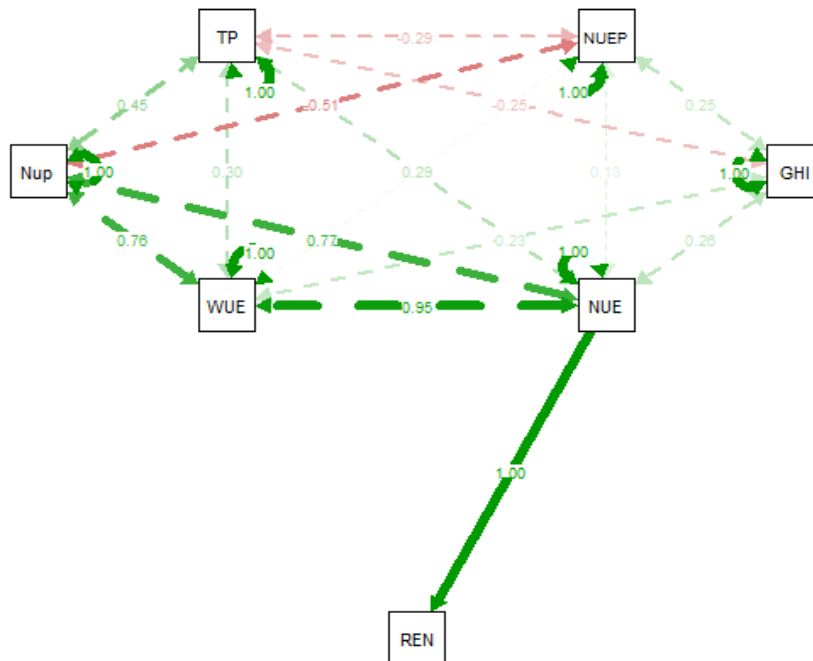


Figure 17. Analyse du coefficient de piste causale de la variable dépendante "rendement en grains" et des variables indépendantes "taux de protéines, GHI, efficacité d'utilisation d'azote et ses indicateurs"

4 Discussion

Au niveau de tous les paramètres étudiés, tels que le taux de protéine, le NUP, le CAU, l'effet variétal et environnemental a été très hautement significatif.

Pour le taux de protéine, qui est représenté par la quantité d'azote stocké dans les grains, cette variation peut être due à la capacité variétale de transférer l'azote absorbé vers les grains, un paramètre physiologique qui peut être affecté par l'environnement (Assen & Debele, 2000; Lopez-Bellido et al., 2004). Dans notre étude, l'effet de l'environnement, exprimé par la quantité d'eau disponible dans la période GS39-épiaison, est positif chez la variété MBB. En revanche, pour les autres variétés, l'effet de l'environnement sur le taux de protéine n'est pas significatif, sauf pour la variété Simito, où un effet négatif entre le nombre de jours et le taux de protéine dans la période épiaison-floraison est observé (Gweyi-Onyango, 2018).

Pour l'efficacité d'utilisation d'azote agronomique, nous remarquons une faible valeur enregistrée pour la variété MBB. Cette observation peut être interprétée à travers les méthodes

Analyse de l'effet génétique et environnemental sur l'efficacité d'utilisation de l'azote en relation avec le rendement et le taux de protéines chez différentes variétés de blé dur

de sélection modernes qui visent à produire des variétés courtes ou semi-courtes ayant la capacité de transformer l'azote absorbé en grains plutôt que de le transformer en paille (Jensen, 1978). Des résultats similaires ont été mentionnés par (Noureldin et al., 2013). Lorsque nous examinons la relation de ce paramètre avec les conditions environnementales, nous constatons que, pour la variété MBB, caractérisée par une grande quantité de paille, seule la quantité d'eau disponible entre le stade semi et la levée est impliquée. En revanche, pour les autres variétés, la quantité d'eau et la durée des différentes périodes interviennent dans la détermination du NUE. Concernant l'efficacité d'absorption d'azote, des valeurs faibles ont été enregistrées pour la variété MBB. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Amsal Tarekgegne and Tanner, (2001) qui ont constaté que les valeurs élevées de N absorbé sont relatives aux variétés semi-courtes.

Pour l'efficacité d'utilisation d'azote agro-physiologique, les différences entre les variétés sont similaires aux résultats de Gauer et al., (1992), qui ont rapporté que le NUE_p est lié aux génotypes et à l'apport en azote. De plus, pour déterminer les variables contribuant à la variation du NUE_p , l'analyse stepwise a montré que l'effet de l'eau disponible dans le sol pendant la période végétative chez la variété MBB peut améliorer la quantité d'azote absorbé, tandis que l'effet du nombre de jours dans la période épiaison-floraison est significatif pour la variété Vitron. Cela signifie que chaque variété possède une capacité spécifique d'accumulation d'azote. Les autres déterminants de l'efficacité d'utilisation de l'azote par la plante (NUE_p) incluent le poids de la paille et sa capacité à retenir l'azote (Fageria, 2008).

Concernant le coefficient apparent d'utilisation d'azote (CAU), les travaux de Gauer et al., (1992) ont signalé que ce coefficient est lié au climat, aux variétés et à l'apport d'azote, des résultats similaires à ceux de cette étude où la variation due aux variétés et à l'environnement est très hautement significative. De plus, l'interprétation des résultats de l'analyse stepwise montre que la capacité d'absorption d'azote est déterminée par la quantité d'eau disponible dans le sol à des périodes variables selon la variété étudiée.

En ce qui concerne le lien entre le rendement et les différentes utilisations de l'azote, on observe une corrélation parfaite entre le rendement et le NUE, avec une autre corrélation élevée enregistrée avec la quantité d'azote absorbé dans toutes les variétés, ces résultats concordent avec les travaux de (Fageria & Baligar, 2005). Quant au lien entre le rendement et le NUE_p , aucune corrélation n'a été enregistrée, sauf chez MBB où une augmentation du NUE_p représente une diminution du poids de la paille ou une augmentation de la quantité d'azote transformée en grains (Gweyi-Onyango, 2018). Ces résultats peuvent expliquer la relation négative entre le NUE_p et le taux de protéine.

Analyse de l'effet génétique et environnemental sur l'efficacité d'utilisation de l'azote en relation avec le rendement et le taux de protéines chez différentes variétés de blé dur

Concernant le lien entre le NUE, le CAU et l'efficacité d'utilisation de l'azote, une corrélation très élevée a été enregistrée, suggérant que ces paramètres peuvent être gérés soit par le choix variétal soit par la manipulation du calendrier d'irrigation (Howell, 2001; Condon, 2004). Ce résultat met en évidence la relation entre la quantité d'eau dans le sol et l'assimilation de l'azote par la plante (Boulelouah et al., 2022).

D'après l'analyse de la piste causale, on constate que seul le NUE agronomique a un effet direct sur le rendement. Pour le WUE, il intervient dans l'augmentation de la quantité d'azote absorbé (Ullah et al., 2019), ce qui implique également une influence indirecte sur le rendement via son effet sur le NUE.

5 Conclusion :

L'objectif de ce travail était d'analyser l'effet des variétés et des conditions environnementales sur l'efficacité d'utilisation de l'azote et ses composants, ainsi que la relation entre ces indicateurs et le rendement, tout en examinant l'effet de l'efficacité d'utilisation de l'eau sur ces composants du NUE.

L'analyse comparative des différentes variétés dans diverses conditions a révélé des différences très hautement significatives pour tous les paramètres étudiés. Dans l'analyse des corrélations, le NUEAP a montré un effet positif dans la variété MBB, qui présente une biomasse végétative plus élevée que les autres. Le NUE et le CAU se sont révélés être les paramètres qui influent sur le rendement dans toutes les variétés et peuvent être affectés par l'efficacité d'utilisation de l'eau, qui est liée à l'état hydrique du sol à différentes phases de développement.

Ces constatations ont été confirmées par une analyse de piste causale, où le NUE agronomique a été identifié comme ayant le seul effet direct sur le rendement. En revanche, le CAU et le WUE ont un effet indirect via l'augmentation du NUE.

Compte tenu de la complexité de l'expression variétale des paramètres d'efficacité de l'utilisation de l'azote et de leurs variations en fonction des conditions temporelles du milieu, avec un lien direct sur l'augmentation du rendement, il est nécessaire de passer à une étude dynamique approfondie. Cette approche nécessitera des modèles de croissance dynamique pour mieux comprendre ces interactions complexes et pour optimiser l'utilisation de l'azote et de l'eau dans la production agricole.

**Chapitre 4 : Utilisation d'APSIM Next Generation
pour l'expression phénotypique des caractères
quantitatifs du blé en Algérie.**

1 Introduction

En raison de la complexité des interactions entre plusieurs facteurs dans le système sol-plante-climat, l'identification de solutions et de recommandations durables n'est pas facile (Öborn et al., 2003). Pour comprendre et évaluer les différents aspects des écosystèmes, une approche consiste à mener des expériences sur le terrain à long terme et à grande échelle (Qi et al., 2017). Cependant, dans le contexte de la faisabilité économique et pratique, de telles expériences sont difficiles à exécuter à grande échelle (Viscarra Rossel & Mcbratney, 1998). Par conséquent, l'utilisation d'outils avancés tels que les modèles de simulation des cultures peut permettre de réduire la consommation de ressources et de temps tout en fournissant des informations précieuses similaires (Wallach et al., 2006).

Le modèle de croissance des cultures prend en compte les systèmes de culture, les sols, les climats et la gestion des champs, qui sont étroitement liés à la croissance des cultures, et utilise des formules mathématiques pour décrire les processus physiologiques, écologiques et chimiques, permettant ainsi d'obtenir une simulation détaillée de l'ensemble du processus (ZHANG et al., 2023). Depuis 1969, Wit et al., (1970) ont introduit le premier modèle informatique agricole. Depuis lors, les scientifiques du monde entier ont développé plus d'une centaine de modèles de croissance des cultures, parmi lesquels les plus matures sont le « Crop Environment Resource Synthesis (CERES) » (Timsina & Humphreys, 2006) et l'« Agricultural Production Systems sIMulator (APSIM) » (D. P. Holzworth et al., 2015).

Actuellement, le modèle de croissance des cultures est devenu l'un des outils les plus puissants pour étudier l'interaction entre les gènes des espèces cultivées, l'environnement et la gestion des itinéraires techniques. Le mécanisme et la prédictibilité du modèle de croissance des cultures ont été améliorés et perfectionnés, et il a été appliqué avec succès dans la gestion de la production agricole et des ressources environnementales (Z. Zhao et al., 2015; E. Wang et al., 2019; Z. Zhao et al., 2019). Le calibrage d'un modèle de culture pour répondre à une question de recherche est une tâche complexe et difficile. Différents modèles de cultures utilisent différentes approches pour formaliser des algorithmes décrivant des processus, ce qui produit évidemment des résultats différents, même lorsqu'ils sont fournis avec le même ensemble de données d'entrée. Outre les différences dans les formalismes algorithmiques, les valeurs paramétriques dans les modèles ne sont pas universellement applicables (Wallach, 2011). Le calibrage des paramètres clés est donc une étape critique pour assurer la robustesse d'un modèle lorsqu'il est utilisé pour des scénarios autres que ceux qui ont été testés (Asseng et al., 2013). Il repose sur une analyse de sensibilité (SA) qui interprète l'influence des variables de sortie en modifiant les paramètres d'entrée un par un, déterminant ainsi leur impact et leur sensibilité sur

Utilisation d'APSIM Next Generation pour l'expression phénotypique des caractères quantitatifs du blé en Algérie.

la variable de résultat, puis identifiant quels paramètres ont une influence sur la sortie du modèle. À mesure que le modèle est mis à jour et développé, il doit simuler de manière crédible et transparente les processus physiologiques critiques des cultures. Le nombre de paramètres des cultures impliqués dans le modèle augmente également, et la détermination des paramètres de la variété a toujours été l'un des défis de la validation et de l'application du modèle (ZHANG et al., 2023).

Pour le modèle APSIM-Wheat Hao et al., (2024); Ils ont identifié six paramètres sensibles recueillis sur la base de la teneur en eau du sol, de la disponibilité d'azote et des conditions météorologiques qui affectent le rendement des céréales. De plus, selon Kumar et al. (2023); ZHANG et al., (2023), Les jours jusqu'à la floraison et la maturité physiologique sont principalement influencés par les facteurs qui déterminent la durée des étapes de reproduction. Cela inclut le phyllochron, qui correspond au nombre de feuilles qu'une plante produira après avoir été complètement vernalisée dans des conditions de longues photopériodes, ainsi que la sensibilité de la plante à la photopériode. Les rendements étaient les plus sensibles aux paramètres de culture qui déterminent le composant du rendement (GrainsPerGramOfStem, MaximumPotentialGrainSize) et au phyllochron.

En Algérie, quelques études ont été menées en utilisant l'approche des modèles de cultures, principalement axée sur l'évaluation de l'effet du variation climatique (Chourghal et al., 2016b; Bouregaa, 2019) avec des divergences dans la détermination des paramètres des variétés.

Cependant, l'APSIM n'a pas été rigoureusement testé pour simuler les variétés de blé algériennes dans des conditions semi-arides en Algérie. Ainsi, il est nécessaire de calibrer les paramètres influençant la phénologie, le rendement ainsi que les composants de rendement, et la teneur en protéines des grains tout au long de la saison. Par conséquent, cette étude a été menée pour calibrer et évaluer les performances du modèle de blé APSIM en utilisant des données issues d'expériences menées pendant deux ans dans la région semi-aride de Sétif. Nous avons ajouté une nouvelle variété en utilisant des paramètres basés sur les résultats d'une analyse de sensibilité réalisée préalablement avec le modèle APSIM NG et leur impact direct sur les variables mesurées.

2 Matériel et méthodes

2.1 Lieu d'étude et procédures expérimentales

Des expériences sur le terrain ont été menées pendant la saison 2021/2022 et 2022/2023 à l'Institut technique des grandes cultures (ITGC) dans la zone semi-aride de Sétif, en Algérie. (36.1641538, 5.3701344). Le sol présentait une texture argileuse, avec un pH de 7,51 et une conductivité électrique de 0,23 dS/m-1 (une caractérisation supplémentaire du sol est présentée dans le tableau 21).

Table 21. Caractérisation supplémentaire du sol

Profile	DA	PF	CC	PS	CO
mm	g/cc	mm/mm	mm/mm	mm/mm	Total
0-150	1,200	0,146	0,339	0,540	1,380
150-300	1,330	0,178	0,347	0,442	1,190
300-600	1,326	0,115	0,295	0,462	1,180
600-900	1,326	0,135	0,295	0,452	1,580

DA ; densité apparente. **PF** ; point de flétrissement. **CC** ; capacité au champ. **PS** ; point de saturation. **CO** ; carbone organique.

Dans deux dispositifs expérimentaux, l'un sous pluviale et l'autre irrigué ; les deux dispositifs sont similaires et factoriels sur la conception de blocs complets randomisés (RCBD) en utilisant 4 répétitions.

Le 5 janvier 2022 (première année) et le 29 décembre 2023 (deuxième année), cinq variétés de blé dur (Oued ElBared, Boussellam et Mohamed Ben Bachir (MBB) pour les variétés locales et Simito et Vitron comme des variétés introduites) ont été semés à une densité de plantation de 350 grains.m⁻². Au cours de la préparation des sols, on a appliqué de di-ammonique phosphate (DAP) avec un apport de 100 kg ha⁻¹. À la GS25 et à la GS32, l'urée utilisé comme une source d'azote avec des doses égale de 60 UN.ha⁻¹ pour chaque stade.

2.2 Données météorologiques et planification de l'irrigation.

Les données climatiques pendant les deux saisons (figure 18) recueillies à partir de <https://power.larc.nasa.gov/>. En plus, pour les parcelles irriguées, une irrigation supplémentaire a été appliquée (calendrier d'irrigation et la quantité présenté dans le tableau 22).

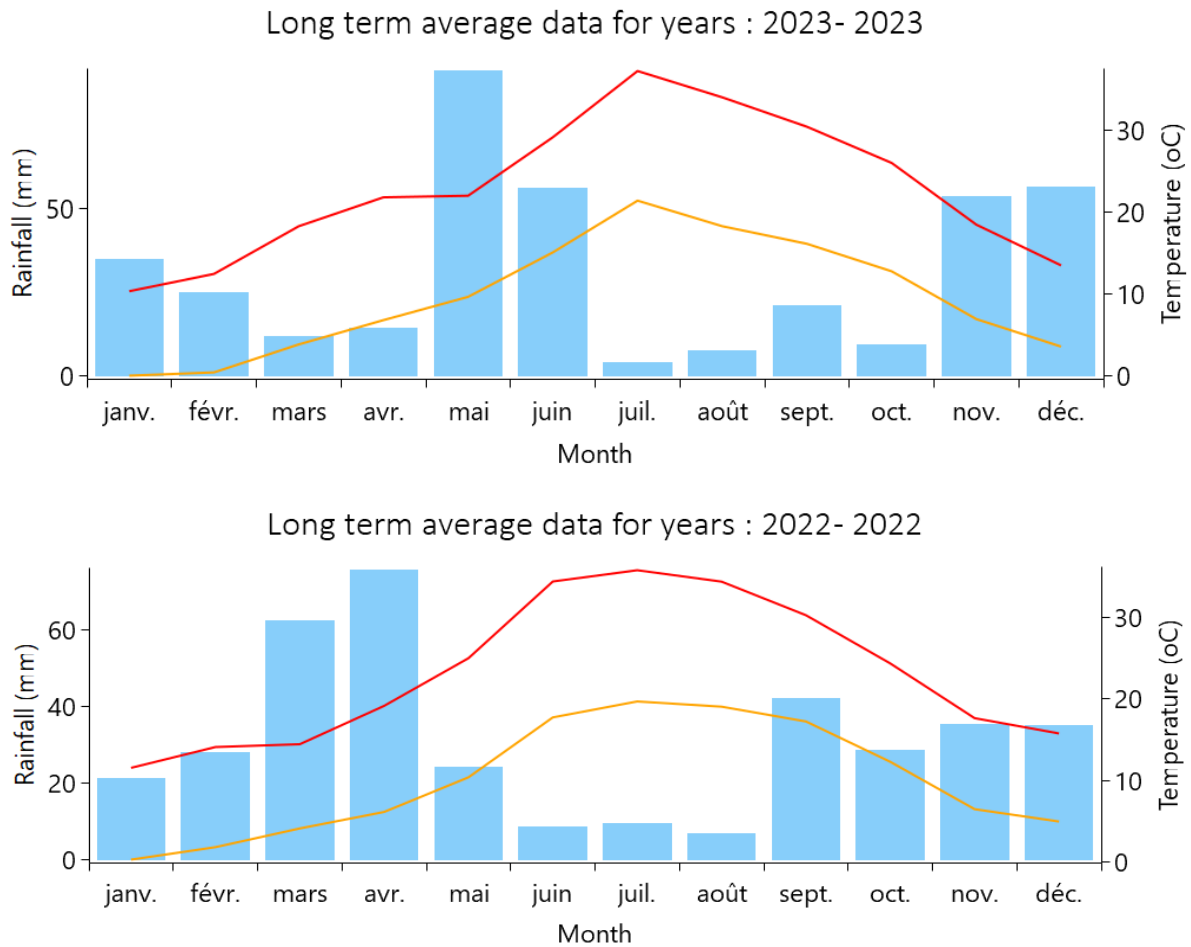


Figure 18. Données de la précipitation, température minimale et maximale dans la région d'étude pour les deux Seasons agricole

En ce qui suit, nous présentons les informations relatives au calendrier d'irrigation et la quantité apporté dans les deux Seasons

Table 22. Calendrier d'irrigation et la quantité apportée dans les deux Saisons

Date	Quantité d'eau mm
13/01/2022	15
29/03/2022	25
02/06/2022	20
25/05/2022	25
05/06/2022	25
07/06/2022	25
27/03/2023	15
15/04/2023	20
18/04/2023	20
19/04/2023	20
24/04/2023	25
28/04/2023	20
30/04/2023	30
10/05/2023	15

3 Description du modèle APSIM Next Generation (APSIM NG)

Le modèle APSIM, développé par l'Institut fédéral de technologie australien (CSIRO) et l'Unité d'intégration de l'industrie agricole (APSRU) du gouvernement du Queensland, est un outil de simulation des systèmes de production agricole. Contrairement à d'autres modèles, APSIM se concentre sur les systèmes de sol, les cultures, le climat et la gestion agricole comme des facteurs qui influent sur les propriétés des sols. Les mesures relatives aux cultures, à l'environnement et à la gestion peuvent être remplacées par des modules dans le modèle, ce qui permet aux chercheurs de construire plus facilement des modèles répondant à leurs besoins, tout en intégrant de nombreuses conclusions de recherche fragmentées dans ce modèle.

Le modèle APSIM NG de nouvelle génération améliore la vitesse d'exécution du code et prend en charge le développement sur différentes plateformes (Windows, LINUX, OSX), permettant ainsi aux chercheurs de simuler des systèmes agricoles plus complexes à différents niveaux de temps et d'espace (D. Holzworth et al., 2018). APSIM NG succède au cadre de modélisation des plantes dans APSIM Classic (APSIM v7.10), en fournissant une fonction commune et une bibliothèque d'algorithmes pour la simulation de modèles. Cela permet aux chercheurs de construire des modèles de cultures ou des modèles de sol répondant à leurs besoins sans nécessiter de codage (Brown, Huth, Holzworth, et al., 2014).

3.1 Calibration et évaluation du modèle APSIM

Sur la base des mesures de gestion de la culture enregistrées dans l'expérience, les données ont été complétées avec les fonctionnalités correspondantes de la boîte à outils de gestion dans APSIM NG, couvrant des aspects tels que les propriétés du sol, la fertilisation, l'irrigation, la récolte et d'autres caractéristiques pertinentes.

Bien qu'APSIM propose plusieurs variétés de blé par défaut, aucune d'entre elles ne consiste en une variété locale algérienne ou autre variété cultivée dans des conditions algériennes. De plus, ces cultivars par défaut n'ont pas été calibrés pour la phénologie, le rendement ou d'autres composants importants, comme la teneur en protéines des grains. Dans cette optique, nous avons entrepris d'ajouter une nouvelle variété en utilisant des paramètres basés sur des connaissances spécialisées et des informations sur leur influence directe sur les variables mesurées. Cette approche de sélection des paramètres pour le calibrage est couramment utilisée dans la modélisation agricole (Seidel et al., 2018).

Pour garantir la précision et l'efficacité du calibrage, nous avons suivi une approche progressive en commençant par le développement phénologique puis en ajustant les paramètres liés au

Utilisation d'APSIM Next Generation pour l'expression phénotypique des caractères quantitatifs du blé en Algérie.

développement des grains (Seidel et al., 2018), Les coefficients génétiques ont été déterminés à l'aide d'une méthode d'essai et d'erreur manuelle. Les valeurs ont été ajustées de manière à minimiser autant que possible la racine moyenne de l'écart quadratique (RMSD) entre les données simulées et les observations enregistrées tout au long de l'expérience de 2023.

Les paramètres ; nombre minimum des feuilles finale après que la culture ait pris pleinement ses besoins en froid avant le grossissement de la tige puis continue de se développer avec une photopériode de plus de 16 heures (MinLN), augmentation en nombre minimum des feuilles finale quand prend pleinement leur besoin en froid avant le grossissement de la tige puis continue de développer avec une température plus de 18 C° et un photopériode de 8 heures (PpLN), augmentation en nombre minimum des feuilles finale quand la plante prend pas leur besoin en froid et continue de développer sur une photopériode de 8 heures (VrnLN), le nombre des feuilles quand la plante développera dans des conditions de température plus de 20 C° et photopériode de 8 heures (VxPLN), le temps thermique entre l'apparition des feuilles (Phyllochron) et leur sensibilité au photopériode (PpSensitive), le temps thermique entre l'apparition de la dernière feuille et l'épiaison (HeadEmergenceLongDayBase) et le temps thermique entre l'épiaison et la floraison (EarlyFloweringTT), qui sont sensibles à la période de floraison, sont optimisés en fonction du temps de floraison observé.

Les paramètres affectant la durée de la période floraison aux paramètres ; le temps thermique entre la floraison et le démarrage de remplissage des grains (GrainDevelopmentTT) et la période de remplissage des grains en degré jours (GrainFillingTT), sont optimisés en fonction du temps de maturation observé.

Le nombre des grains par gramme de tige (GrainsPerGramOfStem) et le poids maximal potentielle de grain (MaximumPotentialGrainSize) sont les variables optimisées en fonction du nombre de grains et du poids des grains observés dans l'expérience, afin d'avoir des rendements appropriés.

La concentration maximale d'azote dans le grain (MaximumNConc) est le coefficient optimisé en fonction de la teneur en protéines des grains.

Pour tester les performances du modèle sur des données indépendantes, le modèle calibré a été exécuté sur les données recueillies dans la saison 2022. On a comparé les dates de floraison et de maturité simulées et mesurées, les composants de rendement et de récolte et la teneur en protéines des grains. Des indicateurs statistiques ont été utilisés pour évaluer les performances du modèle, tels que le coefficient de détermination (r^2) pour la ligne $y=x$, la racine de l'écart quadratique moyen (RMSD) entre les valeurs simulées et mesurées, et le coefficient d'efficacité du modèle Nash–Sutcliffe. (NSE). r^2 mesure le pourcentage de variation dans les observations

expliquées par le modèle; RMSD fournit une mesure de la magnitude absolue de l'erreur qui n'est pas résolue par le model et NSE, la puissance prédictive du modèle. Idéalement, le RMSD devrait être proche de zéro, r^2 et NSE près de 1, et le NSE au moins positif. En plus pour la comparaison des résultats avec la littérature ; la racine de l'erreur quadratique moyenne relative NRMSE a été calculer sur la base de l'équation 9.

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum(Si-Oi)^2}{\sum Oi^2}} \dots\dots\dots \text{Equation (15)}$$

4 Résultats

4.1 Résultats de l'analyse de calibrage

L'analyse de la sensibilité montre que les jours pour atteindre la floraison et la maturité physiologique étaient principalement sensibles aux paramètres qui déterminent la longueur des étapes de reproduction (phyllochron, le nombre de feuilles que la plante produira lorsqu'elle sera entièrement vernalisée tôt et cultivée dans une longue photopériode), et le rendement était le plus sensible aux paramètres de culture qui déterminent la composante du rendement (nombre de grains par gramme de tige, le poids maximal potentiel du grain) et au phyllochron pour toutes les variétés.

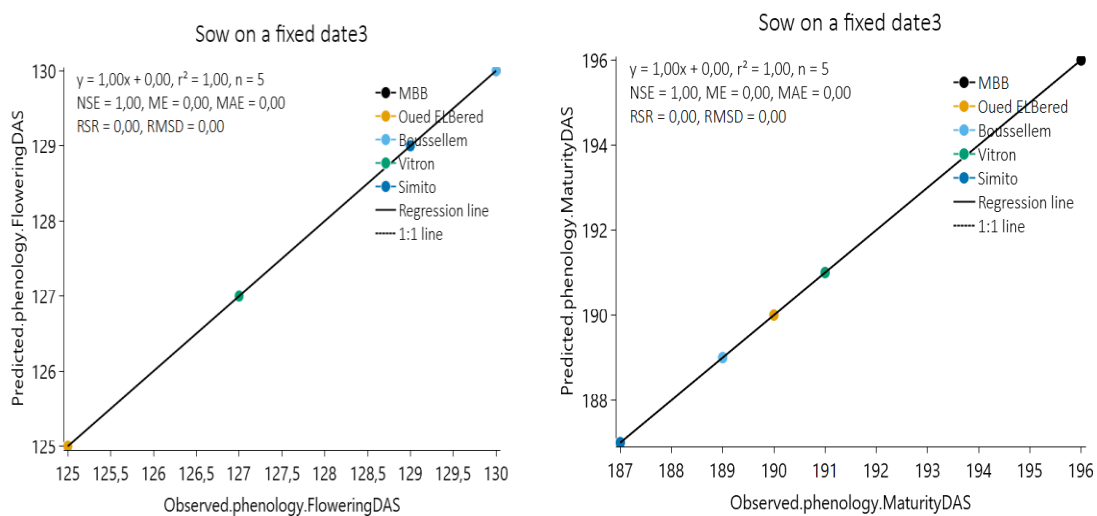
Les résultats de la méthode « essai-erreur » qui consiste à essayer différentes approches jusqu'à trouver celle qui fonctionne, ont été utilisés pour déterminer les paramètres génétiques de Bousselem, Oued ElBared, MBB, Vitron et Simito dans le modèle APSIM NG. Il a été établi que le phyllochron a une valeur allant de 107,5 à 119 °C, avec la valeur la plus élevée observée pour Oued ElBared, et qu'il a un effet sur le nombre de jours entre le semis et la floraison, suivi par le nombre minimum de feuilles (FLN) allant de 5,6 à 7, la valeur la plus élevée étant enregistrée pour MBB. Pour la sensibilité du phyllochron à la photopériode (PpSensibilité), nous avons maintenu la valeur standard à 0,6, sauf pour Oued ElBared où une valeur de 0,9 a été mentionnée. De même, pour l'accumulation de températures dans la phase d'épiaison-floraison (EarlyFloweringTT), nous avons maintenu la valeur constante de 80 °C pour toutes les variétés, sauf pour Simito, pour laquelle une valeur de 110 °C a été indiquée.

Les variations dans le rendement peuvent être résolues par le nombre de grains par gramme de tige, qui varie entre 17 et 17,8, ainsi que par le poids maximal potentiel des grains allant de 0,0425 à 0,505. De plus, les effets de l'intervalle thermique entre l'apparition des feuilles (phyllochron) sur le rendement sont principalement obtenus par l'interaction avec d'autres paramètres tels que le nombre de grains et la taille des grains. Les résultats ont été présentés dans le tableau.

Table 23. Les paramètres génétiques des variétés dans APSIM NG

	Oued El Bared	MBB	Boussellam	Vitron	Simito
parametre					
FLNparams.MinLN	5.6	7	6.8	6.6	6.8
FLNparams.PpLN	0.1	1	-1.5	1	-0.1
FLNparams.VrnLN	1.8	3	3	3	3
FLNparams.VxPLN	-1	1.2	1.2	1.2	1.2
Phyllochron	119	115	117	107.8	115.5
PpSensitivity	0.9				
HeadEmergenceLongDayBase	160	100	186	130	125
GrainFilling	880	900	860	900	850
GrainDevelopment	200	170		170	
MaximumNConc	0.0241	0.225	0.0198	0.0261	0.0204
MaximumPotentialGrainSize	0.0505	0.425	0.045	0.0441	0.045
GrainsPerGramOfStem	17.4	17	18	17.8	17.8
EarlyFlowering					110

Avec ces coefficients génétiques, le modèle représente les meilleures performances dans les variables de sortie, avec une NRMSE entre les valeurs estimées et réelles égales à 0%. La représentation graphique est mentionnée dans la figure 19)



Utilisation d'APSIM Next Generation pour l'expression phénotypique des caractères quantitatifs du blé en Algérie.

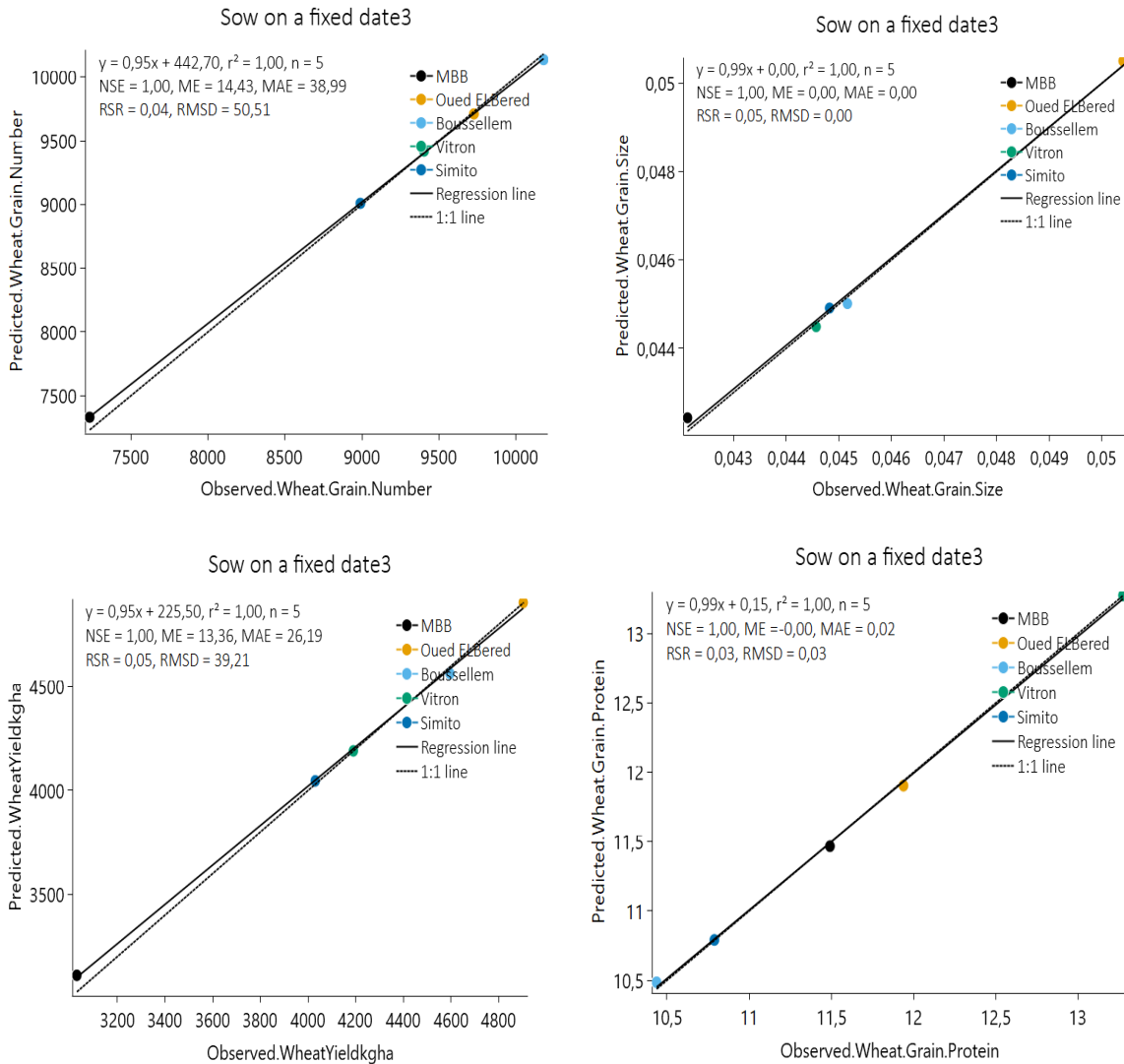


Figure 19. Démonstration graphique du calibrage de APSIM-Wheat.

4.2 Évaluation du APSIM NG

Les paramètres de génotype conclus par l'analyse de sensibilité et la méthode de « trial-and-error » ont été utilisés pour évaluer les performances du APSIM-Wheat dans la prédiction de la phénologie, du rendement et de la teneur en protéines dans les grains, sous différentes applications supplémentaires d'irrigation pour tous les cultivars.

Pour le nombre de jours après le semis (DAS) nécessaires pour atteindre la floraison (voir figure 20), le modèle a sous-estimé les valeurs dans les deux essais, avec une erreur de 7,61 jours et un NSE présentant une valeur négative. La meilleure prédiction a été observée pour SIMITO, avec un RMSD de 3,5 jours, tandis que la moins précise l'a été pour MBB, avec une moyenne de 11 jours.

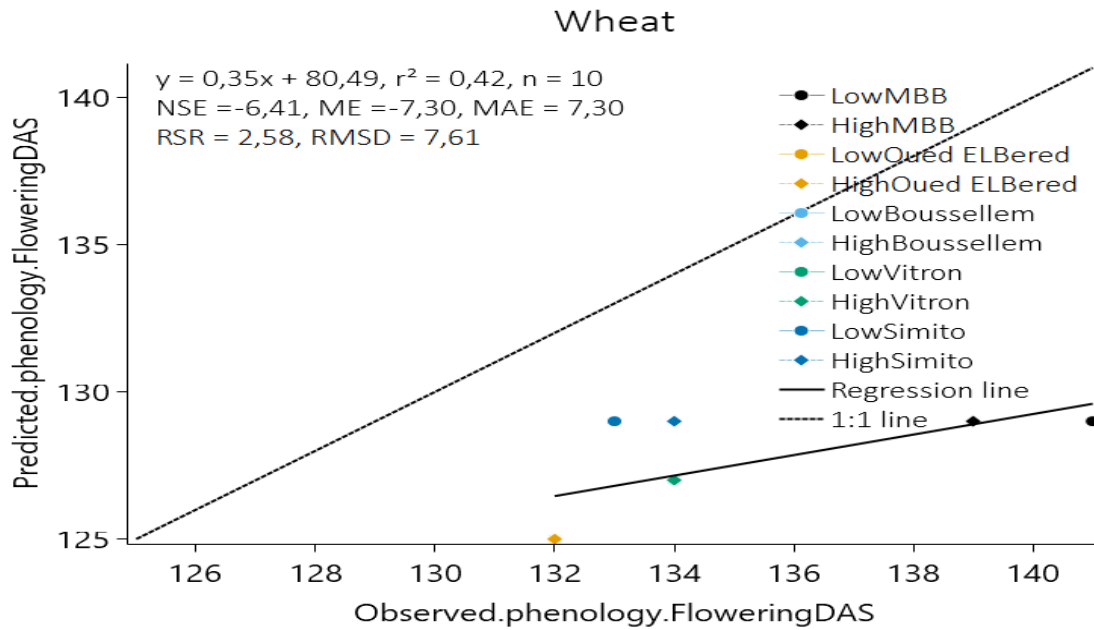


Figure 20. Simulation de la date de floraison dans les deux essais

L'analyse des DAS à la floraison dans les expériences de système pluvial (figure 21, gauche) et d'irrigation (figure 21, droite) séparément a montré que dans l'état de pluie, la performance de l'APSIM est plus adéquate avec 7,84 jours contre 11,86 jours pour l'expérience d'irrigation. De plus, le modèle peut expliquer les résultats de l'essai d'irrigation avec une meilleure précision de 75% par rapport à 36% dans les conditions de pluie.

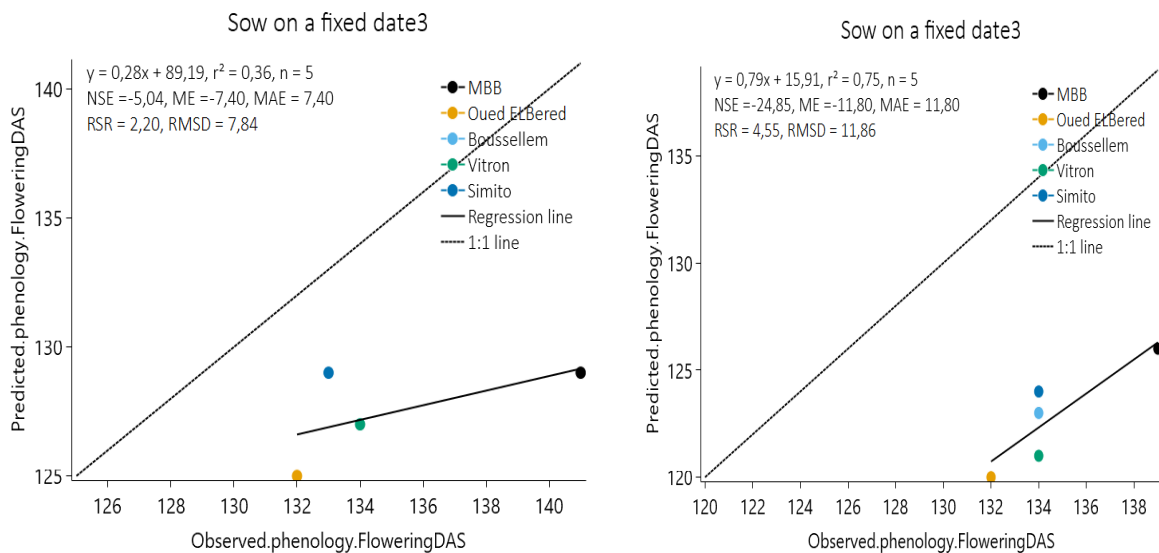


Figure 21. estimation-observation du jours de la floraison pour les deux essais séparés.

Pour le DAS de maturité (figure 22), le modèle a surestimé les valeurs dans les deux essais avec une erreur de 10,17 jours. La meilleure valeur de prédiction a été observée pour Boussellem et Vitron, avec un excès de 5 jours sous l'essai d'irrigation, tandis que la moins précise l'a été pour

MBB, avec une moyenne de 14 jours sous conditions pluviales.

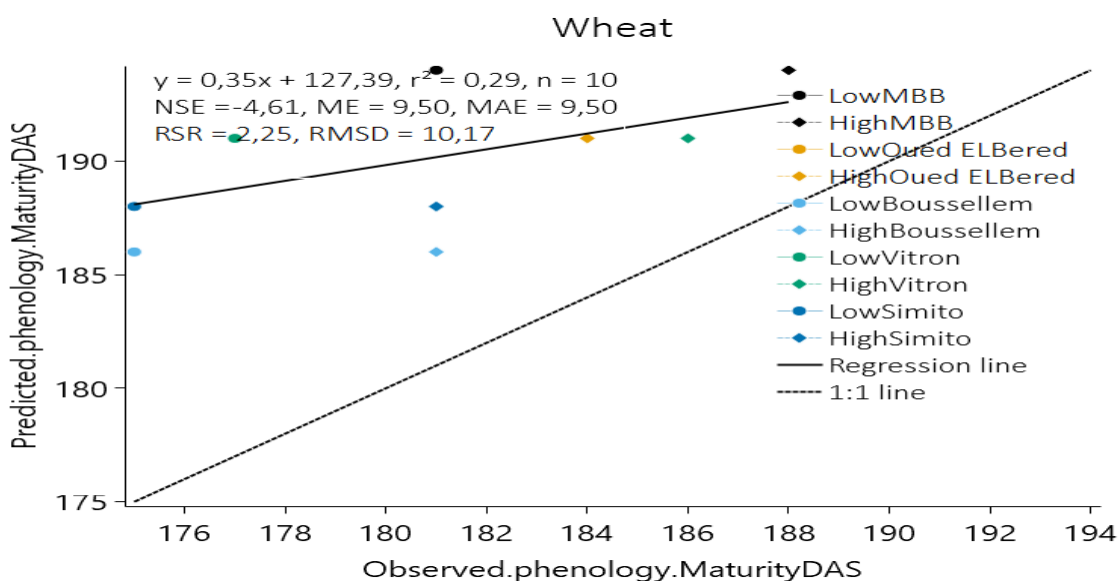


Figure 22.prédictions-observations du jours de la maturité

L'analyse du DAS de maturité dans les expériences pluvieuses (figure 23, gauche) et irriguées (figure 23, droite) séparément a montré que dans le traitement d'irrigation, la performance de l'APSIM est plus adéquate et peut expliquer 87% de la variation, avec une moyenne de 2,1 jours pour toutes les variétés. La meilleure valeur prédite a été enregistrée pour Vitron, où le modèle a pu capturer la valeur réelle. Pour la condition pluvieuse, une moyenne de 13,05 jours a été enregistrée, avec un coefficient de détermination de 86%.

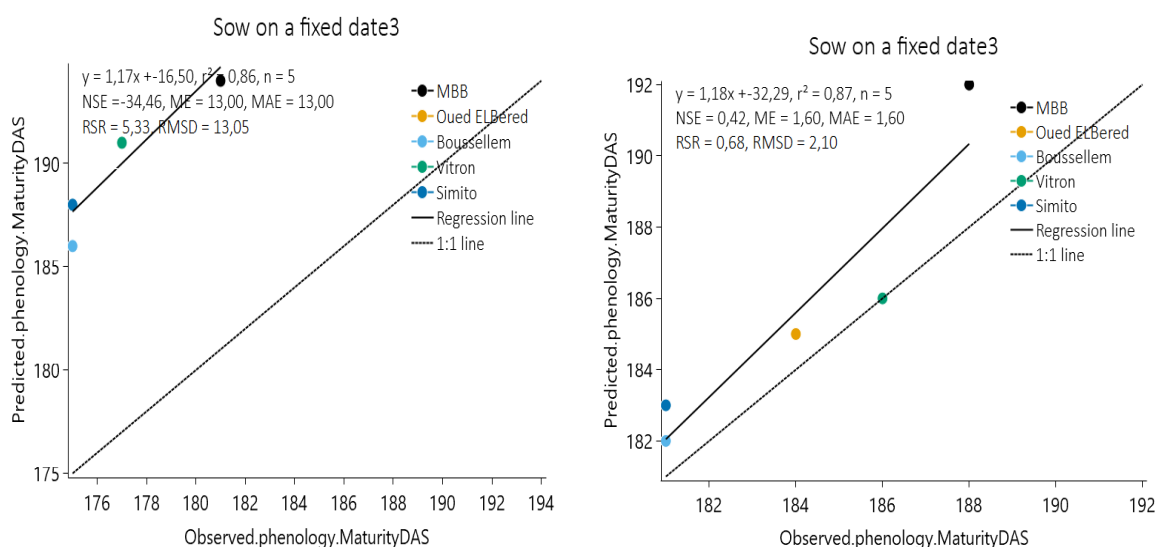


Figure 23.estimation-observation du jours de la Maturité pour les deux essais séparés

Pour le nombre de grains (figure 24), le modèle a sous-estimé les valeurs dans les deux essais avec une erreur de 5919 grains. La meilleure valeur de prédiction a été observée pour

Utilisation d'APSIM Next Generation pour l'expression phénotypique des caractères quantitatifs du blé en Algérie.

Bousselem avec une erreur de 1200 grains dans l'essai pluvial, tandis que la valeur la moins précise a été enregistrée pour Vitron avec une différence de 8000 grains entre les grains observés et estimés sous conditions pluviales.

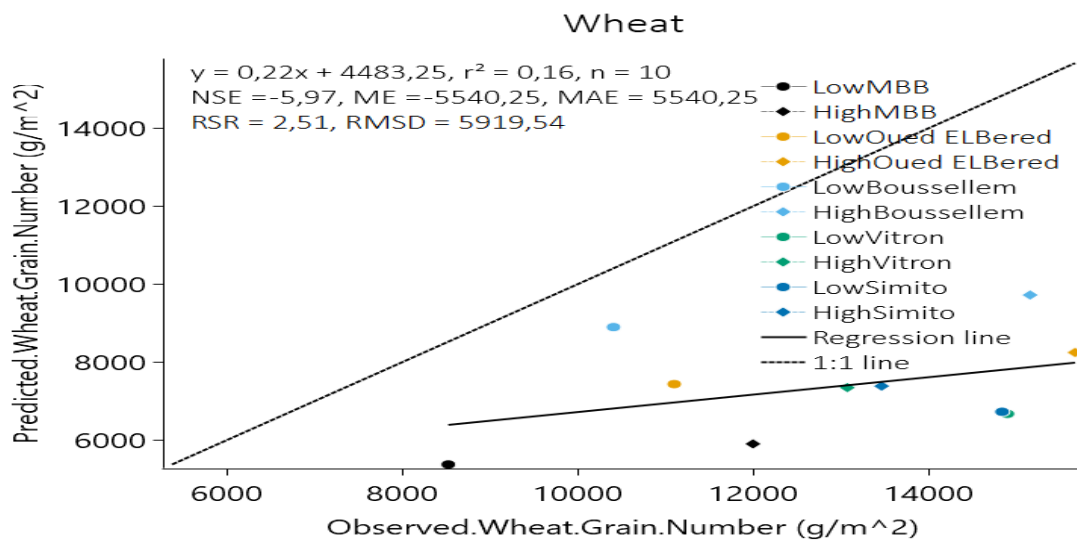


Figure 24. prédictions-observations enregistrée pour le nombre des grains.m²

L'évaluation du nombre de grains dans les expériences pluviales (figure 25, gauche) et irriguées (figure 25, droite) séparément a montré quelques différences dans l'erreur moyenne sous-estimée entre les essais, avec 5400 pour le traitement irrigué et 5600 sous l'état pluvial. La performance pour expliquer la variation dans le nombre de grains dans le traitement d'irrigation atteint 82%.

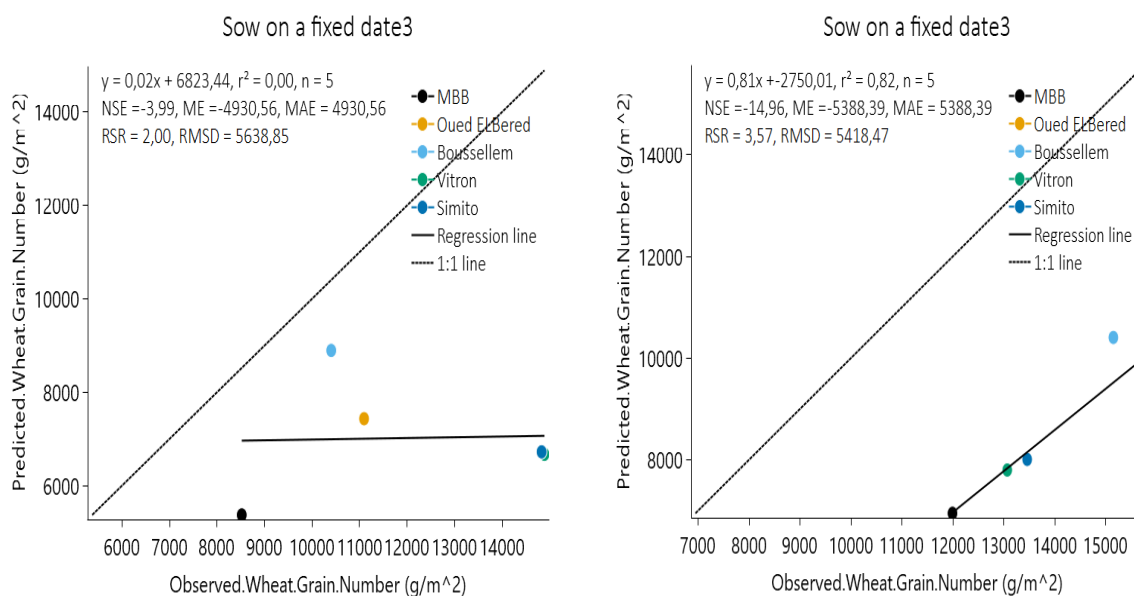


Figure 25. prédictions-observations enregistrée pour le nombre des grains.m² dans les deux essais séparément.

Pour le poids des grains (figure 26), le modèle a sous-estimé les valeurs dans les essais irrigués

Utilisation d'APSIM Next Generation pour l'expression phénotypique des caractères quantitatifs du blé en Algérie.

et surestimé dans les conditions de pluie. Une efficacité du modèle avec une valeur de 0 a été enregistrée, avec un RMSD de 0,01 g/grain.

L'évaluation du poids des grains dans l'essai pluvial (figure 27, gauche) et irrigué (Figure 27, droite) séparément a montré que dans les deux essais, APSIM a présenté la même qualité d'estimation avec une erreur moyenne égale à 0,01. Dans le traitement d'irrigation, le modèle a sous-estimé les valeurs, sauf pour Oued ElBared où il a présenté sa meilleure performance avec une valeur d'erreur de 0,002. En revanche, dans l'état pluvial, la meilleure valeur a été enregistrée pour MBB avec une erreur de 0,005.

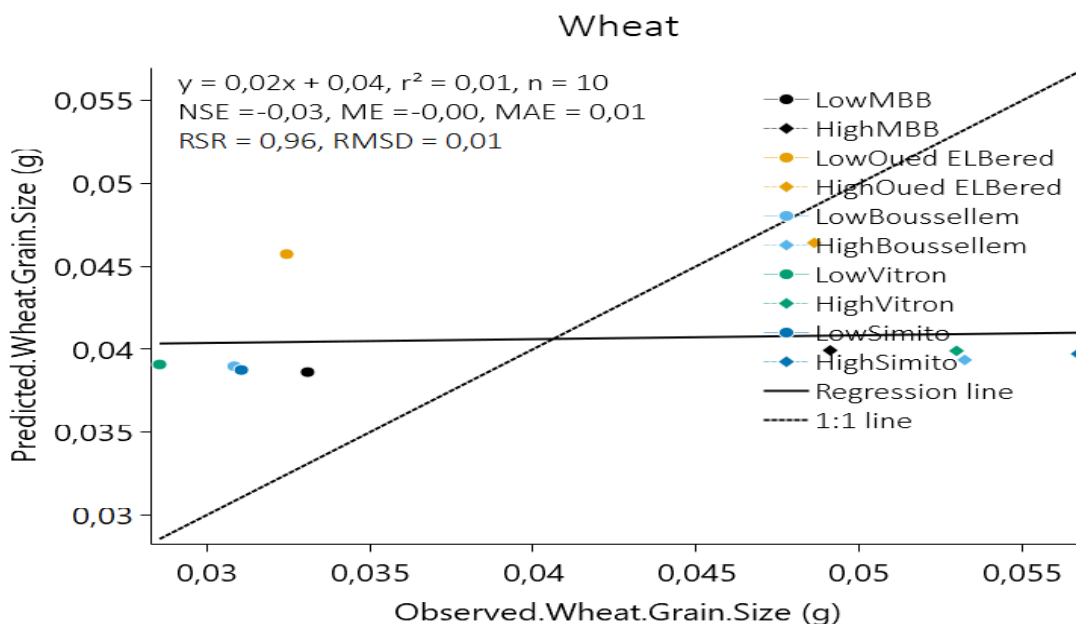


Figure 26.prédictions-observations enregistrée pour le poids du grain

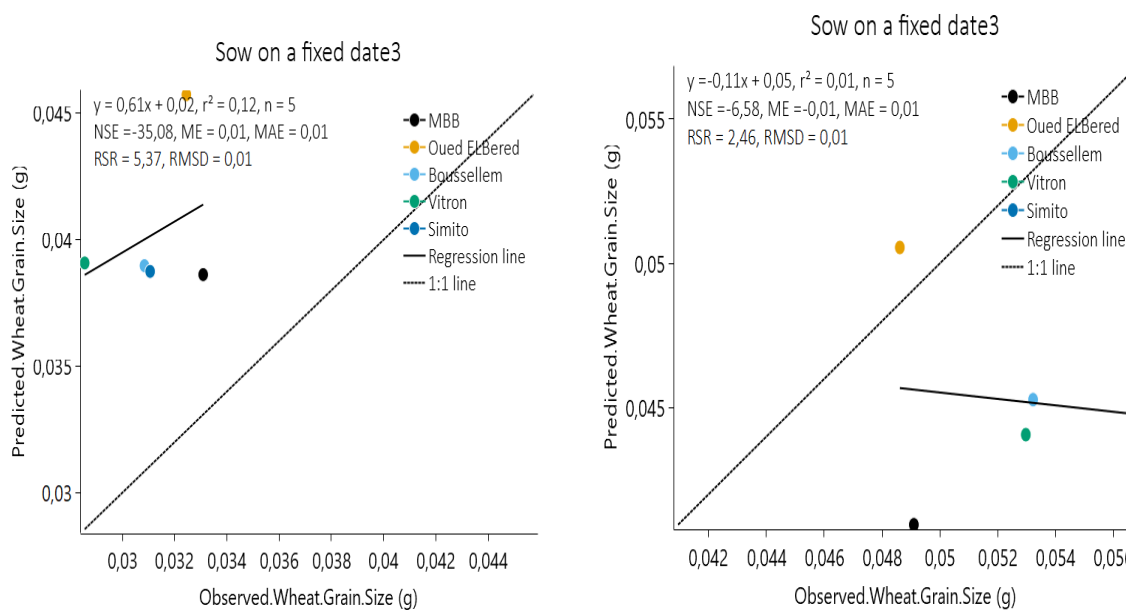


Figure 27.prédictions-observations enregistrée pour le poids du grain dans les deux essais

Pour le rendement des céréales (Figure 28), le modèle a été sous-estimé dans les deux essais, à l'exception de Boussellem où une surestimation a été enregistrée sous la condition de pluie. L'erreur moyenne enregistrée pour toutes les variétés dans les deux essais était de 3004 kg/ha.

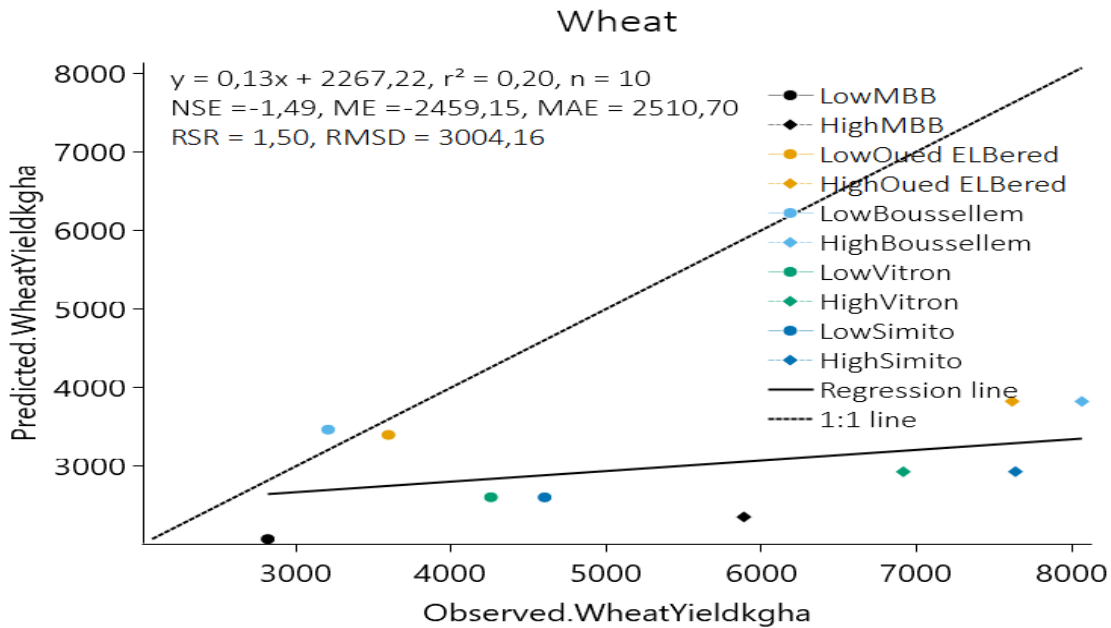


Figure 28. prédictions-observations enregistrée pour le rendement

L'évaluation du rendement dans les expériences pluviales (figure 29, gauche) et irriguées (figure 29, droite) séparément a montré que dans l'état pluvial, la performance de l'APSIM est plus adéquate, avec une moyenne de 1215 kg/ha, en particulier pour Boussellem et Oued Elbered où une erreur de 200 kg/ha a été enregistrée. Pour le traitement d'irrigation, APSIM NG explique 77% de la variation du rendement, mais avec une erreur moyenne élevée de 3382 kg/ha.

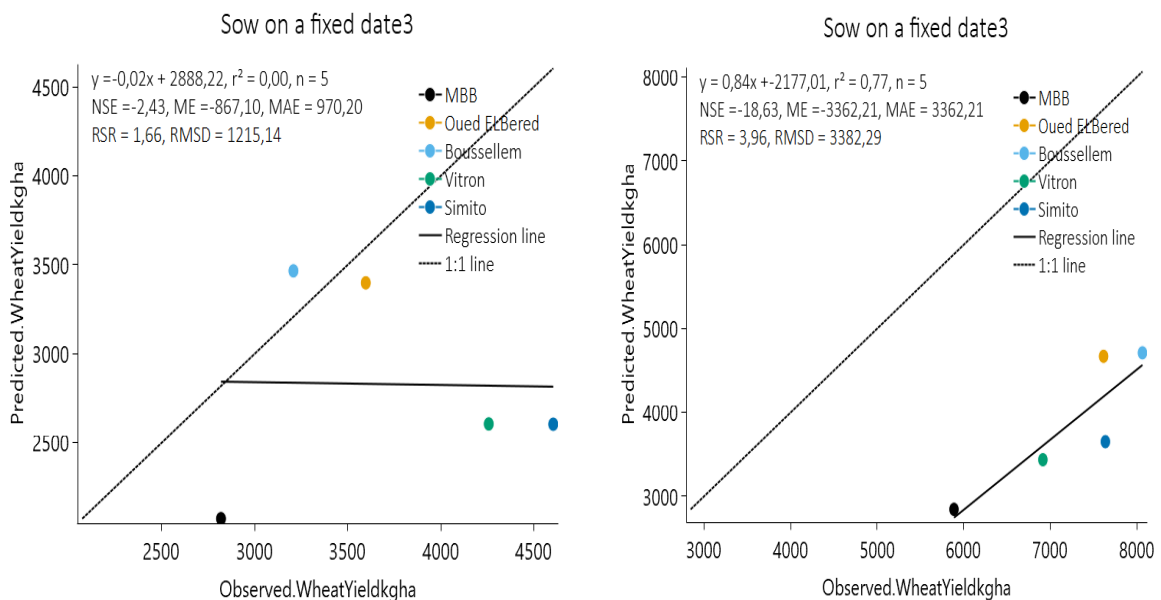


Figure 29. prédictions-observations enregistrée pour le rendement dans les deux essais

Pour la concentration de la protéine dans les grains (figure 30), le modèle a sous-estimé presque toutes les valeurs dans les deux essais. Seule une légère surestimation a été enregistrée pour Boussellem sous la condition de pluie. L'erreur moyenne enregistrée pour toutes les variétés

Utilisation d'APSIM Next Generation pour l'expression phénotypique des caractères quantitatifs du blé en Algérie.

dans les deux essais était de 2,84 %. La variété Bousselem dans l'essai pluvial et la variété Vitron dans les deux essais irrigués et pluviaux ont montré la meilleure valeur avec une erreur de 0,24 %, 0,23 % et 0,31 % respectivement.

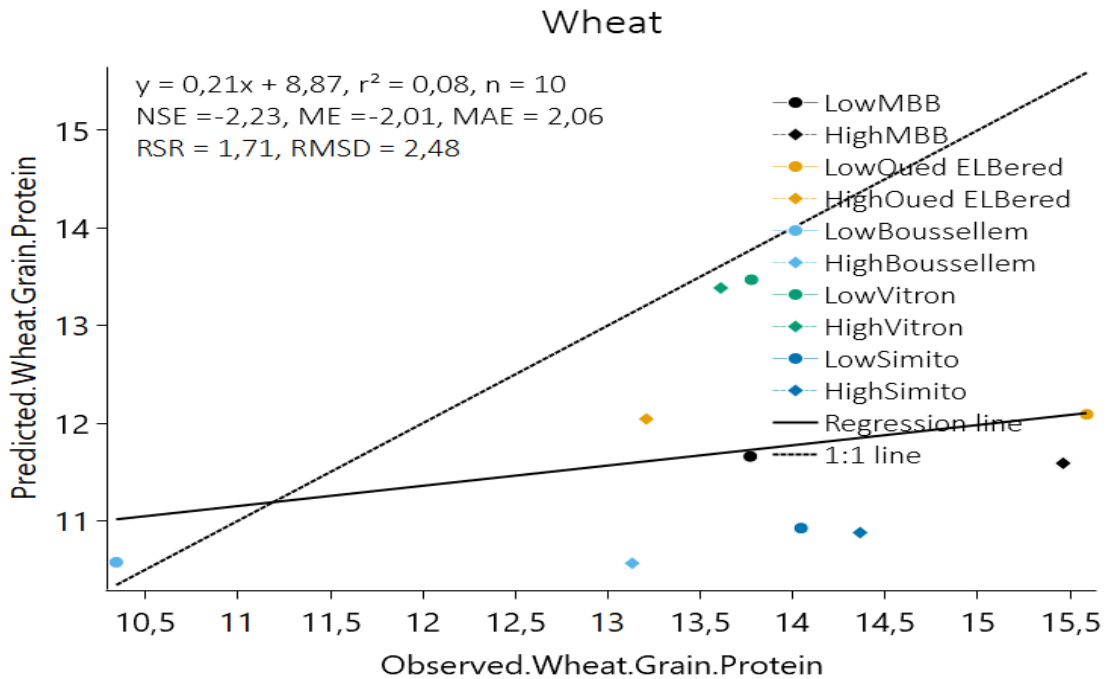


Figure 30.prédictions-observations enregistrée pour la concentration de la protéine dans les grains

L'évaluation de la protéine des grains dans les expériences pluviales (Figure 31, gauche) et irriguées (Figure 31, droite) séparément a montré quelques différences dans l'erreur moyenne sous-estimée entre les essais ; une valeur de 2,31 a été enregistrée sous l'état de pluie contre 2,73 pour l'expérimentation irriguée.

Utilisation d'APSIM Next Generation pour l'expression phénotypique des caractères quantitatifs du blé en Algérie.

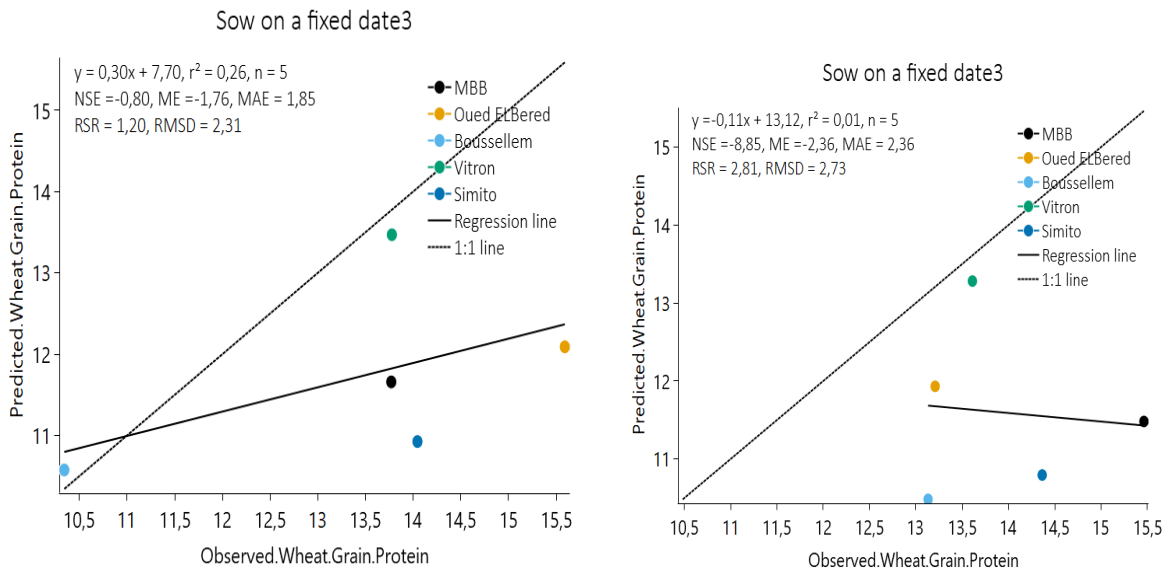


Figure 31..prédictions-observations enregistrée pour la concentration de la protéine dans les grains dans les deux essais

L'évaluation des performances du APSIM-Wheat pour prédire le comportement variétal séparément a montré une précision acceptable pour la plupart des variétés calibrées. Sur la base de la NRMSE, nous pouvons évaluer les performances du modèle pour prédire la phénologie comme étant très bonne à bonne, avec un NRMSE allant de 1,08 % jusqu'à 11,6 %.

En ce qui concerne le nombre de grains, le modèle a montré une faiblesse de prédiction dans le traitement irrigué pour toutes les variétés, ainsi que pour Vitron et Simito dans les deux conditions, avec un NRMSE supérieur à 30 %. Pour les variétés locales, le modèle variait entre bon et acceptable, avec un NRMSE compris entre 10 % et 30 %.

Pour le poids des grains, une variation d'exactitude a été enregistrée entre les variétés ; le modèle peut être très performant pour prédire le poids du grain pour MBB et Oued ElBared dans le traitement irrigué, et peut être acceptable pour Vitron dans le même traitement. Dans les conditions pluviales, seuls les résultats de Bousselem et Simito ont une bonne précision.

L'utilisation de l'APSIM pour prédire le rendement du blé dur sous le traitement d'irrigation a montré une mauvaise performance dans la prédiction, avec un NRMSE > 30 %. La même chose a été enregistrée dans les conditions pluviales avec la variété Simito. En revanche, pour Bousselem et MBB, le modèle a montré des performances très élevées (NRMSE < 10 %), et bonnes pour la variété Oued Elbared, avec une erreur acceptable pour Vitron.

Dans le GPC, le modèle a montré une mauvaise performance pour MBB et Simito dans les deux conditions. Pour les autres variétés, Bousselem a présenté une variation entre très bonne performance dans l'état pluvial et acceptable dans la parcelle irriguée, tandis que pour Oued

Utilisation d'APSIM Next Generation pour l'expression phénotypique des caractères quantitatifs du blé en Algérie.

Elbared, le modèle a prédit le GPC avec une bonne performance dans la parcelle irriguée et une performance acceptée dans les conditions pluviales.

Table 24. erreur moyenne et l'erreur moyen relative entre les valeurs estimée-observée des variables de sorties pour chaque variété

	Bousselem		MBB		Oued ElBared		Vitron		Simito	
	RMSD	NRMSE	RMSD	NRMSE	RMSD	NRMSE	RMSD	NRMSE	RMSD	NRMSE
Essai pluvial										
Jours floraison	5	3.73	14	9.93	13	9.85	11	8.2	6	4.51
Jours Maturité	14	8	21	11.6	9	5.08	11	6.21	11	6.28
Nbr Grains	1270.94	12.22	2023.18	23.75	1815.62	16.36	6576.98	44.16	7088.32	47.79
Poids Grain	0.005	16.09	0.012	35.15	0.013	40.6	0.011	38.61	0.006	17.88
Rendement	61.65	1.92	86.24	3.05	636.96	17.71	965.95	22.68	1768	38.4
Taux de protiéne	0.09	0.85	5.79	42.1	4.4	28.27	1.81	13.17	4.44	31.62
Essai irrigée										
Jours floraison	5	3.73	12	8.63	13	9.85	11	8.21	7	5.22
Jours Maturité	8	4.42	14	7.44	2	1.09	2	1.08	5	2.76
Nbr Grains	5017.92	33.11	4780.13	39.86	5640	36	3935.33	30.11	4978.28	36.99
Poids Grain	0.015	29.53	0.003	5.22	0.002	3.81	0.012	22.75	0.019	33.32
Rendement	4265.21	52.88	2531.52	42.99	2929.23	38.46	3178.12	45.95	4431	58.02
Taux de protiéne	2.7	20.53	7.62	49.25	2.04	15.47	1.66	12.16	4.76	33.12

5 Discussion

Pour le calibrage et la détermination des performances de l'APSIM NG pour prédire le développement des variétés de blé cultivées en Algérie dans deux systèmes d'irrigation différents (pluvial et irrigation supplémentaire) dans des conditions semi-arides.

Initialement, nous avons commencé par déterminer et calibrer les paramètres de génotype impliqués dans le développement et la production du blé sur la base de recherches antérieures dans le monde entier (Seidel et al., 2018), où nous avons fondé l'importance du calibrage dans l'intervalle thermique d'apparition des feuilles (Phyllochron), le nombre minimum de feuilles et la sensibilité à la photopériode, ainsi que le nombre des feuilles finales. Cela affecte l'accumulation de la température requise pour les différentes phases avant la floraison (ZHANG et al., 2023), C'est le nouveau algorithme phénoménologique utilisé par APSIM NG au lieu du APSIM classique.

Nous avons constaté que le nombre de jours (DAS) pour atteindre la floraison peut être déterminé par le minimum de feuilles produites, l'intervalle foliaire (Phyllochron) et la sensibilité à la photopériode, ainsi que l'inclusion du temps thermique entre l'épiaison et la floraison (EarlyFloweringTT) (ZHANG et al., 2023). Ce résultat a montré la différence entre l'APSIM NG et l'APSIM classique, où G. Zhao et al., (2014) ont montré en utilisant un Test de Sensibilité à l'Amplitude de Fourier étendue (EFAST) que la sensibilité à la vernalisation et au temps thermique de l'initiation florale à la floraison. Cela est dû au fait que dans le modèle APSIM classique, l'impact sur l'environnement de la culture est conçu principalement en fonction de l'accumulation des températures, de la photopériode et de la sensibilité au froid (Bangyou Zheng et al., 2015), tandis que le modèle APSIM NG améliore le modèle écologique d'origine, qui simule la période de floraison. Bien qu'il soit toujours motivé par l'accumulation de la température, la température accumulée ciblée entre le semis et la période de floraison n'est plus une valeur fixe, mais est déterminée en modifiant le nombre de feuilles dans la phase de vernalisation et la photopériode, ainsi que l'intervalle en temps thermique des feuilles (Brown, Huth, & Holzworth, 2014). De plus, l'inclusion de EarlyFloweringTT dans l'APSIM NG peut simuler plus précisément la période de fertilité du blé, tout en offrant aux chercheurs une certaine flexibilité dans le choix des indicateurs de fertilité (Sadeghi-Tehran et al., 2017).

Pour le DAS de maturité, cette étude confirme l'effet du temps thermique du début de la phase de remplissage des grains jusqu'à l'étape de fin du remplissage des graines, ainsi que du temps thermique du stade de la floraison jusqu'au stade d'initiation du remplissage (ZHANG et al.,

Utilisation d'APSIM Next Generation pour l'expression phénotypique des caractères quantitatifs du blé en Algérie.

2023), en excluant le temps thermique de la phase de fin de remplissage des grains jusqu'à la maturité et en choisissant la valeur par défaut.

Zhao et al., (2014) ont étudié la sensibilité des paramètres de la variété dans le modèle APSIM aux rendements dans différentes conditions de sol, d'engrais et de climat en Australie. Ils ont montré que les paramètres les plus sensibles pour le rendement sont le nombre de grains par gramme de la tige (`grains_per_gram_stem`), le poids potentiel du grain et le taux potentiel de remplissage des grains. Les trois paramètres de cette étude ayant le plus grand effet sur le rendement et leur composant étaient le nombre de grains par gramme de tige, le poids potentiel du grain et le phyllochron ; ces paramètres ont également été utilisés dans l'analyse de la sensibilité menée par ZHANG et al., (2023) en plus du taux initial de remplissage des grains. Dans cette étude, nous confirmons l'effet du nombre de grains par gramme de tige sur le rendement du blé via le nombre de grains, ainsi que le poids maximal des grains via le poids du grain, avec les effets du phyllochron sur les deux paramètres.

Pour la teneur en protéines des grains, nous avons constaté que l'effet de la teneur maximale en azote était le plus remarquable.

L'évaluation du modèle était dans une plage d'acceptation allant de très bonne à bonne dans le cadre d'une gestion d'irrigation différente. L'erreur pourrait être due à la faiblesse du modèle à simuler les dates de semis tardives (Zhang et al., 2012).

L'absence d'algorithme dans le modèle APSIM pour tenir compte de l'effet de l'émergence retardée sur le nombre de grains (De Silva S.H.N.P. & Okada, 2021) peut être interprétée comme une limite du modèle dans la prédiction du nombre de grains dans cette étude pour toutes les variétés. Seules MBB, Bousselem et Oued ElBared sous pluvial ont montré un meilleur indice de tolérance au stress (Berbache et al., 2024), qui améliore la capacité à atténuer l'effet de l'émergence retardée.

Le poids des grains sous-estimé par le modèle dans le traitement de l'irrigation a également été signalé par (Balwinder-Singh et al., 2011) et peut être dû à la capacité limitée du modèle à prédire la remobilisation des glucides stockés avant la floraison vers les grains. Cependant, la surestimation enregistrée dans l'état pluvial confirme l'excès de réponse d'APSIM à l'application d'azote et, par conséquent, la sous-estimation de la concentration de protéines dans les grains (Asseng et al., 2002).

Pour le rendement, le modèle a montré une incertitude dans les résultats de prédiction pour

Utilisation d'APSIM Next Generation pour l'expression phénotypique des caractères quantitatifs du blé en Algérie.

toutes les variétés dans le traitement d'irrigation, avec une gamme de NRMSE variant de 38 % à 58 %, tandis que dans la parcelle pluviale, la faiblesse du modèle a été enregistrée pour la variété Simito seulement. Pour les autres variétés, une bonne gamme d'acceptation de NRMSE de 1,92 à 22,68 a été observée. D'autres rapports tels que (Garrido-Lestache et al., 2004; Zhang et al., 2012; De Silva S.H.N.P. & Okada, 2021) qui ont procédé à la validation de l'APSIM sous diverses conditions, ont également rapporté une NRMSE comprise entre 7 et 16,5. La précision de ce modèle sur le rendement peut être interprétée par la forte relation avec le nombre de grains plutôt que le poids des grains (Duggan et al., 2000; Brancourt-Hulmel et al., 2003b; Boulelouah et al., 2022).

6 Conclusion

En conclusion, l'évaluation de l'APSIM NG pour prédire le développement et le rendement à la teneur en protéines des grains des variétés de blé cultivées en Algérie dans des conditions semi-arides, avec une gestion d'irrigation différenciée, a révélé plusieurs observations significatives. Tout d'abord, le calibrage des paramètres de génotype, notamment l'intervalle thermique d'apparition des feuilles, le nombre minimum de feuilles, la sensibilité à la photopériode, et d'autres, a été crucial pour améliorer la précision du modèle dans la simulation de la phénologie du blé. L'inclusion de nouveaux algorithmes phénoménologiques dans l'APSIM NG a permis une meilleure représentation des processus biophysiques impliqués dans le développement des cultures.

De plus, la sensibilité des paramètres de la variété, tels que le nombre de grains par gramme de tige, le poids potentiel du grain et le phyllochron, a été confirmée comme étant cruciale pour prédire le rendement du blé. Cependant, notre étude a révélé que des ensembles de données moins détaillés et plus petits affectent l'exactitude de la prédiction des modèles de cultures spécifiquement pour prédire sous plusieurs conditions d'environnement; pour cela des expérimentations sur une large échelle de temps et espaces sont nécessaires pour un bon calibrage.

Les résultats ont également montré une incertitude dans la prédiction du rendement, en particulier dans le traitement d'irrigation, avec des écarts significatifs de NRMSE entre les variétés. Cependant, malgré ces limites, l'APSIM NG a démontré une précision acceptable dans la plupart des cas.

Utilisation d'APSIM Next Generation pour l'expression phénotypique des caractères quantitatifs du blé en Algérie.

En résumé, cette étude met en évidence à la fois les forces et les faiblesses de l'APSIM NG dans la prédiction du rendement du blé dans des conditions semi-arides, fournissant des informations précieuses pour son utilisation future dans la gestion agricole et la prise de décision.

Conclusion générale

7 Conclusion générale :

Dans cette étude, nous avons entrepris une analyse systématique du développement phénologique du blé dur en intégrant le concept de temps thermique (degré-jour) et en explorant l'interaction entre ce dernier et la teneur en eau du sol (SWC). Nos résultats démontrent la pertinence et la robustesse de cette approche pour modéliser les différentes phases de développement phénologique. Toutefois, nous avons constaté une difficulté accrue dans la prédiction de stades critiques tels que la floraison, nécessitant des paramètres génétiques spécifiques au génotype, notamment la photopériode et la sensibilité à la vernalisation. Cette observation met en lumière la nécessité d'adapter les modèles phénologiques à la diversité génétique des variétés de blé dur pour une meilleure précision des prévisions.

Sur le plan agronomique, nos travaux mettent en évidence des corrélations significatives entre les phases phénologiques, la SWC, et l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE). Ces liens soulignent l'impact majeur de la gestion hydrique sur le rendement, en particulier dans des environnements semi-arides. Nous avons identifié des fenêtres critiques, telles que la période allant du semis à la levée, ainsi que celle s'étendant de l'épiaison à la floraison, où le maintien d'une teneur en eau optimale est crucial pour maximiser la productivité. Ces résultats renforcent l'importance de stratégies d'irrigation adaptatives et ciblées pour répondre aux besoins spécifiques des cultures de blé dur selon leurs phases de croissance.

L'étude des caractéristiques variétales a révélé que les variétés précoces, telles que **Simito** et **Vitron**, présentent un avantage en termes de rendement dans les environnements semi-arides, par rapport aux variétés tardives comme **MBB**. Cette différence souligne la nécessité de sélectionner des variétés adaptées aux conditions climatiques locales pour une meilleure synchronisation entre le cycle de croissance et les contraintes environnementales. Par ailleurs, nous recommandons des dates de semis précoces pour atténuer les impacts négatifs des températures élevées en fin de cycle et maximiser le potentiel de rendement.

En termes d'efficacité d'utilisation de l'azote (NUE), l'étude a mis en évidence des variations significatives entre les variétés, indiquant une forte interaction entre le NUE, le rendement, et la WUE. Ces résultats suggèrent que la gestion intégrée des ressources azotées et hydriques, en tenant compte des particularités génétiques des variétés, pourrait améliorer à la fois le rendement et la durabilité des cultures de blé dur. Enfin, nos investigations démontrent l'utilité des modèles de croissance dynamique, tels que **APSIM NG**, pour simuler le

Conclusion Générale

développement et le rendement des cultures de blé dur dans des contextes semi-arides. Cependant, nos résultats montrent qu'une calibration plus précise des modèles est nécessaire pour inclure des variables telles que les régimes d'irrigation et les données environnementales locales.

Cette étude met en exergue l'importance d'une gestion intégrée, combinant diversité génétique, conditions agro climatiques locales et optimisation des ressources en eau et en azote, pour garantir un rendement durable du blé dur dans des environnements semi-arides. Ces résultats apportent une contribution significative à l'élaboration de stratégies agricoles innovantes et résilientes face aux défis posés par le changement climatique.

Cette étude ouvre de nouvelles voies de recherche et d'applications pratiques pour améliorer la gestion et la productivité des cultures de blé dur, en particulier dans les environnements semi-arides. Les perspectives suivantes méritent d'être envisagées :

1. Affinement des modèles de croissance :

- Intégration de données plus précises sur la photopériode, la sensibilité à la vernalisation, et les interactions génotype-environnement pour améliorer la prédiction des stades critiques tels que la floraison.
- Développement d'algorithmes d'apprentissage automatique pour coupler les données météorologiques en temps réel aux modèles tels qu'**APSIM NG**, afin d'améliorer la précision des prédictions dans des conditions climatiques variables.

2. Approche intégrée de la gestion hydrique et azotée :

- Conception de systèmes d'irrigation de précision basés sur les phases phénologiques clés identifiées, afin d'optimiser la SWC et d'éviter les stress hydriques critiques.
- Exploration des interactions entre la teneur en eau du sol, la NUE, et la WUE pour élaborer des stratégies combinées de fertilisation et d'irrigation, maximisant ainsi l'efficacité des ressources naturelles.

3. Diversité génétique et amélioration variétale :

- Sélection et développement de nouvelles variétés adaptées aux environnements à contraintes multiples (stress hydrique et thermique), avec des cycles précoces et une meilleure efficacité d'utilisation des ressources.

- Étude des bases génétiques des traits complexes, comme la photopériode et la sensibilité à la vernalisation.

4. **Impact du changement climatique :**

- Évaluation des effets des scénarios climatiques futurs (augmentation des températures, variabilité des précipitations) sur le développement et le rendement du blé dur.
- Adaptation des modèles dynamiques pour inclure des projections climatiques régionales, afin de fournir des recommandations locales et adaptées.

5. **Applications agronomiques :**

- Élaboration de systèmes d'aide à la décision pour les agriculteurs, intégrant des outils numériques et des modèles prédictifs, pour une gestion optimale des dates de semis, des variétés, et des intrants agricoles.
- Promotion de pratiques agricoles durables (agriculture de conservation, agroforesterie) qui renforcent la résilience des systèmes de production dans les régions semi-arides.

6. **Études socio-économiques :**

- Analyse des impacts économiques de la mise en œuvre de pratiques optimisées de gestion hydrique et azotée, en prenant en compte les contraintes des petits exploitants agricoles.
- Développement de politiques agricoles et de subventions incitatives pour encourager l'adoption de variétés adaptées et de pratiques de gestion durables.

Ces perspectives, à la croisée de la recherche fondamentale et appliquée, visent à renforcer la durabilité des systèmes de production de blé dur tout en augmentant leur résilience face aux défis croissants posés par les changements climatiques et les contraintes environnementales.

Liste bibliographie :

- Aberkane, H., Amri, A., Belkadi, B., Filali-Maltouf, A., Valkoun, J., & Kehel, Z. (2021). Contribution of Wild Relatives to Durum Wheat (*Triticum turgidum* subsp. Durum) Yield Stability across Contrasted Environments. *Agronomy*, *11*(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/agronomy11101992>
- Ahmad, L., Habib Kanth, R., Parvaze, S., & Sheraz Mahdi, S. (2017). Growing Degree Days to Forecast Crop Stages. In L. Ahmad, R. Habib Kanth, S. Parvaze, & S. Sheraz Mahdi, *Experimental Agrometeorology: A Practical Manual* (pp. 95–98). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69185-5_14
- Aissaoui, M. R., & Fenni, M. (2021). Effect of supplemental irrigation on bread wheat genotypes yield under Mediterranean semi-arid conditions of north-eastern Algeria. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, *74*(1), 9431–9440.
- Aliasghar zad, N., Neyshabouri, M. R., & Salimi, G. (2006). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and *Bradyrhizobium japonicum* on drought stress of soybean. *Biologia*, *61*(19), S324–S328. <https://doi.org/10.2478/s11756-006-0182-x>
- Amokrane, A., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., Djekoun, A., & Mekhlouf, A. (2002). ETUDE COMPARATIVE DES VARIETES DE BLE DUR (TRITICUM DURUM DESF.) D'ORIGINE ALGERIENNE, SYRIENNE ET EUROPEENNE SOUS CLIMAT DE TYPE MEDITERRANEEN. *Sciences & Technologie. C, Biotechnologies*, 33–38.
- Amsal Tarekegne and Tanner, D. (2001). Effects of Fertilizer application on N and P uptake, recovery and use efficiency of bread wheat grown on two soil types in central Ethiopia. *Ethiopian Journal of Natural Resources*.
- Anbessa, Y., & Juskiw, P. (2012). Nitrogen Fertilizer Rate and Cultivar Interaction Effects on Nitrogen Recovery, Utilization Efficiency, and Agronomic Performance of Spring Barley. *ISRN Agronomy*, *2012*, 531647. <https://doi.org/10.5402/2012/531647>
- Araya, A., Prasad, P. V. V., Gowda, P. H., Kisekka, I., & Foster, A. J. (2019). Yield and Water Productivity of Winter Wheat under Various Irrigation Capacities. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, *55*(1), 24–37. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12721>
- Arregui, L. M., & Quemada, M. (2008). Strategies to Improve Nitrogen Use Efficiency in Winter Cereal Crops under Rainfed Conditions. *Agronomy Journal*, *100*(2), 277–284. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0187>

Liste bibliographique

- Aslam, M. A., Ahmed, M., Stöckle, C. O., Higgins, S. S., Hassan, F. ul, & Hayat, R. (2017a). Can Growing Degree Days and Photoperiod Predict Spring Wheat Phenology? *Frontiers in Environmental Science*, 5. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2017.00057>
- Aslam, M. A., Ahmed, M., Stöckle, C. O., Higgins, S. S., Hassan, F. ul, & Hayat, R. (2017b). Can Growing Degree Days and Photoperiod Predict Spring Wheat Phenology? *Frontiers in Environmental Science*, 5. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2017.00057>
- Assen, Y., & Debele, D. (2000). The effect of rate and time of N application on its uptake by bread wheat varieties and soil characteristics on farmers' fields. *Ethiopian Journal of Natural Resources*.
- Asseng, S., Bar-Tal, A., Bowden, J. W., Keating, B. A., Herwaarden, A. V., Palta, J. A., Huth, N. I., & Probert, M. E. (2002). Simulation of grain protein content with APSIM-Nwheat. *European Journal of Agronomy*, 16(1), 25–42. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(01\)00116-2](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(01)00116-2)
- Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R. P., Lobell, D. B., Cammarano, D., Kimball, B. A., Ottman, M. J., Wall, G. W., White, J. W., Reynolds, M. P., Alderman, P. D., Prasad, P. V. V., Aggarwal, P. K., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Challinor, A. J., De Sanctis, G., ... Zhu, Y. (2015). Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change*, 5(2), Article 2. <https://doi.org/10.1038/nclimate2470>
- Asseng, S., Ewert, F., Rosenzweig, C., Jones, J. W., Hatfield, J. L., Ruane, A. C., Boote, K. J., Thorburn, P. J., Rötter, R. P., Cammarano, D., Brisson, N., Basso, B., Martre, P., Aggarwal, P. K., Angulo, C., Bertuzzi, P., Biernath, C., Challinor, A. J., Doltra, J., ... Wolf, J. (2013). Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nature Climate Change*, 3(9), 827–832. <https://doi.org/10.1038/nclimate1916>
- Asseng, S., Foster, I., & Turner, N. C. (2011). The impact of temperature variability on wheat yields. *Global Change Biology*, 17(2), 997–1012. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02262.x>
- Asseng, S., Keulen, H. van, & Stol, W. (2000). Performance and application of the APSIM Nwheat model in the Netherlands. *European Journal of Agronomy*, 12(1), 37–54. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(99\)00044-1](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(99)00044-1)
- Balaghi, R. (2005). *Calcul sur Excel de l'évapotranspiration journalière par l'approche de Penman-Monteith*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2776.2409>

Liste bibliographique

- Balwinder-Singh, Gaydon, D. S., Humphreys, E., & Eberbach, P. L. (2011). The effects of mulch and irrigation management on wheat in Punjab, India—Evaluation of the APSIM model. *Field Crops Research*, *124*(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.04.016>
- Bangyou Zheng, Karine Chenu, Alastair Doherty, & Scott Chapman. (2015). *The APSIM-Wheat Module (7.5 R3008)*.
- Belete, F., Dechassa, N., Molla, A., & Tana, T. (2018). Effect of nitrogen fertilizer rates on grain yield and nitrogen uptake and use efficiency of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties on the Vertisols of central highlands of Ethiopia. *Agriculture & Food Security*, *7*(1), 78. <https://doi.org/10.1186/s40066-018-0231-z>
- Berbache, M. R., Hadjeb, A., Bedjaoui, H., Boulelouah, N., belguet, H., guemaz, S., & Taibi, M. (2024). Soil Water Content and Grain Yield Relationships in Some Algerian Wheat Varieties. *Tobacco Regulatory Science (TRS)*, 583–603.
- Bhausahab, D., Khose, S., & Mandage, M. (2021). *STUDY OF CROP WATER REQUIREMENT AND IRRIGATION SCHEDULING OF MAJOR CROPS GROWN IN AHMEDNAGAR DISTRICT*. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/YGWH3>
- BLACKSHAW, R. E. (2004). Application method of nitrogen fertilizer affects weed growth and competition with winter wheat. *Weed Biology and Management*, *4*(2), 103–113. <https://doi.org/10.1111/j.1445-6664.2004.00126.x>
- Blackshaw, R. E. (2005). Nitrogen Fertilizer, Manure, and Compost Effects on Weed Growth and Competition with Spring Wheat. *Agronomy Journal*, *97*(6), 1612–1621. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0155>
- Blankenau, K., Olf, H.-W., & Kuhlmann, H. (2002). Strategies to Improve the Use Efficiency of Mineral Fertilizer Nitrogen Applied to Winter Wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *188*(3), 146–154. <https://doi.org/10.1046/j.1439-037X.2002.00548.x>
- Boulelouah, N., Berbache, M., Bedjaoui, H., Selama, N., & Rebouh, N. (2022). Influence of Nitrogen Fertilizer Rate on Yield, Grain Quality and Nitrogen Use Efficiency of Durum Wheat (*Triticum durum* Desf) under Algerian Semiarid Conditions. *Agriculture*, *12*(11), 1937. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111937>
- Bouregaa, T. (2019). Impact of climate change on yield and water requirement of rainfed crops in the Setif region. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, *30*(4), 851–863. <https://doi.org/10.1108/MEQ-06-2018-0110>

Liste bibliographique

- Brancourt-Hulmel, M., Doussinault, G., Lecomte, C., Bérard, P., Le Buanec, B., & Trottet, M. (2003a). Genetic Improvement of Agronomic Traits of Winter Wheat Cultivars Released in France from 1946 to 1992. *Crop Science*, 43(1), 37–45. <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.3700>
- Brancourt-Hulmel, M., Doussinault, G., Lecomte, C., Bérard, P., Le Buanec, B., & Trottet, M. (2003b). Genetic Improvement of Agronomic Traits of Winter Wheat Cultivars Released in France from 1946 to 1992. *Crop Science*, 43(1), 37–45. <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.3700>
- Brown, H. E., Huth, N. I., & Holzworth, D. P. (2014). *The APSIM Wheat Model*. <https://builds.apsim.info/api/nextgen/docs/Wheat.pdf>
- Brown, H. E., Huth, N. I., Holzworth, D. P., Teixeira, E. I., Zyskowski, R. F., Hargreaves, J. N. G., & Moot, D. J. (2014). Plant Modelling Framework: Software for building and running crop models on the APSIM platform. *Environ. Model. Softw.*, 62, 385–398.
- Burt, C. M., Clemmens, A. J., Strelkoff, T. S., Solomon, K. H., Bliesner, R. D., Hardy, L. A., Howell, T., & Eisenhauer, D. E. (1997). Irrigation Performance Measures: Efficiency and Uniformity. *Biological Systems Engineering: Papers and Publications*. <https://digitalcommons.unl.edu/biosysengfacpub/38>
- Calderini, D. F., Abeledo, L. G., Savin, R., & Slafer, G. A. (1999). *Effect of temperature and carpel size during pre-anthesis on potential grain weight in wheat*. <http://hdl.handle.net/10459.1/30337>
- Calderini, D. F., Reynolds, M. P., & Slafer, G. A. (2006). Source–sink effects on grain weight of bread wheat, durum wheat, and triticale at different locations. *Australian Journal of Agricultural Research*, 57(2), 227–233. <https://doi.org/10.1071/AR05107>
- Challinor, A. J., Slingo, J. M., Wheeler, T. R., Craufurd, P. Q., & Grimes, D. I. F. (2003). Toward a Combined Seasonal Weather and Crop Productivity Forecasting System: Determination of the Working Spatial Scale. *Journal of Applied Meteorology*, 42(2), 175–192. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2003\)042<0175:TACSWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042<0175:TACSWA>2.0.CO;2)
- Chawla, R., & Balasaheb, K. S. (2023). Optimizing Water Use Efficiency and Yield of Wheat Crops through Integrated Irrigation and Nitrogen Management: A Comprehensive Review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(11), 4059–4067. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i113585>

Liste bibliographique

- Chourghal, N., Lhomme, J. P., Huard, F., & Aidaoui, A. (2016a). Climate change in Algeria and its impact on durum wheat. *Regional Environmental Change*, *16*(6), 1623–1634. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0889-8>
- Chourghal, N., Lhomme, J. P., Huard, F., & Aidaoui, A. (2016b). Climate change in Algeria and its impact on durum wheat. *Regional Environmental Change*, *16*(6), 1623–1634. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0889-8>
- Chowdhury, M. K., Hasan, M. A., Bahadur, M. M., Islam, M. R., Hakim, M. A., Iqbal, M. A., Javed, T., Raza, A., Shabbir, R., Sorour, S., Elsanafawy, N. E. M., Anwar, S., Alamri, S., Sabagh, A. E., & Islam, M. S. (2021). Evaluation of Drought Tolerance of Some Wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes through Phenology, Growth, and Physiological Indices. *Agronomy*, *11*(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091792>
- Condon, A. G. (2004). Breeding for high water-use efficiency. *Journal of Experimental Botany*, *55*(407), 2447–2460. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh277>
- Cosentino, S. L., Sanzone, E., Testa, G., Patanè, C., Anastasi, U., & Scordia, D. (2019). Does post-anthesis heat stress affect plant phenology, physiology, grain yield and protein content of durum wheat in a semi-arid Mediterranean environment? *Journal of Agronomy and Crop Science*, *205*(3), 309–323. <https://doi.org/10.1111/jac.12323>
- Cramer, C. S., Wehner, T. C., & Donaghy, S. B. (1999). *PATHSAS: A SAS Computer Program for Path Coefficient Analysis of Quantitative Data*.
- Crews, T. E., & Peoples, M. B. (2004). Legume versus fertilizer sources of nitrogen: Ecological tradeoffs and human needs. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *102*(3), 279–297. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.018>
- Dawson, J. C., Huggins, D. R., & Jones, S. S. (2008). Characterizing nitrogen use efficiency in natural and agricultural ecosystems to improve the performance of cereal crops in low-input and organic agricultural systems. *Field Crops Research*, *107*(2), 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.01.001>
- De Silva S.H.N.P., T. T., & Okada, K. (2021). Evaluation of APSIM-wheat to simulate the response of yield and grain protein content to nitrogen application on an Andosol in Japan. *Plant Production Science*, *24*(4), 454–465. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2021.1883989>
- Dhima, K., & Eleftherohorinos, I. (2005). Wild Mustard (*Sinapis arvensis* L.) Competition with Three Winter Cereals as Affected by Nitrogen Supply. *Journal of*

Liste bibliographie

- Agronomy and Crop Science*, 191(4), 241–248. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2005.00152.x>
- Dhima, K. V., & Eleftherohorinos, I. G. (2001). Influence of nitrogen on competition between winter cereals and sterile oat. *Weed Science*, 49(1), 77–82. Cambridge Core. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2001\)049\[0077:IONOCB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2001)049[0077:IONOCB]2.0.CO;2)
 - Direction des Statistiques Agricoles et des Systèmes d'Information. (2019). *Statistique agricole (SUPERFICIES ET PRODUCTIONS) SERIE "b"2019*. Direction des Systèmes d'Information, des Statistiques et de la Prospective.
 - Dong, B., Shi, L., Shi, C., Qiao, Y., Liu, M., & Zhang, Z. (2011). Grain yield and water use efficiency of two types of winter wheat cultivars under different water regimes. *Agricultural Water Management*, 99(1), 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.07.013>
 - Drinkwater, L. E., Wagoner, P., & Sarrantonio, M. (1998). Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. *Nature*, 396(6708), 262–265. <https://doi.org/10.1038/24376>
 - Duggan, B. L., Domitruk, D. R., & Fowler, D. B. (2000). Yield component variation in winter wheat grown under drought stress. *Canadian Journal of Plant Science*, 80(4), 739–745. <https://doi.org/10.4141/P00-006>
 - Eck, H. V. (1988). Winter Wheat Response to Nitrogen and Irrigation. *Agronomy Journal*, 80(6), 902–908. <https://doi.org/10.2134/agronj1988.00021962008000060013x>
 - Eickhout, B., Bouwman, A., & Vanzeijts, H. (2006). The role of nitrogen in world food production and environmental sustainability. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 116(1–2), 4–14. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.03.009>
 - El-Beltagy, A., & Madkour, M. (2012). Impact of climate change on arid lands agriculture. *Agriculture & Food Security*, 1(1), Article 1. <https://doi.org/10.1186/2048-7010-1-3>
 - El-Hashash, E. F., Abou El-Enin, M. M., Abd El-Mageed, T. A., Attia, M. A. E.-H., El-Saadony, M. T., El-Tarabily, K. A., & Shaaban, A. (2022). Bread Wheat Productivity in Response to Humic Acid Supply and Supplementary Irrigation Mode in Three Northwestern Coastal Sites of Egypt. *Agronomy*, 12(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/agronomy12071499>

Liste bibliographie

- Ercoli, L., Masoni, A., Pampana, S., Mariotti, M., & Arduini, I. (2013). As durum wheat productivity is affected by nitrogen fertilisation management in Central Italy. *European Journal of Agronomy*, *44*, 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.08.005>
- Erekul, O., Gotz, K.-P., & Gurbuz, T. (2012). *MAKING QUALITY OF WHEAT (Triticum aestivum L.) VARIETIES UNDER*.
- Evans, R. G., & Sadler, E. J. (2008). Methods and technologies to improve efficiency of water use: INCREASING WATER USE EFFICIENCIES. *Water Resources Research*, *44*(7). <https://doi.org/10.1029/2007WR006200>
- Fageria, N. K. (2008). *The Use of Nutrients in Crop Plants*. Taylor & Francis. <https://books.google.dz/books?id=VFREmQEACAAJ>
- Fageria, N. K. (2014). NITROGEN HARVEST INDEX AND ITS ASSOCIATION WITH CROP YIELDS. *Journal of Plant Nutrition*, *37*(6), 795–810. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.881855>
- Fageria, N. K., & Baligar, V. C. (2005). Enhancing Nitrogen Use Efficiency in Crop Plants. In *Advances in Agronomy* (Vol. 88, pp. 97–185). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)88004-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)88004-6)
- Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Li, Y. C. (2008). The Role of Nutrient Efficient Plants in Improving Crop Yields in the Twenty First Century. *Journal of Plant Nutrition*, *31*(6), 1121–1157. <https://doi.org/10.1080/01904160802116068>
- FAOSTAT. (2023). <https://www.fao.org/faostat/fr/#data/OA>
- FAOSTAT. (2024a). <https://www.fao.org/faostat/fr/?#data/QCL>
- FAOSTAT. (2024b). <https://www.fao.org/faostat/fr/?#data/RFN>
- Feldman, M. J., Ellsworth, P. Z., Fahlgren, N., Gehan, M. A., Cousins, A. B., & Baxter, I. (2018). Components of Water Use Efficiency Have Unique Genetic Signatures in the Model C4 Grass *Setaria*1[OPEN]. *Plant Physiology*, *178*(2), 699–715. <https://doi.org/10.1104/pp.18.00146>
- Fernandez, G. C. J. (Ed.). (1992). Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. *Adaptation of Food Crops to Temperature and Water Stress*. <https://doi.org/10.22001/wvc.72511>
- Fletcher, A., Christopher, J., Hunter, M., Rebetzke, G., & Chenu, K. (2018). A low-cost method to rapidly and accurately screen for transpiration efficiency in wheat. *Plant Methods*, *14*(1), 77. <https://doi.org/10.1186/s13007-018-0339-y>
- FOULKES, M. J., SYLVESTER-BRADLEY, R., & SCOTT, R. K. (1998). Evidence for differences between winter wheat cultivars in acquisition of soil mineral nitrogen

Liste bibliographie

- and uptake and utilization of applied fertilizer nitrogen. *The Journal of Agricultural Science*, 130(1), 29–44. Cambridge Core. <https://doi.org/10.1017/S0021859697005029>
- Fowler, D. (2018). *Winter Wheat Production Manual Ch 10: Growth Stages of Wheat*.
 - Garrido-Lestache, E., López-Bellido, R. J., & López-Bellido, L. (2004). Effect of N rate, timing and splitting and N type on bread-making quality in hard red spring wheat under rainfed Mediterranean conditions. *Field Crops Research*, 85(2), 213–236. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(03\)00167-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00167-9)
 - Gauer, L. E., Grant, C. A., Bailey, L. D., & Gehl, D. T. (1992). Effects of nitrogen fertilization on grain protein content, nitrogen uptake, and nitrogen use efficiency of six spring wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars, in relation to estimated moisture supply. *Canadian Journal of Plant Science*, 72(1), 235–241. <https://doi.org/10.4141/cjps92-026>
 - Giambalvo, D., Ruisi, P., Di Miceli, G., Frenda, A. S., & Amato, G. (2010). Nitrogen Use Efficiency and Nitrogen Fertilizer Recovery of Durum Wheat Genotypes as Affected by Interspecific Competition. *Agronomy Journal*, 102(2), 707–715. <https://doi.org/10.2134/agronj2009.0380>
 - Gouis, J. L., Béghin, D., Heumez, E., & Pluchard, P. (2000). Genetic differences for nitrogen uptake and nitrogen utilisation efficiencies in winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 12(3), 163–173. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00045-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00045-9)
 - Guarda, G., Padovan, S., & Delogu, G. (2004). Grain yield, nitrogen-use efficiency and baking quality of old and modern Italian bread-wheat cultivars grown at different nitrogen levels. *European Journal of Agronomy*, 21(2), 181–192. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2003.08.001>
 - Gweyi-Onyango, J. P. (2018). *EFFECTS OF NITROGEN LEVELS ON YIELD AND NITROGEN UTILIZATION EFFICIENCIES OF TWO RICE VARIETIES IN KIRINYAGA COUNTY, KENYA*.
 - Hao, S., Ryu, D., Western, A. W., Perry, E., Bogen, H., & Franssen, H. J. H. (2024). Global sensitivity analysis of APSIM-wheat yield predictions to model parameters and inputs. *Ecological Modelling*, 487, 110551. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110551>
 - Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10, 4–10. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>

Liste bibliographie

- Hijmans, R. J., Guarino, L., Cruz, M. M., & Rojas, E. (2001). *Computer tools for spatial analysis of plant genetic resources data: 1. DIVA-GIS*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:16202567>
- Hirel, B., Bertin, P., Quilleré, I., Bourdoncle, W., Attagnant, C., Dellay, C., Gouy, A., Cadiou, S., Retailiau, C., Falque, M., & Gallais, A. (2001). Towards a Better Understanding of the Genetic and Physiological Basis for Nitrogen Use Efficiency in Maize. *Plant Physiology*, *125*(3), 1258–1270. <https://doi.org/10.1104/pp.125.3.1258>
- Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2007). The water footprints of Morocco and the Netherlands: Global water use as a result of domestic consumption of agricultural commodities. *Ecological Economics*, *64*(1), 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.02.023>
- Holzworth, D., Huth, N. I., Fainges, J., Brown, H., Zurcher, E., Cichota, R., Verrall, S., Herrmann, N. I., Zheng, B., & Snow, V. (2018). APSIM Next Generation: Overcoming challenges in modernising a farming systems model. *Environmental Modelling & Software*, *103*, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.02.002>
- Holzworth, D. P., Huth, N. I., deVoil, P. G., Zurcher, E. J., Herrmann, N. I., McLean, G., Chenu, K., Oosterom, E. J. van, Snow, V., Murphy, C., Moore, A. D., Brown, H., Whish, J. P. M., Verrall, S., Fainges, J., Bell, L. W., Peake, A. S., Poulton, P. L., Hochman, Z., ... Keating, B. A. (2014). APSIM – Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. *Environmental Modelling & Software*, *62*, 327–350. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.009>
- Holzworth, D. P., Snow, V., Janssen, S., Athanasiadis, I. N., Donatelli, M., Hoogenboom, G., White, J. W., & Thorburn, P. (2015). Agricultural production systems modelling and software: Current status and future prospects. *Environmental Modelling & Software*, *72*, 276–286. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.12.013>
- Howell, T. A. (2001). Enhancing Water Use Efficiency in Irrigated Agriculture. *Agronomy Journal*, *93*(2), 281–289. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.932281x>
- ISO 5983-2. (2009). *Aliments des animaux—Dosage de l’azote et calcul de la teneur en protéines brutes—Partie 2: Méthode de digestion en bloc et distillation à la vapeur*. <https://www.iso.org/fr/standard/52199.html>
- Jamieson, P. D., Semenov, M. A., Brooking, I. R., & Francis, G. S. (1998). Sirius: A mechanistic model of wheat response to environmental variation. *European Journal of Agronomy*, *8*(3), 161–179. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(98\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(98)00020-3)

Liste bibliographie

- Jensen, N. (1978). Limits to Growth in World Food Production. *Science*, 201(4353), 317–320. <https://doi.org/10.1126/science.663657>
- Jeremy Whish. (2016). *Assessing and using day degrees in field crops as a tool to assist crop management* [Assessing and using day degrees in field crops as a tool to assist crop management]. Grains Research and Development Corporation; Grains Research and Development Corporation. <https://grdc.com.au/resources-and-publications/grdc-update-papers/tab-content/grdc-update-papers/2016/02/accessing-and-using-day-degrees-in-field-crops-as-a-tool-to-assist-crop-management>
- Jin, X., Yang, G., Xue, X., Xu, X., Li, Z., & Feng, H. (2017). Validation of two Huanjing-1A/B satellite-based FAO-56 models for estimating winter wheat crop evapotranspiration during mid-season. *Agricultural Water Management*, 189, 27–38. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.04.017>
- Jogaiah, S., Govind, S. R., & Tran, L.-S. P. (2013). Systems biology-based approaches toward understanding drought tolerance in food crops. *Critical Reviews in Biotechnology*, 33(1), 23–39. <https://doi.org/10.3109/07388551.2012.659174>
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., & Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18(3), 235–265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)
- Kang, S., Zhang, L., Liang, Y., Hu, X., Cai, H., & Gu, B. (2002). Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 55(3), 203–216. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(01\)00180-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(01)00180-9)
- Keating, B. A., Carberry, P. S., Hammer, G. L., Probert, M. E., Robertson, M. J., Holzworth, D., Huth, N. I., Hargreaves, J. N. G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J. P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K. L., Asseng, S., ... Smith, C. J. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18(3), 267–288. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00108-9)
- Khaeim, H., Kende, Z., Balla, I., Gyuricza, C., Eser, A., & Tarnawa, Á. (2022). The Effect of Temperature and Water Stresses on Seed Germination and Seedling Growth of Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Sustainability*, 14(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/su14073887>

Liste bibliographie

- Kijne, J. W., Barker, R., & Molden, D. J. (Eds.). (2003). *Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement*. CABI Pub.
- Klepper, B. (n.d.). *GROWING-DEGREE DAYS AND DEVELOPMENT OF THE WHEAT PLANT*.
- Kumar, U., Hansen, E. M., Thomsen, I. K., & Vogeler, I. (2023). Performance of APSIM to Simulate the Dynamics of Winter Wheat Growth, Phenology, and Nitrogen Uptake from Early Growth Stages to Maturity in Northern Europe. *Plants*, 12(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/plants12050986>
- Ladha, J. K., Pathak, H., J. Krupnik, T., Six, J., & Van Kessel, C. (2005). Efficiency of Fertilizer Nitrogen in Cereal Production: Retrospects and Prospects. In *Advances in Agronomy* (Vol. 87, pp. 85–156). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)87003-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)87003-8)
- Lamba, K., Kumar, M., Singh, V., Chaudhary, L., Sharma, R., Yashveer, S., & Dalal, M. S. (2023). Heat stress tolerance indices for identification of the heat tolerant wheat genotypes. *Scientific Reports*, 13(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37634-8>
- Leenhardt, D., & Voltz, M. (2020). Chapitre 1—Les impacts réciproques de l’agriculture et de la ressource en eau. In O. Barreteau (Ed.), *L’eau en milieu agricole: Outils et méthodes pour une gestion intégrée et territoriale* (pp. 19–36). Éditions Quæ. <https://books.openedition.org/quæ/37270>
- Li, F., Kang, S., & Zhang, J. (2004). Interactive effects of elevated CO₂, nitrogen and drought on leaf area, stomatal conductance, and evapotranspiration of wheat. *Agricultural Water Management*, 67(3), 221–233. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.01.005>
- Limaux, F., Recous, S., Meynard, J.-M., & Guckert, A. (1999). Relationship between rate of crop growth at date of fertiliser N application and fate of fertiliser N applied to winter wheat. *Plant and Soil*, 214(1), 49–59. <https://doi.org/10.1023/A:1004629511235>
- Litke, L., Gaile, Z., & Ruža, A. (2018). Effect of nitrogen fertilization on winter wheat yield and yield quality. *Agronomy Research*, 16, 500–509. <https://doi.org/10.15159/AR.18.064>
- Littleboy, M. (Ed.). (1989). *Perfect, a computer simulation model of productivity erosion runoff functions to evaluate conservation techniques /*. Queensland Dept. of Primary Industries,.

Liste bibliographie

- Lopez-Bellido, R. J., Shepherd, C. E., & Barraclough, P. B. (2004). Predicting post-anthesis N requirements of bread wheat with a Minolta SPAD meter. *European Journal of Agronomy*, 20(3), 313–320. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(03\)00025-X](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(03)00025-X)
- Man, J., Shi, Y., Yu, Z., & Zhang, Y. (2016). Root growth, soil water variation, and grain yield response of winter wheat to supplemental irrigation. *Plant Production Science*, 19(2), 193–205. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2015.1128097>
- Martin Smith, R. Allen, J. L. Monteit, A. Perrier, L. Santos Pereira, & A. Segeren. (1990). *EXPERT CONSULTATION ON REVISION OF FAO METHODOLOGIES FOR CROP WATER REQUIREMENTS* (p. 68). FAO.
- McCown, R. L., Hammer, G. L., Hargreaves, J. N. G., Holzworth, D. P., & Freebairn, D. M. (1996). APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems*, 50(3), 255–271. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(94\)00055-V](https://doi.org/10.1016/0308-521X(94)00055-V)
- McCown, R. L., & Williams, J. (1989). *AUSIM: A cropping systems model for operational research. Simulation Society of Australia and International Association for Mathematics and Computers. In: Simulation 1989, Biennial Conference on Modelling and Simulation, Australian National University, Canberra, 25-27 September 1989. PDF.*
- McKeon, G. M., Day, K. A., Howden, S. M., Mott, J. J., Orr, D. M., Scattini, W. J., & Weston, E. J. (1990). Northern Australian Savannas: Management for Pastoral Production. *Journal of Biogeography*, 17(4/5), 355–372. <https://doi.org/10.2307/2845365>
- McMaster, G. (1997). Growing degree-days: One equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87(4), 291–300. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00027-0)
- Moll, R. H., Kamprath, E. J., & Jackson, W. A. (1981). *Analysis and Interpretation of Factors Which Contribute to Efficiency of Nitrogen Utilization*.
- Moore, A. D., Holzworth, D. P., Herrmann, N. I., Huth, N. I., & Robertson, M. J. (2007). The Common Modelling Protocol: A hierarchical framework for simulation of agricultural and environmental systems. *Agricultural Systems*, 95(1), 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2007.03.006>
- Morison, J. I. L., Baker, N. R., Mullineaux, P. M., & Davies, W. J. (2008). Improving Water Use in Crop Production. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 363(1491), 639–658.

Liste bibliographie

- Moteva, M., & Kostadinov, G. (2019). *Optimum use of the irrigational water in a wide-spaced irrigation technology*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:231878499>
- Noureldin, N. A., Saady, H. S., Ashmawy, F., & Saed, H. M. (2013). Grain yield response index of bread wheat cultivars as influenced by nitrogen levels. *Annals of Agricultural Sciences*, 58(2), 147–152.
- Öborn, I., Edwards, A. C., Witter, E., Oenema, O., Ivarsson, K., Withers, P. J. A., Nilsson, S. I., & Stinzing, A. R. (2003). Element balances as a tool for sustainable nutrient management: A critical appraisal of their merits and limitations within an agronomic and environmental context. *European Journal of Agronomy*, 20(1–2), 211–225. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(03\)00080-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(03)00080-7)
- Panfilova, A., Korkhova, M., & Markova, N. (2023). Influence of biologics on the productivity of winter wheat varieties under irrigation conditions. *Notulae Scientiae Biologicae*, 15(2), Article 2. <https://doi.org/10.55779/nsb15211352>
- Passioura, J. B. (1996). Simulation Models: Science, Snake Oil, Education, or Engineering? *Agronomy Journal*, 88(5), 690–694. <https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800050002x>
- Pimentel, D., Berger, B., Newton, M., Wolfe, B., Karabinakis, E., Clark, S., Poon, E., Abbett, E., & Nandagopal, S. (2004). *Water Resources, Agriculture and the Environment*.
- Porporato, A., Daly, E., & Rodriguez-Iturbe, I. (2004). Soil Water Balance and Ecosystem Response to Climate Change. *The American Naturalist*, 164(5), 625–632. <https://doi.org/10.1086/424970>
- Poudel, P. B., Poudel, M. R., & Puri, R. R. (2021). Evaluation of heat stress tolerance in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes using stress tolerance indices in western region of Nepal. *Journal of Agriculture and Food Research*, 5, 100179. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100179>
- Puri, R. R., Gautam, N. R., & Joshi, A. K. (2015). Exploring stress tolerance indices to identify terminal heat tolerance in spring wheat in Nepal. *Journal of Wheat Research*.
- Qi, A., Murray, P. J., & Richter, G. M. (2017). Modelling productivity and resource use efficiency for grassland ecosystems in the UK. *European Journal of Agronomy*, 89, 148–158. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.05.002>
- Qiu, G. Y., Wang, L., He, X., Zhang, X., Chen, S., Chen, J., & Yang, Y. (2008). Water use efficiency and evapotranspiration of winter wheat and its response to irrigation

Liste bibliographie

- regime in the north China plain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(11), 1848–1859. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.06.010>
- Raun, W. R., & Johnson, G. V. (1999a). Improving Nitrogen Use Efficiency for Cereal Production. *Agronomy Journal*, 91(3), 357–363. <https://doi.org/10.2134/agronj1999.00021962009100030001x>
 - Raun, W. R., & Johnson, G. V. (1999b). Improving Nitrogen Use Efficiency for Cereal Production. *Agronomy Journal*, 91(3), 357–363. <https://doi.org/10.2134/agronj1999.00021962009100030001x>
 - Raun, W. R., Johnson, G. V., & Westerman, R. L. (1999). Fertilizer Nitrogen Recovery in Long-Term Continuous Winter Wheat. *Soil Science Society of America Journal*, 63(3), 645–650. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.03615995006300030030x>
 - Richard G. ALLEN, Luis S. PEREIRA, Dirk RAES, & Martin SMITH. (2006). *Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)* (56; p. 333). FAO.
 - Rui Guo, Wei Ping Hao, Dao Zhi Gong, Xui Li Zhong, & Feng Xue Gu. (2013). *Soil Processes and Current Trends in Quality Assessment*. https://books.google.com/books/about/Soil_Processes_and_Current_Trends_in_Qua.html?hl=fr&id=PmOfDwAAQBAJ
 - Sadeghi-Tehran, P., Sabermanesh, K., Virlet, N., & Hawkesford, M. J. (2017). Automated Method to Determine Two Critical Growth Stages of Wheat: Heading and Flowering. *Frontiers in Plant Science*, 8, 252. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00252>
 - Saiyed, I. M., Bullock, P. R., Sapirstein, H. D., Finlay, G. J., & Jarvis, C. K. (2009). Thermal time models for estimating wheat phenological development and weather-based relationships to wheat quality. *Canadian Journal of Plant Science*, 89(3), 429–439. <https://doi.org/10.4141/CJPS07114>
 - Sawsen Ayadi. (2016). *Genetic variability of Nitrogen Use Efficiency components in Tunisian improved genotypes and landraces of durum wheat*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4907.2401>
 - Seidel, S., Palosuo, T., Thorburn, P., & Wallach, D. (2018). Towards improved calibration of crop models – Where are we now and where should we go? *European Journal of Agronomy*, 94, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.01.006>
 - Shashank Shekhar, A. M., Damodhara Rao Mailapalli, Bhabani Sankar Das, & Raghuwanshi, N. S. (2021). Hydrus-1D for Simulating Potassium Transport in Flooded

Liste bibliographique

- Paddy Soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(22), 2803–2820. <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1966437>
- Shekhar, S., Dubey, A., & Pohshna, C. (2018). Estimation of Irrigation Scheduling for Different Cropping Pattern at Different Growth Stage of Crop by using the CROPWAT Model. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(08), 3855–3862. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.708.395>
 - Shekhar, S., Mailapalli, D. R., Das, B. S., & Raghuwanshi, N. S. (2017). Modelling Water Flow through Paddy Soils under Alternate Wetting and Drying Irrigation Practice. *AGU Fall Meeting Abstracts, 2017*, H43Q-07.
 - Shekhar, S., Mailapalli, D. R., & Raghuwanshi, N. S. (2021). Simulating nitrogen transport in paddy crop irrigated with alternate wetting and drying practice. *Paddy and Water Environment*, 19(3), 499–513. <https://doi.org/10.1007/s10333-021-00850-x>
 - Silva, J. A., Uchida, R. S., Agriculture, U. of H. at M. C. of T., & Resources, H. (2000). *Plant Nutrient Management in Hawaii's Soils: Approaches for Tropical and Subtropical Agriculture*. College of Tropical Agriculture & Human Resources, University of Hawaii at Manoa. <https://books.google.dz/books?id=Q6LSGwAACAAJ>
 - Singh, U., Ladha, J. K., Castillo, E. G., Punzalan, G., Tirol-Padre, A., & Duqueza, M. (1998). Genotypic variation in nitrogen use efficiency in medium- and long-duration rice. *Field Crops Research*, 58(1), 35–53. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00084-7](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00084-7)
 - Smil, V. (2000). *Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production*. The MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/2767.001.0001>
 - Souissi, A., & Bahri, H. (2018). *Une méta-analyse sur les effets de la fertilisation azotée sur le rendement et l'efficience de l'utilisation de l'azote chez le blé dur en Tunisie*. 91.
 - Sylvester-Bradley, R., & Kindred, D. R. (2009). Analysing nitrogen responses of cereals to prioritize routes to the improvement of nitrogen use efficiency. *Journal of Experimental Botany*, 60(7), 1939–1951. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp116>
 - Tadayon, M. R., Ebrahimi, R., & Tadayyon, A. (2012). *Increased Water Productivity of Wheat under Supplemental Irrigation and Nitrogen Application in a Semi-arid Region*.
 - Tardieu, F. (2013). Plant response to environmental conditions: Assessing potential production, water demand, and negative effects of water deficit. *Frontiers in Physiology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00017>

Liste bibliographique

- Teixeira, E. I., George, M., Herreman, T., Brown, H., Fletcher, A., Chakwizira, E., de Ruiter, J., Maley, S., & Noble, A. (2014). The impact of water and nitrogen limitation on maize biomass and resource-use efficiencies for radiation, water and nitrogen. *Field Crops Research*, *168*, 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.08.002>
- Timsina, J., & Humphreys, E. (2006). Performance of CERES-Rice and CERES-Wheat models in rice–wheat systems: A review. *Agricultural Systems*, *90*(1), 5–31. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2005.11.007>
- Ugarte, C., Calderini, D. F., & Slafer, G. A. (2007). Grain weight and grain number responsiveness to pre-anthesis temperature in wheat, barley and triticale. *Field Crops Research*, *100*(2), 240–248. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.07.010>
- Ullah, H., Santiago-Arenas, R., Ferdous, Z., Attia, A., & Datta, A. (2019). Chapter Two—Improving water use efficiency, nitrogen use efficiency, and radiation use efficiency in field crops under drought stress: A review. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 156, pp. 109–157). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.02.002>
- Vagusevičienė, I., Burbulis, N., Jonytienė, V., & Vasinauskienė, R. (2012). Influence of nitrogen fertilization on winter wheat physiological parameters and productivity. *Journal of Food, Agriculture & Environment. Helsinki : WFL Publisher, 2012, Vol. 10, No. 3-4*. <http://www.isfae.org/scientificjournal/2012/issue3/pdf/Agriculture/91.pdf>
- Vikrant Khare. (2022). Multivariate analysis and role of direct–indirect effect for yield and its component traits in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *ELECTRONIC JOURNAL OF PLANT BREEDING*. <https://doi.org/10.37992/2022.1302.045>
- Viscarra Rossel, R., & Mcbratney, A. (1998). Soil chemical analytical accuracy and costs: Implications from Precision Agriculture. *AUSTRALIAN JOURNAL OF EXPERIMENTAL AGRICULTURE*, *38*, 765–775. <https://doi.org/10.1071/EA97158>
- Wallach, D. (2011). Crop Model Calibration: A Statistical Perspective. *Agronomy Journal*, *103*, 1144–1151.
- Wallach, D., Makowski, D., & Jones, J. W. (Eds.). (2006). *Working with dynamic crop models: Evaluation, analysis, parameterization, and applications* (1st ed). Elsevier.
- Wang, B., Liu, D. L., Asseng, S., Macadam, I., & Yu, Q. (2015). Impact of climate change on wheat flowering time in eastern Australia. *Agricultural and Forest Meteorology*, *209–210*, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.04.028>
- Wang, E., Brown, H. E., Rebetzke, G. J., Zhao, Z., Zheng, B., & Chapman, S. C. (2019). Improving process-based crop models to better capture

Liste bibliographique

- genotype×environment×management interactions. *Journal of Experimental Botany*, 70(9), 2389–2401. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz092>
- Wang, H., Fan, J., & Fu, W. (2022). Effect of Activated Water Irrigation on the Yield and Water Use Efficiency of Winter Wheat under Irrigation Deficit. *Agronomy*, 12(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061315>
 - *Water in Agriculture*. (2023). [Text/HTML]. World Bank. <https://www.worldbank.org/en/topic/water-in-agriculture>
 - Wit, C. T. de, Brouwer, R., & Vries, F. W. T. P. de. (1970). The simulation of photosynthetic systems. *Proceedings of the IBP/PP Technical Meeting, Trebon, 14-21 September 1969*, 47–70. <https://research.wur.nl/en/publications/the-simulation-of-photosynthetic-systems>
 - Wolkovich, E. M., Cook, B. I., Allen, J. M., Crimmins, T. M., Betancourt, J. L., Travers, S. E., Pau, S., Regetz, J., Davies, T. J., Kraft, N. J. B., Ault, T. R., Bolmgren, K., Mazer, S. J., McCabe, G. J., McGill, B. J., Parmesan, C., Salamin, N., Schwartz, M. D., & Cleland, E. E. (2012). Warming experiments underpredict plant phenological responses to climate change. *Nature*, 485(7399), Article 7399. <https://doi.org/10.1038/nature11014>
 - Xiao, G., Zhang, Q., Li, Y., Wang, R., Yao, Y., Zhao, H., & Bai, H. (2010). Impact of temperature increase on the yield of winter wheat at low and high altitudes in semiarid northwestern China. *Agricultural Water Management*, 97(9), 1360–1364. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.04.002>
 - Xiao, L., Liu, B., Zhang, H., Gu, J., Fu, T., Asseng, S., Liu, L., Tang, L., Cao, W., & Zhu, Y. (2021). Modeling the response of winter wheat phenology to low temperature stress at elongation and booting stages. *Agricultural and Forest Meteorology*, 303, 108376. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108376>
 - Yang, X., Wang, G., Chen, Y., Sui, P., Pacenka, S., Steenhuis, T. S., & Siddique, K. H. M. (2022). Reduced groundwater use and increased grain production by optimized irrigation scheduling in winter wheat–summer maize double cropping system—A 16-year field study in North China Plain. *Field Crops Research*, 275, 108364. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108364>
 - Yashavanthakumar, K. J., Baviskar, V. S., Navathe, S., Patil, R. M., Bagwan, J. H., Bankar, D. N., Gite, V. D., Gopalareddy, K., Mishra, C. N., Mamrutha, H. M., Singh, S. K., Desai, S. A., & Singh, G. P. (2021). Impact of heat and drought stress on

Liste bibliographie

- phenological development and yield in bread wheat. *Plant Physiology Reports*, 26(2), 357–367. <https://doi.org/10.1007/s40502-021-00586-0>
- Zadoks, J. C., Chang, T. T., & Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14(6), 415–421. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>
 - Zamani, A., Emam, Y., & Edalat, M. (2024). Response of Bread Wheat Cultivars to Terminal Water Stress and Cytokinin Application from a Grain Phenotyping Perspective. *Agronomy*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/agronomy14010182>
 - Zeynoddin, M., Gumiere, S. J., & Bonakdari, H. (2023). Enhancing water use efficiency in precision irrigation: Data-driven approaches for addressing data gaps in time series. *Frontiers in Water*, 5. <https://doi.org/10.3389/frwa.2023.1237592>
 - ZHANG, M., GAO, Y., & ZHANG, Y. (2023). Sensitivity analysis and calibration of the APSIM next-generation model under different irrigation and sowing density in wheat. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 31(1), 102–112. <https://doi.org/10.12357/cjea.20220384>
 - Zhang, Y., Feng, L., Wang, E., Wang, J., & Li, B. (2012). Evaluation of the APSIM-Wheat model in terms of different cultivars, management regimes and environmental conditions. *Canadian Journal of Plant Science*, 92(5), 937–949. <https://doi.org/10.4141/cjps2011-266>
 - Zhao, G., Bryan, B. A., & Song, X. (2014). Sensitivity and uncertainty analysis of the APSIM-wheat model: Interactions between cultivar, environmental, and management parameters. *Ecological Modelling*, 279, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.02.003>
 - Zhao, J., Han, T., Wang, C., Jia, H., Worqlul, A. W., Norelli, N., Zeng, Z., & Chu, Q. (2020). Optimizing irrigation strategies to synchronously improve the yield and water productivity of winter wheat under interannual precipitation variability in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 240, 106298. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106298>
 - Zhao, W., Liu, L., Shen, Q., Yang, J., Han, X., Tian, F., & Wu, J. (2020). Effects of Water Stress on Photosynthesis, Yield, and Water Use Efficiency in Winter Wheat. *Water*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/w12082127>
 - Zhao, Z., Qin, X., Wang, E., Carberry, P., Zhang, Y., Zhou, S., Zhang, X., Hu, C., & Wang, Z. (2015). Modelling to increase the eco-efficiency of a wheat–maize double

Liste bibliographie

cropping system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 210, 36–46. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.05.005>

- Zhao, Z., Rebetzke, G. J., Zheng, B., Chapman, S. C., & Wang, E. (2019). Modelling impact of early vigour on wheat yield in dryland regions. *Journal of Experimental Botany*, 70(9), 2535–2548. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz069>
- Zwart, S. J., & Bastiaanssen, W. G. M. (2004). Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural Water Management*, 69(2), 115–133. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.04.007>

Résumé :

Cette étude a été conduite dans la région semi-aride de Sétif durant les saisons 2021-2022 et 2022-2023 pour s'attaquer à la problématique persistante du rendement faible des cultures, exacerbée par les défis posés par la variation climatique. Notre objectif principal était d'approfondir notre compréhension de la relation entre l'absorption de l'eau et de l'azote pour développer des stratégies efficaces visant à optimiser la productivité agricole. Nous avons évalué l'impact de l'irrigation et des pratiques de gestion sur le rendement et la résilience de cinq variétés de blé dur : Bousselam, MBB, Oued ElBared (variétés locales), Simito et Vitron (variétés améliorées). Les résultats ont révélé une variation significative des rendements, de l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE), de l'efficacité d'utilisation d'azote (NUE) et de la tolérance au stress (STI) selon les méthodes de gestion appliquées. En utilisant le couplage du temps thermique avec la teneur en eau du sol pour prédire précisément les différents stades de croissance, nos résultats soulignent l'importance cruciale d'une gestion adaptative de l'irrigation pour atténuer les effets négatifs de la variation climatique sur le rendement des cultures de blé dur dans cette région. L'essai 1, basé sur une irrigation ciblée aux stades productifs, a permis d'atteindre un rendement maximal de 8 t/ha avec la variété Bousselam, accompagnée d'une WUE de 1,5 kg/mm et d'une EUA de 53,77 kg/kg. L'essai 2, qui a été réalisé sous conditions pluviales dans la première année, a enregistré un rendement moyen de 4 à 5 t/ha, une WUE de 1,0 kg/mm, et une NUE de 21,39 kg/kg pour Bousselam. L'essai 3, également irrigué aux stades critiques dans la phase végétative, a montré un rendement maximal de 6 t/ha pour Bousselam, avec une WUE de 1,3 kg/mm et une NUE de 30,63 kg/kg. Concernant la tolérance au stress, la variété Vitron a enregistré un STI de 1,5 %, tandis que les variétés Bousselam et MBB ont affiché des valeurs proches de 0,5 %, indiquant ainsi qu'elles sont les plus adaptatives au stress. L'évaluation des performances du modèle APSIM a mis en lumière des résultats significatifs en termes d'écarts types de racine carrée des différences (RMSD) et d'erreurs normalisées (NRMSE). Dans l'essai pluvial, les jours de floraison ont présenté un RMSD variant de 5 à 14 jours selon les variétés, tandis que le nombre de grains a affiché un NRMSE atteignant 47,79 %. Dans l'essai irrigué, le RMSD pour les jours de maturité a fluctué de 2 à 14 jours, et le rendement a montré un RMSD maximum de 4431 kg/ha avec un NRMSE de 58,02 %. Ces résultats soulignent la nécessité d'améliorer le modèle APSIM pour mieux intégrer l'effet de l'irrigation sur la maturation et le rendement. Les conclusions de cette étude fournissent des perspectives novatrices pour maximiser la durabilité des systèmes de production agricole dans un contexte de variation climatique.

Abstract

This study was conducted in the semi-arid region of Sétif during the 2021-2022 and 2022-2023 seasons to address the persistent issue of low crop yields, exacerbated by the challenges posed by climate change. Our primary objective was to deepen our understanding of the relationship between water and nitrogen absorption to develop effective strategies aimed at optimizing agricultural productivity. We assessed the impact of irrigation and management practices on the yield and resilience of five durum wheat varieties: Bousselam, MBB, Oued ElBared (local varieties), Simito, and Vitron (improved varieties). The results revealed significant variations in yields, water use efficiency (WUE), nitrogen use efficiency (NUE), and stress tolerance index (STI) depending on the applied management methods. By coupling thermal time with soil water content to accurately predict the different growth stages, our results underscore the crucial importance of adaptive irrigation management to mitigate the negative effects of climate change on durum wheat yields in this region. Trial 1, based on targeted irrigation at critical growth stages, achieved a maximum yield of 8 t/ha with the Bousselam variety, accompanied by a WUE of 1.5 kg/mm and a NUE of 53.77 kg/kg. Trial 2, conducted under rainfall conditions, recorded an average yield of 4 to 5 t/ha, a WUE of 1.0 kg/mm, and a NUE of 21.39 kg/kg for Bousselam. Trial 3, also irrigated at critical stages, showed a maximum yield of 6 t/ha for Bousselam, with a WUE of 1.3 kg/mm and a NUE of 30.63 kg/kg. Regarding stress tolerance, the Vitron variety recorded an STI of 1.5%, while the Bousselam and MBB varieties displayed values close to 0.5%, indicating that they are the most adaptive to stress. The evaluation of the APSIM model's performance highlighted significant results in terms of root mean square differences (RMSD) and normalized root mean square errors (NRMSE). In the rainfall trial, flowering days exhibited an RMSD ranging from 5 to 14 days across varieties, while the number of grains showed an NRMSE of 47.79%. In the irrigated trial, the RMSD for maturity days fluctuated from 2 to 14 days, and the yield showed a maximum RMSD of 4431 kg/ha with an NRMSE of 58.02%. These results emphasize the need to improve the APSIM model to better integrate the effect of irrigation on maturation and yield. The importance of optimized irrigation management clearly emerges to enhance productivity and strengthen resilience to environmental stress. The conclusions of this study provide innovative perspectives for maximizing the sustainability of agricultural production systems in the context of climate change.

ملخص:

أُجريت هذه الدراسة في المنطقة شبه الجافة في سطيف خلال الموسمين 2021-2022 و 2022-2023 للتصدي لمشكلة انخفاض محصول المحاصيل، التي تفاقمت بسبب التحديات التي يطرحها تغير المناخ. كان هدفنا الرئيسي هو تعميق فهمنا للعلاقة بين امتصاص المياه والنيتروجين لتطوير استراتيجيات فعالة تهدف إلى تحسين الإنتاجية الزراعية. قمنا بتقييم تأثير الري وممارسات الإدارة على المحصول ومرونة خمسة أصناف من القمح الصلب: بوسلام، MBB، وواد البارد (أصناف محلية)، سيميتو وفترون (أصناف محسنة). كشفت النتائج عن وجود تباين كبير في المحاصيل وكفاءة استخدام المياه (WUE) وكفاءة استخدام النيتروجين (NUE) ومؤشر تحمل الإجهاد (STI) اعتمادًا على طرق الإدارة المطبقة. من خلال ربط الوقت الحراري بمحتوى المياه في التربة للتنبؤ بدقة بمراحل النمو المختلفة، تبرز نتائجنا الأهمية الحيوية للإدارة التكيفية للري لتخفيف الآثار السلبية لتغير المناخ على محصول القمح الصلب في هذه المنطقة. حقق الاختبار الأول، القائم على الري المستهدف في المراحل الحرجة للنمو، أقصى محصول بلغ 8 طن/هكتار مع صنف بوسلام، مصحوبًا بكفاءة استخدام مياه تبلغ 1.5 كغ/مم وكفاءة استخدام نيتروجين تبلغ 53.77 كغ/كغ. سجّل الاختبار الثاني، الذي أُجري تحت ظروف مطرية، متوسط محصول يتراوح بين 4 إلى 5 طن/هكتار، وكفاءة استخدام مياه 1.0 كغ/مم، وكفاءة استخدام نيتروجين تبلغ 21.39 كغ/كغ لصنف بوسلام. بينما أظهر الاختبار الثالث، الذي تم ريّه أيضًا في المراحل الحرجة، محصولًا أقصى بلغ 6 طن/هكتار لصنف بوسلام، مع كفاءة استخدام مياه تبلغ 1.3 كغ/مم وكفاءة استخدام نيتروجين تبلغ 30.63 كغ/كغ. فيما يتعلق بتحمل الإجهاد، سجل صنف فترون مؤشر STI يبلغ 1.5%، بينما أظهرت الأصناف بوسلام و MBB قيمًا قريبة من 0.5%، مما يشير إلى أنها الأكثر تكيفًا مع الإجهاد. أبرز تقييم أداء نموذج APSIM نتائج هامة من حيث الفروق في الجذر التربيعي المتوسط (RMSD) والأخطاء المعدلة (NRMSE). في الاختبار المطري، عرضت أيام الإزهار RMSD يتراوح بين 5 إلى 14 يومًا عبر الأصناف، بينما أظهر عدد الحبوب NRMSE بلغ 47.79%. في الاختبار المروي، تراوح RMSD لأيام النضج من 2 إلى 14 يومًا، وأظهر المحصول أقصى RMSD بلغ 4431 كغ/هكتار مع NRMSE بلغ 58.02%. تؤكد هذه النتائج على ضرورة تحسين نموذج APSIM لدمج تأثير الري بشكل أفضل على النضج والمحصول. تبرز أهمية إدارة الري المحسنة بوضوح لتعزيز الإنتاجية وتعزيز المرونة أمام الضغوط البيئية. توفر استنتاجات هذه الدراسة آفاقًا مبتكرة لتعزيز استدامة نظم الإنتاج الزراعي في سياق تغير المناخ.