

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE BATNA 1 – HADJ LAKHDAR



INSTITUT DES SCIENCES VETERAINAIRES ET SCIENCES AGRONOMIQUES

DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES

THESE

Pour l'obtention du Diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Option : Agrotechnie

Présentée par

CHADDA Douniazed

Thème

Étude de la fertilisation azotée du blé dur dans deux zones céréalières d'Algérie.

Soutenue le:

DEVANT LE JURY :

Président :	SBIH Mahtali	Prof	Université Batna 1
Directeur de thèse:	HALITIM Amor	Prof.	Université Batna 1
Examineur :	MASMOUDI Ali	Prof	Université Biskra
Examineur :	KRIBAA Mohamed	Prof	Université Oum El Bouaghi
Examineur :	GUIMEUR Kamel	MCA	Université Biskra

Année universitaire : 2022 /2023

REMERCIEMENTS

Au terme de cette étude, je remercie avant tout Dieu le tout puissant, de m'avoir donné la foi et le courage et de m'avoir guidé pour l'accomplissement de ce travail. Tout d'abord,

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur, M. Halitim A. Professeur à l'Université de Batna 1, qui m'a fait l'honneur de m'encadrer. J'ai pu apprécier les qualités d'un homme de science et de pédagogie, mais aussi des qualités humaines qui m'ont permis de travailler en toute sérénité et confiance. Je lui suis particulièrement reconnaissant et redevable pour le temps et l'énergie qu'il m'a toujours accordé pour me transmettre des conseils, des orientations et surtout sagesse dont le moindre qu'on puisse dire et celle des grands maîtres, je peux m'estimer très privilégié. Veuillez bien trouver ici l'expression profonde de ma grande et chaleureuse estime.

Je remercie M. Sbih M., pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse. Je tenais à vous exprimer ma profonde gratitude pour votre précieuse aide lors de l'évaluation de mon travail. Votre soutien et vos conseils ont été d'une importance capitale, et je suis très reconnaissante d'avoir pu bénéficier de votre expertise. Grâce à vos commentaires constructifs et à vos suggestions avisées, mon document a été jugé comme une référence pour l'université, les chercheurs et toute l'Algérie. J'adresse aussi mes remerciements à M. Masmoudi A., M. Kribaa M. et M. Guimer Kamel, d'avoir accepté d'examiner le document et faire partie du jury, qu'ils trouvent ici l'expression de mes plus profonds respects et ma profonde gratitude.

Je remercie l'ensemble des techniciens qui ont contribué à la mise en place des dispositifs, au suivi et au recueil des données au niveau des deux Instituts Techniques des Grandes cultures de la wilaya de Sétif et de Constantine.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Résumé

Dans le cadre de la recherche d'outils pour une meilleure gestion de la fertilisation azotée des cultures, nous nous sommes assigné les objectifs suivants

- La vérification et l'analyse de la réponse à la fertilisation azotée du blé dur dans les conditions pluviales de deux régions semi-arides Sétif et Constantine
- L'évaluation des indicateurs de la nutrition azotée.

L'ajustement des apports d'azote aux besoins de la culture étudiée en vue d'assurer une meilleure rentabilité à l'agriculteur tout en réduisant les pertes et les effets néfastes sur l'environnement.

Pour mener à bien ces objectifs, nous avons installé un essai blé dur (variété Waha) dans les deux stations ITGC des deux régions semi-arides Sétif et Constantine. Il s'agit d'un dispositif en blocs aléatoires complet avec trois blocs et quatre doses d'azote fractionnées en trois apports : la 1^{re} fraction comprend un apport du mono ammonium phosphate (MAP : 12-52-00) comme engrais de démarrage épandu à raison de 100 kg ha⁻¹ au semis. La deuxième fraction consiste à un apport de 1/3 de 46 unités de N au stade tallage épi 1 cm (stade A) et enfin une troisième fraction représentant 2/3 (30,6 uN) de la dose totale apportée au stade montaison (stade B).

. Durant le cycle, nous avons suivi la croissance, l'assimilation de l'azote et l'élaboration du rendement. Les mesures de la chlorophylle ont été réalisées aux stades début montaison, mi-montaison et floraison.

Le rendement moyen obtenu pour le blé est de 41.42 q/ha pour la région de Constantine et 33.09q/ha pour la région de Sétif. Le rendement obtenu du traitement 100kg urée/ha est le meilleur par rapport aux autres traitements, il représente 70 % et 58 du rendement potentiel, respectivement pour le site de Constantine et Sétif.

Les bonnes conditions climatiques des deux années humides (2^{ème} et 3^{ème} année) contrairement à l'année sèche (1^{ère} année) ont favorisé une assimilation de N et une croissance importante, cependant une efficacité faible d'utilisation de N et de production de grains, la réponse de la culture à la fertilisation azotée a été faible ; la dose optimale d'apports est de 100 kg d'engrais/ha.

Les valeurs moyennes de EUA sont de 2,8 toutes doses confondues pour la zone de Sétif et 2,71 pour la zone de Constantine.

L'EUA est corrélé significativement avec tous les paramètres d'absorption d'azote, aux différents stades de la culture. Elle est corrélée significativement et d'une manière négative avec le IRN.

Par contre le N absorber par les tissus du végétal à la mi-montaison est moins bien corrélés à l'indice de chlorophylle. La date de prélèvement ayant permis les meilleurs coefficients de corrélation est le stade début montaison (stade B) et la floraison.

La dose optimale ainsi calculée varie de 100 à 150 kg d'engrais/ha, selon la région. Cette dernière dépend de plusieurs paramètres.

Mots clés. Blé dur, nutrition azotée, fertilisation azotée, outil d'aide à la décision, Efficience d'utilisation d'azote (EUA).

Table des matières

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Table des matières	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction générale	1
CHAPITRE - I	
SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	
1.2. Importance et production du blé.	3
1.2.1. Importance du blé.	3
1.2.1.1. Dans le monde.....	3
1.2.1.2. En Algérie.	4
1.2.1.3. Le blé dans la région semi-aride.	7
1.3. Rôle de l'azote dans la plante de blé.....	9
1.3.1. Formation des protéines	9
1.3.2. Synthèse de la chlorophylle.....	9
1.3.3. Croissance végétative.....	9
1.3.4. Développement des organes reproducteurs.....	9
1.3.5. Métabolisme des glucides	10
1.4. Besoins en azote du blé	10
1.4.1. Méthodes et recommandations pour évaluer les besoins en azote du blé.....	11
1.4.1.1. Analyses de sol.....	11
1.4.1.3. Modèles de prévision.....	15
1.4.2. Stratégies de fertilisation azotée.....	16
1.4.2.1. Engrais minéraux.....	16
1.4.2.2. Fumure organique	16
1.4.2.3. Cultures de légumineuses	16
1.4.2.4. Récupération de l'azote.....	17
1.4.2.5. Technologies de libération contrôlée	17
1.4.3. Différentes techniques de fractionnement de l'apport d'azote.....	17
1.4.3.1. Apport de l'azote au semis.....	17

1.4.3.2. Apport en cours de saison	18
1.4.4. Effets de la quantité, du moment et du mode d'application de l'azote sur le blé.....	18
1.4.4.1. Quantité d'azote appliquée.....	18
1.4.4.2. Moment d'application de l'azote.....	18
1.4.4.3. Mode d'application de l'azote.....	19
1.4.5. Facteurs influençant l'utilisation de l'azote par le blé.....	19
1.4.5.1. Facteurs liés au sol et d'autres facteurs agronomiques	19
1.4.5.2. Interaction entre l'azote et d'autres nutriments.....	20
1.4.6. Les pratiques culturales.....	21
1.4.7. Évaluation de l'efficacité de la nutrition azotée.....	22
1.4.7.1. Méthodes d'évaluation de l'efficacité d'utilisation de l'azote par le blé.....	22
1.4.7.2. Discussion des indicateurs de l'efficacité d'utilisation de l'azote et de leur interprétation.....	23
1.5. Besoins en eau du blé	23
1.6. Utilisation des engrais azotés.	24
1.6.1. Dans le monde.....	24
1.6.2. En Algérie.....	24

CHAPITRE - II

Matériel et méthodes

2.1. Caractéristiques générales de la région d'étude.....	27
2.1.1. La situation géographique et administrative de la région d'étude.....	27
2.1.1.1. Région de Sétif.....	27
2.1.1.2. Région de Constantine.....	30
2.2. Description du site expérimental des deux zones d'étude	31
2.2.1. L'Institut Technique de Grandes Cultures (ITGC) de Sétif.....	31
2.2.2. L'institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) d'El Khroub (Constantine). ...	31
2.3. Climat	31
2.4.1. Température.....	32
2.4.2. Précipitations	34
2.4. Sols des deux stations d'études.....	35
2.4.1. Caractéristiques physico-chimiques des sols.	35
2.4.1.1. Les caractéristiques physico-chimiques des sols de l'ITG de Sétif.	35
2.4.1.2. Les caractéristiques physico-chimiques des sols de l'ITG de Constantine.	36
2.5. Mise en place de l'essai.	37

2.5.1. Matériel utilisé.....	37
2.5.2. Méthodes de travail.....	39
2.5.2.1. Travail du sol et de semis.	39
2.5.2.2. Dispositif expérimental.	39
2.5.2.3. Entretien de culture.	40
2.5.2.3. Échantillonnage du végétal.....	41
2.5.2.4. Paramètres mesurés.....	42
2.5.2.4.1. Notation et mesures.	42
2.5.2.4.1.1. Caractères phénologiques et morphologiques (Durée des stades du cycle de développement de la céréale).....	42
2.5.2.4.1.2. Mesures liées au sol.	42
2.5.2.4.1.3. Mesures liées au végétal.....	43
2.5.2.4.1.3. 1. Biomasse aérienne.....	43
2.5.2.4.1.3. 4. Efficacité de l'utilisation de l'azote absorbé (EUA).....	44
2.5.2.4.1.3. 5. Rendement en paille et en grains	44
2.5.2.4.1.6. Indice de récolte (IR%).....	44
2.5.2.4.1.7. Rendement en paille et en grains.....	44
2.5.2.4.1.7.1. Composantes du rendement.....	45
2.5.2.4.1.8. Teneur en chlorophylle totale.....	45
2.5.2.4.1.9. Traitement statistique.	45

CHAPITRE - III

Résultats et discussion

1ERE PARTIE	46
Croissance et développement de la culture en réponse à la fertilisation azotée.....	46
3.1. Durée des stades du cycle de développement de la variété Waha.	47
3.2. Paramètres mesurés du sol.....	48
3.2.1 Humidité du sol.	48
3.2.1.1. Évolution de l'humidité du sol au cours du cycle de la culture dans les deux régions d'étude (Sétif et Constantine) et pour les trois années.	48
3.2.1.1.1. Région de Constantine.....	49
3.2.1.1.2. Région de Sétif	51
3.2.2. Azote minéral du sol.	54
3.2.2.1 Région de Constantin	55

3.2.2.1.1. Effet du facteur traitement sur l'évolution de l'azote minéral dans le sol aux différents stades de la culture	55
3.2.2.1.2. Effet du facteur année sur l'évolution de l'azote minéral dans le sol aux différents stades de la culture.	55
3.2.2.2. Région de Sétif.....	56
3.2.2.2.1 Effet du facteur traitement sur l'évolution de l'azote minéral dans le sol aux différents stades de la culture	56
3.2.2.2.2. Effet du facteur année sur l'évolution de l'azote minéral dans le sol aux différents stades de la culture.	56
3.3. Analyse de la croissance du blé.	67
3.3.1. Production de matière sèche.....	67
3.3.1.1. Région de Constantine.	67
3.3.1.1.1. Effet du facteur traitement sur l'évolution de la matière sèche aux différents stades de la culture.....	67
3.3.1.1.2. Effet du facteur année sur l'évolution de la matière sèche aux différents stades de la culture	67
3.3.1.2. Région de Sétif.	69
3.3.1.2.1. Effet du facteur traitement sur l'évolution de la matière sèche aux différents stades de la culture.....	69
3.3.1.2.2. Effet du facteur année sur l'évolution de la matière sèche aux différents stades de la culture	69
3.4. Assimilation de l'azote.....	72
3.4.1. Quantités d'azote absorbé par le blé.....	72
3.4.1.1.1. Effet du facteur traitement sur l'assimilation et l'absorption de l'azote par le blé	72
3.4.1.1.2. Effet du facteur année sur l'assimilation et l'absorption de l'azote par le blé	75
3.4.1.2. Région de Sétif.....	75
3.4.1.2.1. Effet du facteur traitement sur l'assimilation et l'absorption de l'azote par le blé	75
3.4.1.2.2. Effet du facteur année sur l'assimilation et l'absorption de l'azote par le blé.....	78
3.4.2. Coefficient d'utilisation d'azote (CAU).	92
3.4.2.1. Région de Constantine.....	92

3.4.2.1.1. Effet du facteur traitement sur le Coefficient d'utilisation d'azote (CAU)...	92
3.4.2.1.2. Effet du facteur année sur le Coefficient d'utilisation d'azote (CAU).....	93
3.4.2.2. Région de Sétif.....	93
3.4.2.2.1. Effet du facteur traitement sur le Coefficient d'utilisation d'azote (CAU)...	93
3.4.2.2.2. Effet du facteur année sur le Coefficient d'utilisation d'azote (CAU).....	94
3.4.3. Indice de récolte azoté (NHI).....	97
3.4.3.1. Région de Constantine.	98
3.4.3.1.1. Effet du facteur traitement sur l'indice de récolte azoté (NHI).	98
3.4.3.1.2. Effet du facteur année sur l'indice de récolte azoté (NHI).....	98
3.4.3.2. Région de Sétif.	99
3.4.3.2.1. Effet du facteur traitement sur l'indice de récolte azoté (NHI).	99
3.4.3.2.2. Effet du facteur année sur l'indice de récolte azoté (NHI).....	99
3.3.4. Efficacité de l'utilisation de l'azote absorbé (EUA).....	100
3.3.4.1. Région de Constantine.....	102
3.3.4.1.1. Effet du facteur traitement sur l'efficacité de l'utilisation de l'azote absorbé (EUA)	102
3.3.4.1.2. Effet du facteur année sur l'efficacité de l'utilisation de l'azote absorbé (EUA).....	103
3.3.4.2. Région de Sétif.....	103
3.3.4.2.1. Effet du facteur traitement sur l'efficacité de l'utilisation de l'azote absorbé (EUA)	103
3.3.4.2.2. Effet du facteur année sur l'efficacité de l'utilisation de l'azote absorbé (EUA).....	104
3.3.4.3. Corrélation entre assimilations de l'azote par le blé et EUA, CAU et IRA ...	108
3.5. Analyse de l'élaboration du rendement.....	110
3.5.1. Rendement grains et paille. D'après Madic et al. (2016), le rendement en grains du blé est un trait complexe d'une importance économique considérable qui résulte de l'effet du génotype et de l'environnement pendant tout le cycle de vie de la plante. Il est déterminé par trois composantes principales, à savoir le nombre d'épis, de grains par épi et le poids de 1000 grains.	110
3.5.1.1. Région de Constantine.....	111
3.5.1.1.1 Effet du facteur traitement sur le rendement (grains et paille).	111
3.5.1.1.2. Effet du facteur année sur le rendement (grains et paille).	111

3.5.1.2. Région de Sétif.....	112
3.5.1.2.1. Effet du facteur traitement sur le rendement (grains et paille).	112
3.5.2. Efficacité des engrais sur le rendement du blé (rendement moyen des trois années de culture sur les deux sites)	113
3.5.1.2.4. Relation matière sèche-rendements blé dur.....	117
3.5.1.2.5. Relation entre l'absorption de N par les tissus de la céréale et le rendement.	117
3.5.2. Indice de récolte.....	120
3.5.2.1. Région de Constantine.	121
3.5.2.1.1. Effet du facteur traitement sur l'indice de récolte	121
3.5.2.1.2. Effet du facteur année sur l'indice de récolte (IR%).....	121
3.5.2.2. Région de Sétif.	122
3.5.2.2.1. Effet du facteur traitement sur l'indice de récolte	122
3.5.2.2.2. Effet du facteur année sur l'indice de récolte (IR%).....	122
3.5.3. Composantes de rendement.....	124
3.5.3.1. Région de Constantine.....	124
3.5.3.1.1. Effet du facteur traitement sur les composantes de rendement.....	124
3.5.3.1.2. Effet du facteur année sur les composantes de rendement.	124
3.5.3.2. Région de Sétif.....	126
3.5.3.2.1. Effet du facteur traitement sur les composantes de rendement.....	126
3.5.3.2.2. Effet du facteur année sur les composantes de rendement.	126
2e partie. Évaluation de l'indicateur de la nutrition azoté.....	133
Introduction	133
3.2. Évaluation des indicateurs de la nutrition azotée.....	134
3.2.1. Région de Constantine	134
3.2.1.1. Effet du facteur traitement sur l'indice de teneur de chlorophylle des feuilles aux différentes dates de mesure.....	134
3.2.1.2. Effet du facteur année sur l'indice de teneur de chlorophylle des feuilles aux différentes dates de mesure	134
3.2.2. Région de Sétif	135
3.2.2.1. Effet du facteur traitement sur l'indice de teneur de chlorophylle des feuilles aux différentes dates de mesure.....	135

3.2.2.2. Effet du facteur année sur l'indice de teneur de chlorophylle des feuilles aux différentes dates de mesure	135
3.2.1.4. Relation entre l'indice de chlorophylle -quantité d'azote assimilé dans les tissus de la plante pour les trois dates de mesures	138
3.2.1.6. Relation entre l'indice de chlorophylle –rendement du blé dur pour les trois dates de mesures	141
3.2.1.7. Relation entre l'indice de chlorophylle – rendement de blé dur.	143
3.2.1.7. Recommandations de la fertilisation azotée dans la région semi-aride.....	144
Conclusion générale.	148
Références Bibliographiques	152
Annexes	

Liste des tableaux

Tableau 1. Données des températures moyennes mensuelles, minimas et maximas allant de septembre à juin dans la région de Sétif et de Constantine années (2016/2017, 2017/2018 et 2018/2019).	32
Tableau 2. Pluviométrie enregistrée durant les trois années d'étude (2016/2017, 2017/2018 et 2018/2019).....	34
Tableau 3. Caractéristiques physico-chimiques des sols de la station de l'ITGC de Sétif.	35
Tableau 4. Caractéristiques physico-chimiques des sols de l'ITG de Constantine.....	37
Tableau 5. Caractéristiques morphologiques, culturales et qualitatives de la variété Waha (Boufenar et al, 2006).....	37
Tableau 6. Dates de réalisation du semis dans les deux régions d'étude pour les trois années.	39
Tableau 7. Observations et mesures au cours du cycle du blé.....	41
Tableau 8. Effet des différents traitements azotés sur l'efficacité de l'utilisation de l'azote absorbé (EUA) pour les trois années et dans les deux régions d'étude.....	101
Tableau 9. Effet des traitements d'azote sur le rendement total moyen (grains et paille) pour les différentes années dans les deux régions d'étude.	112

Liste des figures

Figure 1. Principales zones et pays de production de blé dans le monde (FAOSTAT, 2021). ...4	4
Figure 2. Aires de culture du blé en Algérie (Delli et al.,2002).....6	6
Figure 3. Importations algériennes de blé (AgriMer et USDA, 2019).....7	7
Figure 4. Utilisation des engrais azotés dans le monde et dans l'Algérie (FAOSTAT, 2019b)25	25
Figure 5. Localisation des deux régions d'étude (Sétif et Constantine) en Algérie.....27	27
Figure 6. Carte des limites administratives de la région de Sétif (DPAT-2010)27	27
Figure 7. Répartition des niveaux de précipitations dans la région d'étude.....29	29
Figure 8. (a) Carte pluviométrique (b) Vs ensembles morphologiques de la région de Sétif (SDATWS, 2015).....30	30
Figure 9. Limite administrative de La Wilaya de Constantine (Louadi, 1999 A).30	30
Figure 10. Dispositif expérimental réalisé dans les deux sites (ITGC Sétif ITGC Constantine).40	40
Figure 11. Durée en jours de chaque période étudiée au cours du cycle de développement de la variété Waha.....47	47
Figure 12. Évolution de l'humidité du sol moyenne dans la couche 0-20cm au cours du cycle de la culture pour les trois années dans la région de Constantine.....50	50
Figure 13. Évolution de l'humidité du sol moyenne dans la couche 20-40cm, au cours du cycle de la culture pour les trois années dans la région de Constantine.....51	51
Figure 14. Évolution de l'humidité du sol moyenne dans la couche 0-20cm au cours du cycle de la culture pour les trois années dans la région de Sétif.52	52
Figure 15. Évolution de l'humidité du sol moyenne dans la couche 20-40cm au cours du cycle de la culture pour les trois années dans la région de Sétif.52	52
Figure 16. Évolution de l'azote minéral moyen du sol aux différents stades de développement du blé dur pour les différents traitements, dans la région de Constantine.....57	57
Figure 17. Évolution de l'azote minéral moyen du sol aux différents stades de développement du blé dur pour les différents traitements, dans la région de Sétif.....58	58
Figure 18. Effet de l'humidité et de la température sur la minéralisation de l'azote pour les différents stades.....63	63
Figure 19. Évolution de la production de la matière sèche aux différents stades de développement du blé dur pour les différents traitements, dans les deux régions d'étude.68	68

Figure 20. Courbes de quantité moyenne de l'azote absorbé dans les tissus du végétal, pour les différents stades de développement dans la région de Constantine pour les trois années.	74
Figure 21. Absorption de l'azote par le blé aux différents stades de développement pour les différentes années (région de Constantine).....	75
Figure 22. Courbes de quantité moyenne de l'azote absorbé dans les tissus du végétal, pour les différents stades de développement dans la région de Sétif pour les trois années.....	77
Figure 23. Absorption de l'azote par le blé aux différents stades de développement pour les différentes années (région de Sétif).....	78
Figure 24. L'azote dans le végétal et le sol pour les différents traitements, dans la région de Constantine (1 ^{ère} année).....	85
Figure 25. L'azote dans le végétal et le sol pour les différents traitements, dans la région de Constantine (2 ^{ème} année).....	86
Figure 26. L'azote dans le végétal et le sol pour les différents traitements, dans la région de Sétif (1 ^{ère} année).....	89
Figure 27. L'azote dans le végétal et le sol pour les différents traitements, dans la région de Sétif (2 ^{ème} année).....	90
Figure 28. L'azote dans le végétal et le sol pour les différents traitements, dans la région de Sétif (3 ^{ème} année).....	91
Figure 29. Effet des doses d'azote sur le coefficient d'utilisation azotée pour les différents traitements et les trois années, dans la région de Constantine.	93
Figure 30. Effet des doses d'azote sur le coefficient d'utilisation azotée pour les différents traitements, ans la région de Sétif.	94
Figure 31. Effet des doses de l'azote sur l'indice de récolte azoté chez le blé pour les trois années, dans la région de Constantine.	98
Figure 32. Effet des doses de l'azote sur l'indice de récolte azoté chez le blé pour les trois années, dans la région de Sétif.	99
Figure 33. Effet des différents traitements sur l'efficience de l'utilisation de l'azote pour les trois années, dans la région de Constantine.	102
Figure 34. Effet des différents traitements sur l'efficience de l'utilisation de l'azote pour les trois années, dans la région de Sétif.....	104
Figure 35. Effet des doses d'engrais apportées sur la fourniture du sol en azote.	109
Figure 36. Efficacité des engrais sur le rendement du blé (rendement moyen des trois années de culture sur les deux sites).	114

Figure 37. Efficacité des engrais sur le rendement du blé pour les trois années de culture sur les deux sites d'étude.....	116
Figure 38. Relation entre l'accumulation de la matière sèche et le rendement du blé dur pour le stade tallage, mi-montaison et floraison.	117
Figure 39. Relation entre l'assimilation de N par les tissus de blé et le rendement (grains, paille et total).	118
Figure 40. Effet des doses d'azote sur l'indice de récolte moyen du blé dur dans la région de Constantine pour les trois années de culture.....	121
Figure 41. Effet des doses d'azote sur l'indice de récolte moyen du blé dur dans la région de Sétif pour les trois années d'étude.....	122
Figure 42. Effet des doses d'azote sur les composantes de rendement du blé dur dans la région de Constantine pour les trois années de culture.	125
Figure 43. Effet des doses d'azote sur les composantes de rendement du blé dur dans la région de Sétif pour les trois années de culture.	127
Figure 44. Valeurs moyennes de la teneur en chlorophylle des feuilles en fonction des doses d'azote et la date de mesure.	136
Figure 45. Relation entre la quantité d'azote assimilé dans les tissus de la plante et la chlorophylle pour les trois dates de mesures et pour les trois années d'étude des deux régions (Constantine et Sétif).....	139
Figure 46. Relation entre la quantité d'azote assimilé dans les tissus de la plante et la chlorophylle pour les trois dates de mesures et pour les trois années d'étude.....	140
Figure 47. Relation Indice de chlorophylle –Rendement du blé dur pour les trois dates de mesures.	142
Figure 48. Relation Indice de chlorophylle –Rendement du blé dur pour les différentes parties (grains, paille et total) de blé dur.....	144

Liste des abréviations

NUE= Efficience d'utilisation d'azote

CAU= Coefficient apparent d'utilisation d'azote

MS = Matière sèche

ANOVA: Analyse of variance

CIMMYT: International Maize and Wheat Improvement Center

IR: Indice de récolte (harvest index)

ICARDA: International Center for Agricultural Research in the Dry Areas

SAU : Surface agricole utile

IGC : Le conseil International des Céréales, International Grain Council

INRAA : Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie

ITGC : Institut Technique des Grandes Cultures

MADR : Ministère de l'Agriculture et du Développement rural

DSA : Direction des Services Agricoles

SPAD: Soil and plant analysis device

FAO : Organisation pour l'alimentation et l'agriculture.

CIC : Conseil international des céréales

ONM : Office national météorologique

SAU : Surface agricole utile.

Introduction générale

En Algérie, les superficies consacrées à la culture des céréales sont de l'ordre de 6 millions d'hectares et la jachère présente une superficie de 3 millions d'hectares (Communication orale Halitim, 2023). La superficie emblavée était estimée à 2 millions d'hectares (Agenceecofin, 2022). En outre, la semoule du blé dur constitue un élément de base pour l'alimentation de la population, classant les Algériens comme l'un des plus grands consommateurs du blé dans le monde avec 211 Kg/habitat/ans (FAOSTAT, 2019a).

Malgré la progression soutenue des rendements en blé dur depuis 1970, la production de cette céréale reste faible avec un rendement moyen de 12q/ha (trois dernières décennies), soit une production de 6 MT en saison 2019 /2020 (UNA, 2020). La production nationale du blé dur couvre 39 % des besoins et le reste est approvisionné sur le marché international (Ferhat et Chehat, 2022).

Pour satisfaire la demande rapidement grandissante en blé dur en Algérie, l'amélioration de la production de cette denrée doit passer nécessairement par l'intensification de la production (Ferhat et Chehat, 2022). En effet, cette intensification doit être durable en se basant sur des pratiques culturales plus efficaces. La fertilisation minérale a été reconnue depuis longtemps comme étant l'une des techniques déterminantes quant à la croissance et au développement des plantes, elle contribue substantiellement à l'augmentation des rendements et à la qualité des récoltes (Badraoui et al, 2000).

Nous partons de l'hypothèse que la nutrition azotée du blé dur présente une variabilité significative dans les régions semi-arides, en raison des différences climatiques, des caractéristiques du sol et des pratiques agricoles spécifiques à chaque zone. Ainsi, l'optimisation de la nutrition azotée joue un rôle crucial dans l'amélioration des rendements du blé dur en région semi-aride, tandis qu'une mauvaise gestion des apports en azote pourrait entraîner des rendements inférieurs. Nous émettons également l'hypothèse que certains indicateurs, tels que les taux de chlorophylle ou d'autres marqueurs métaboliques, peuvent servir de guides fiables pour évaluer le statut nutritionnel du blé dur et déterminer les besoins en azote. De plus, nous envisageons que les pratiques culturales, notamment les méthodes de fertilisation et le calendrier d'application de l'azote, auront un impact sur l'efficacité de la nutrition azotée et influenceront les rendements du blé dur. Par conséquent, nous avançons l'hypothèse que l'analyse approfondie de la nutrition azotée dans des conditions semi-arides permettra de fournir des recommandations adaptées pour une gestion optimale de l'azote,

optimisant ainsi les apports en azote pour le blé dur en région semi-aride afin d'atteindre un rendement maximal tout en minimisant les pertes et les impacts environnementaux. Enfin, nous supposons que ces recommandations de fertilisation azotée, une fois testée sur le terrain, démontreront leur applicabilité pratique et leur capacité à améliorer la gestion de la nutrition azotée du blé dur dans les conditions semi-arides.

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

- Examiner et analyser la réponse du blé dur à la fertilisation azotée dans les conditions pluviales de deux régions, Sétif et Constantine.
- Évaluer les indicateurs de la nutrition azotée.
- Adapter les apports d'azote aux besoins de la culture pour améliorer la rentabilité de l'agriculteur tout en réduisant les pertes et les impacts environnementaux.
- Investiguer et vérifier les effets des différentes doses d'engrais azoté (100, 150 et 200 kg/ha) préconisées dans la région semis aride sur divers paramètres.

Notre travail est structuré en trois grands chapitres :

Le chapitre I : Représente une synthèse bibliographique.

Le chapitre II : englobe la description du matériel végétal, des conditions de culture et les paramètres étudiés pour exploiter ce travail.

Le chapitre III : a fait l'objet de traitement et de présentation des résultats obtenus dans ce travail ainsi que leurs discussions. Ce document est achevé, par une conclusion assortie des perspectives, suivies de la liste de références bibliographiques et de l'annexe.

CHAPITRE - I

SYNTHÈSE

BIBLIOGRAPHIQUE

1.2. Importance et production du blé.

1.2.1. Importance du blé.

La culture des céréales représente un secteur économique important. La situation de la céréaliculture est liée à l'évolution des superficies, des productions et par conséquent des rendements obtenus. En volume de production, c'est la quatrième culture mondiale derrière la canne à sucre, le maïs et le riz (CIC, 2010).

Les céréales sont considérées comme une principale source de la nutrition humaine et animale (Slama et al., 2005). Parmi ces céréales, le blé occupe la première place pour la production mondiale et la deuxième après le riz, comme source de nourriture pour les populations humaines, il assure 15 % de ses besoins énergétiques (Bajji, 1999).

1.2.1.1. Dans le monde.

Les céréales occupent, à l'échelle mondiale, une place primordiale dans les programmes de recherche et d'amélioration agricoles. La presque totalité de la nutrition de la population mondiale est fournie par les aliments en grains dont 95 % sont produits par les principales cultures céréalières comme les blés qui constituent la première ressource d'alimentation humaine, elles constituent une des principales sources de protéines (FAO, 2020). Le blé est une matière première stratégique qui joue depuis l'origine des civilisations antiques un rôle central pour le développement des sociétés et l'organisation des relations de pouvoir. Moins médiatisé que le pétrole, le blé est pourtant partout dans le quotidien des consommateurs.

Si la demande pour ce produit se mondialise, sa culture en revanche reste localisée dans les territoires qui bénéficient des avantages naturels de la géographie, comme l'eau et des sols fertiles, sans oublier un climat tempéré. Rares sont les pays qui peuvent aujourd'hui à la fois produire du blé et en exporter. Or la demande s'accélère. Elle a doublé entre le début de la décennie 1970 et les années 2010, passant de 330 à environ 700 millions de tonnes (Mt). La consommation mondiale de blé devrait dépasser la barre des 900 Mt en 2050. Aujourd'hui le blé est la seconde céréale la plus produite dans le monde et représente 33 % de la production céréalière totale, derrière le maïs (46 %) et devant le riz blanchi (21 %) (USDA, 2016). Au cours de la année 2014/2015, une production record a été réalisée avec 730 millions de tonnes (Mt) produites (FAO, 2016), entraînant une augmentation du stock mondial estimé aujourd'hui à 200 Mt. Les premiers producteurs du blé sont la Chine, l'Inde, les États-Unis et la Russie (Figure 1).

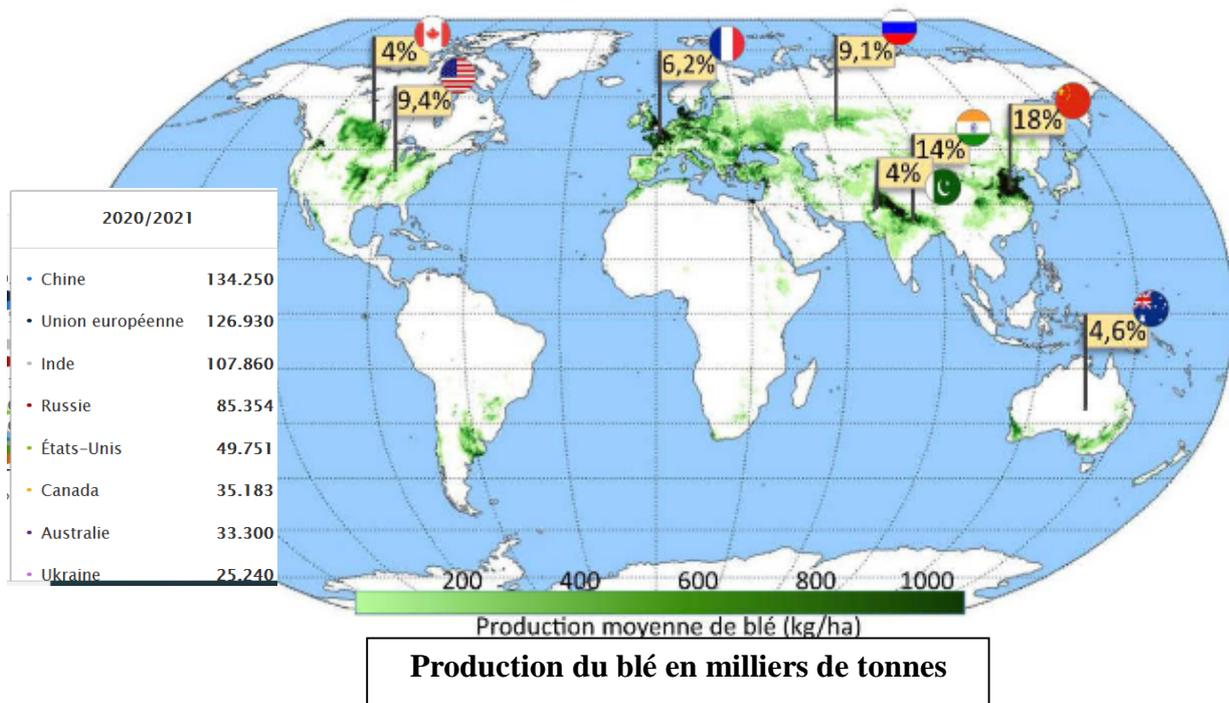


Figure 1. Principales zones et pays de production de blé dans le monde (FAOSTAT, 2021).

Sur la période de 2021 à 2022, l'Union européenne enregistrait une production supérieure à 138 millions de tonnes, la plaçant en tête des régions productrices de blé dans le monde. Cependant, la Chine produisait presque autant de blé que l'Union européenne sur cette saison. L'Inde était le troisième producteur mondial de blé avec près de 110 millions de tonnes (FAOSTAT, 2021).

- Répartitions et nécessité des échanges commerciaux

La récolte mondiale de blé ne varie que peu d'une année à l'autre et la tendance est à son augmentation régulière. Sur le siècle écoulé, l'offre s'est adaptée à la demande et que les récoltes ont même parfois augmenté plus vite que les besoins. La barre des 700 Mt en production vient d'être franchie depuis le début des années 2010. Pour en produire autant, ce sont 225 millions d'hectares qui sont actuellement consacrés à cette culture sur le globe.

Il convient de souligner que les deux tiers de la production mondiale de blé sont actuellement réalisés par cinq puissances uniquement (Union européenne, Chine, Inde, États-Unis et Russie).

1.2.1.2. En Algérie.

Le secteur de céréales se situe au premier ordre des priorités économiques et sociales du pays. Que l'Algérie a élaboré depuis son accès à l'indépendance. Ceci est dû au rôle que

jouent les céréales en tant que produits de première nécessité. La céréaliculture algérienne occupe une superficie de 3.3 millions d'hectares, dont 40-45 % sont réservés au blé dur

Si on s'intéresse d'une manière plus précise au blé, on constate qu'il occupe une place très importante dans la structure spatiale de l'activité agricole. Il occupe environ 60 % des superficies céréalières emblavées qui représentent environ 45 % de la SAU. Actuellement, la superficie moyenne du blé se situe à environ 1 664 345 Ha. Car les variations de la pluviométrie contribuent jusqu'à 50 % à la différence des rendements d'une année à l'autre, et où la céréaliculture est difficilement substituable.

Selon Chehat (2005), pour certaines années, les superficies récoltées ne représentent que 1/3 des superficies emblavées, cette situation peut être expliquée par des années de sécheresse qui touchent le pays. La culture du blé en Algérie est fortement tributaire des eaux de pluie

Selon le même auteur, on distingue trois zones céréalières en fonction des quantités de pluie reçues au cours de l'année et des quantités de céréales produites :

1. **Une zone à hautes potentialités (Z1) :** on y trouve une pluviométrie moyenne supérieure à 500 mm/an, avec des rendements moyens de 20q/ha (plaines de l'Algérois et Mitidja, bassin des Issers, vallées de la Soummam et de l'Oued El Kébir, vallée de la Seybouse...). Cette zone couvre une SAU de 400 000 ha dont moins de 20 % sont consacrés aux céréales.
2. **Une zone à moyennes potentialités (Z2) :** caractérisée par une pluviométrie supérieure comprise entre 400 et 500 mm/an, mais sujette à des crises climatiques élevées, les rendements peuvent varier de 5 à 15qx/ha (coteaux de Tlemcen, vallées du Chélif, massif de Médéa...). La zone englobe une SAU de 1 600 000 ha dont moins de la moitié est réservée aux céréales.
3. **Une zone à basses potentialités (Z3) :** caractérisée par un climat semi-aride et situé dans les hauts plateaux de l'Est et de l'Ouest et dans le Sud du Massif des Aurès. La moyenne des précipitations est inférieure à 350 mm par an. Ici, les rendements en grains sont le plus souvent inférieurs à 8qx/ha. La SAU de la zone atteint 4,5 millions d'ha dont près de la moitié est emblavée (Figure 2).

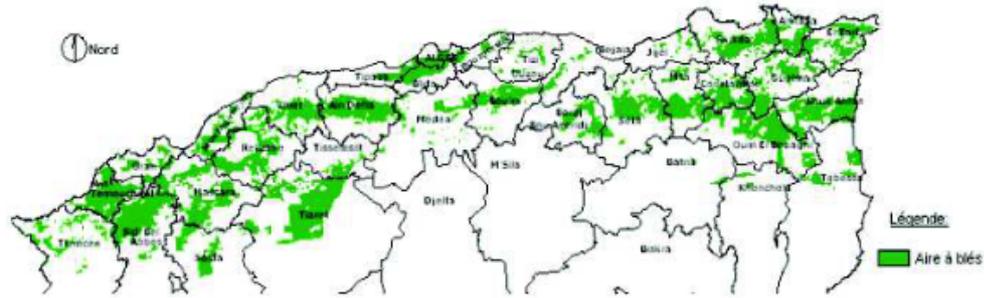


Figure 2. Aires de culture du blé en Algérie (Delli et al.,2002).

Le blé est à la base du régime alimentaire des consommateurs algériens. Mais le pays n'en produit pas suffisamment, notamment en raison de conditions climatiques défavorables.

Ainsi, Chehat (2005) a mis en cause de la baisse des rendements à la simplification des itinéraires techniques appliqués à la culture des blés (réduction des façons culturales, suppression du roulage après semis, de la fertilisation chimique et du désherbage) sont supprimées dans la majorité des exploitations céréalières. La simplification volontaire des itinéraires techniques se répercute inévitablement et de manière négative sur le rendement même lorsque les conditions climatiques ont été favorables.

En outre, la filière nationale peine à satisfaire les besoins croissants de sa population demeurent très importants du fait de la forte poussée démographique, de l'évolution des régimes alimentaires et des besoins de la l'alimentation animale. Le blé et ses produits dérivés sont le principal aliment de la population, ce qui confère à ce produit un rôle stratégique dans la situation locale. La consommation de blé dans le pays dépasse les 10,5 Mt, pour une production qui oscille en moyenne entre 2 et 3 Mt. Aujourd'hui l'Algérie ne couvre que 30 % de ses besoins alimentaires (Barlier, 2022), ce qui contraint le pays à importer près de 90 % de ses besoins en matière de blé tendre. L'Algérie fait ainsi partie des principaux importateurs mondiaux. Durant la année 2018/19, le pays a été le quatrième plus grand importateur de blé (7,52 Mt) (figure 3), derrière l'Égypte (12,3 Mt), l'Indonésie (10,9 Mt) et les Philippines (7,54 Mt) (USDA, 2019).

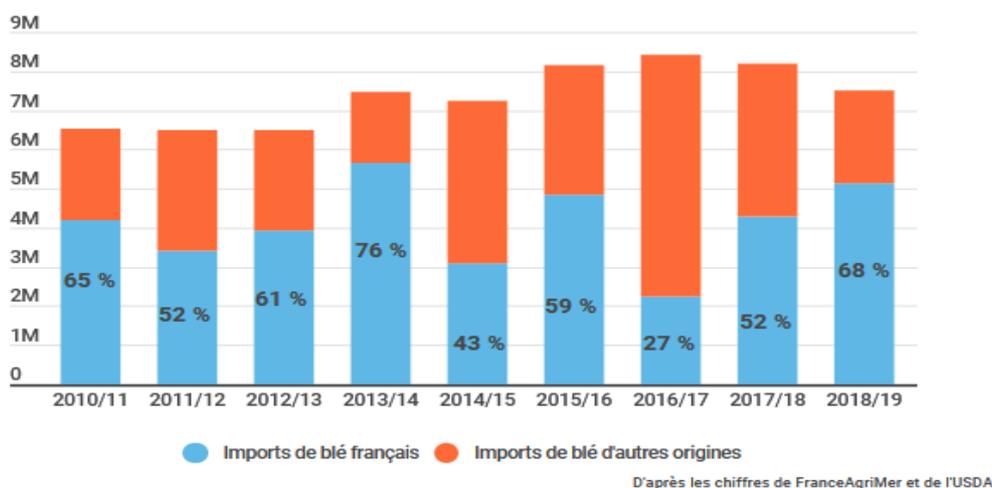


Figure 3. Importations algériennes de blé (AgriMer et USDA, 2019).

La politique de l'Algérie en vue de se prémunir des périodes de vaches maigres est la constitution de stocks de céréales. En Effet, un certain nombre de mesures ont été prises afin d'améliorer les capacités de production céréalière du pays et ainsi répondre à la demande nationale en blé et réduire la facture des importations alimentaires. Les experts du cabinet britannique de l'expertise économique et financière estiment la situation actuelle du marché marqué par une production en baisse en Afrique du Nord et des prix mondiaux à la hausse, ont renforcé la dépendance du pays face à l'importation de blé sur le court terme.

La production du pays varie entre 2 millions et 6 millions de tonnes, en fonction de la pluviosité. Cependant, le pays va rester dépendant des importations sur le moyen terme pour pouvoir répondre à une demande nationale en céréales estimées à environ 7 millions de tonnes par an et à une demande en blé meunier est estimée à elle seule à 450 000 tonnes par mois (Oxford Business Group, 2022).

L'Algérie fait partie des plus gros acheteurs mondiaux de blé. En 2021, le pays a dépensé environ 3 milliards de dollars en importations de blé, notamment de blé dur, de farine et de semoule (Reuters, 2022).

L'importation des céréales est confiée à l'Office Algérien Interprofessionnel des Céréales (OAIC) acteur majeur de la filière qui réalise 80 % des importations de céréales. Cet organisme public à travers son organisation interne, régionale et ses structures d'intervention assure la régulation de la filière et l'approvisionnement en céréales de tout le territoire national à travers sa propre organisation logistique (Ammar, 2014).

1.2.1.3. Le blé dans la région semi-aride.

Le blé est cultivé principalement dans les pays du bassin méditerranéen à climat aride et semi-aride là où l'agriculture est dans la plus mauvaise passe. Ces régions se caractérisent par

l'augmentation de la température couplée à la baisse des précipitations, en plus la désertification et la sécheresse (Abeledo et al., 2008).

La région semi-aride se caractérise par l'altitude, des hivers froids et des étés secs. La pluviométrie et les températures y accusent de grandes variations intra et interannuelles (Bouzerzour et al., 2002). Cette région, qui reste céréalière par nécessité, est confrontée à des sécheresses intermittentes s'accroissant au cours de la phase de remplissage du grain (Chennafi, et al, 2008a). Ces conditions climatiques variables affectent le niveau et la régularité de la production céréalière, essentiellement pluviale. En régions semi-arides, Nielsen (2002) rappelle que le facteur le plus limitant de la production est l'eau. En revanche, en dehors de l'irrigation d'appoint et de l'extension des surfaces pour augmenter la production, les alternatives sont peu nombreuses, et se limitent à l'adoption d'un itinéraire technique le plus adéquat possible, axé surtout sur la gestion de l'humidité du sol (Oweis et Tavakoli, 2004 ; Lopez-Bellido, 2007 ; Chennafi et al., 2011). Nielsen (2002) démontre les effets des systèmes culturaux dans les régions déficitaires en eau, par l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau définie comme le ratio du rendement grain sur l'évapotranspiration. L'objectif formulé consiste à gérer l'eau pluviale par la réduction des pertes par évaporation au profit de la transpiration de la plante. Dans ce contexte, le précédent cultural et la préparation du sol (émiettement, périodicité) affectent la quantité d'humidité du sol utilisable par la culture, ceci étant le principe de base de l'aridoculture nord-africaine (Lahmar et Bouzerzour, 2011).

- **Comment les régions sèches produisent du blé dur ?**

Les effets du réchauffement climatique commencent à se faire sentir. Dans cette situation, il peut être intéressant de regarder comment les régions sèches produisent du blé dur.

Pour développer la culture du blé dur dans la zone semi-aride, la Syrie a adopté des variétés développées dans un programme sur le blé dur d'ICARDA qui combinent le potentiel de rendement et la tolérance aux stress abiotiques et notamment la sécheresse (qui permettent de faire 50 quintaux avec 300 à 400 mm d'eau).

La variété constitue la base de la production de blé dur en Syrie à laquelle se greffent des méthodes agronomiques. Ainsi l'introduction de légumineuses dans la rotation est une technique très utilisée pour augmenter les rendements (introduction de la vesce à foin dans la rotation. Elle joue presque comme un rôle de jachère. Avec une production 50 à 60 quintaux) (Miloudi, 2008).

1.3. Rôle de l'azote dans la plante de blé.

Selon Guyot (2010), l'azote joue un rôle essentiel dans la plante de blé. Une disponibilité adéquate en cet élément est cruciale pour assurer un rendement optimal et une qualité des grains satisfaisante.

Il est indispensable à la synthèse des protéines, à la formation de la chlorophylle, à la croissance végétative, au développement des organes reproducteurs et au métabolisme des glucides dans la plante de blé.

1.3.1. Formation des protéines.

L'azote est un élément constitutif majeur des protéines. Il est nécessaire à la synthèse des acides aminés, qui sont les blocs de construction des protéines. Ces dernières sont impliquées dans de nombreux processus biologiques, tels que la croissance cellulaire, la formation des tissus végétaux, la régulation enzymatique et le transport des nutriments.

1.3.2. Synthèse de la chlorophylle.

L'azote est un composant essentiel de la chlorophylle, le pigment responsable de la photosynthèse. La chlorophylle capte l'énergie lumineuse et l'utilise pour convertir le dioxyde de carbone et l'eau en hydrates de carbone, produisant ainsi l'énergie nécessaire à la croissance et au développement de la plante.

1.3.3. Croissance végétative.

L'azote favorise la croissance végétative du blé en stimulant la production de nouvelles feuilles, de tiges et de racines. Il contribue à l'expansion cellulaire, à la division cellulaire et à l'activation des processus métaboliques nécessaires à la croissance des organes végétatifs.

1.3.4. Développement des organes reproducteurs.

L'azote est important pour le développement des organes reproducteurs du blé, tels que les épis. Il favorise la formation et la maturation des grains de blé, ce qui influe directement sur le rendement de la culture.

1.3.5. Métabolisme des glucides.

L'azote participe au métabolisme des glucides dans la plante de blé. Il est nécessaire à la conversion et à l'utilisation efficace des sucres produits par la photosynthèse, ce qui permet de fournir l'énergie nécessaire à la croissance et à la production de grains.

1.4. Besoins en azote du blé.

Plusieurs auteurs ont proposé les besoins en azote pour les différents stades de développement du blé.

D'après Lea (1993), ces besoins sont estimés comme suit :

- **Stade de la germination** : Les besoins en azote sont faibles à ce stade.
- **Stade de la croissance végétative** : Les besoins en azote augmentent progressivement à mesure que la plante se développe, et atteignent un pic lors de la phase d'élongation de la tige. Les auteurs estiment que les besoins en azote peuvent varier de 1,5 à 3,5 g par jour à ce stade.
- **Stade de la floraison** : Les besoins en azote atteignent un pic à ce stade, car la plante doit produire des protéines pour les organes reproducteurs. Les auteurs recommandent une application d'azote de 4 à 5 g par jour à ce stade.
- **Stade de remplissage des grains** : Les besoins en azote restent élevés à ce stade, car la plante doit produire des protéines pour remplir les grains. Les auteurs recommandent une application d'azote de 3 à 4 g par jour à ce stade.

Lea (1993) souligne que ces estimations de besoins en azote sont basées sur des conditions de sols favorables et peuvent varier en fonction des conditions spécifiques de chaque culture. Il insiste également que la répartition de l'azote dans la plante peut varier selon le stade de développement, et que la synchronisation de l'application d'azote avec les stades de croissance du blé est essentielle pour maximiser l'utilisation de l'azote par la culture.

De leurs parts Kumer et al. (2019) et Gholizadeh et al. (2020) soulignent l'importance de l'application d'azote à des stades précis pour maximiser l'utilisation de l'azote par la culture et minimiser les pertes d'azote dans l'environnement.

Les besoins en azote du blé sont influencés par des facteurs environnementaux tels que le climat, le sol et les pratiques agronomiques. Comprendre ces influences est essentiel pour

une gestion efficace de la fertilisation azotée, permettant ainsi d'optimiser le rendement et la qualité des cultures de blé (Cruz, 2012).

1.4.1. Méthodes et recommandations pour évaluer les besoins en azote du blé.

L'évaluation des besoins en azote du blé est essentielle pour une gestion efficace de la fertilisation azotée, ce qui permet d'optimiser le rendement et la qualité des cultures. Il existe différentes méthodes et recommandations disponibles pour estimer les besoins en azote du blé, chacune offrant ses avantages et ses limites. Ces méthodes sont utilisées par les agriculteurs et les agronomes pour prendre des décisions éclairées sur les quantités d'azote à appliquer.

Selon Plénet (2015) et Benton (2012), les méthodes et les recommandations les plus couramment utilisées sont :

1.4.1.1. Analyses de sol :

Les analyses de sol fournissent des informations sur la disponibilité en azote du sol, ce qui peut être utile pour déterminer les besoins en azote du blé. Les tests de laboratoire peuvent mesurer la teneur en azote minéral et organique du sol, ainsi que d'autres paramètres pertinents tels que le pH et la capacité d'échange cationique. Ces analyses permettent d'estimer la quantité d'azote déjà présente dans le sol et de déterminer la quantité supplémentaire nécessaire pour atteindre les objectifs de rendement.

Les méthodes d'analyse du sol sont les suivantes :

a- Évaluation de l'Indice la Disponibilité de l'Azote (IDA) pour les plantes.

Les tests de disponible de l'azote pour plantes dans le sol est difficile. Cette difficulté est due en partie au fait que la plupart de l'azote dans le sol est sous des formes organiques, qui ont différents taux de transformation microbienne. Aussi, le NO_3^- , principale forme d'azote disponible pour la plante, est soumise à la lixiviation, la dénitrification, et l'immobilisation.

De nombreuses tentatives ont été faites pour développer des indices de disponibilité pour la libération de l'azote de la matière organique et à mettre en corrélation avec le rendement et les tests de l'azote inorganique dans les sols. Les tests biologiques prennent

beaucoup de temps et donnent des résultats variables si les méthodes ne sont pas normalisées entre les chercheurs. Les essais chimiques pour l'estimation de l'azote disponible plantes ont été empiriques dans leurs approches et ont eu peu de corrélations avec la production de l'azote minéral et l'accumulation de l'azote par les cultures (Barker et Bryson, 2007).

L'IDA est définie comme étant une valeur quantitative de l'indice de propriété du sol (ou un groupe de propriétés), qui correspond à la quantité d'azote que le sol met à la disposition de la culture, au cours de sa saison de croissance. Ces indices sont des outils de gestion utiles pour évaluer les taux de la fertilisation azotée (Gowariker et al., 2009).

b-Détermination de l'azote total.

La détermination de l'azote par la méthode de Kjeldahl donne une estimation de la quantité totale d'azote dans les sols. Ce test, souvent considéré comme un indice chimique pour l'ensemble de la matière organique (MO) du sol, car la concentration d'azote de la MO du sol est relativement constante. L'azote total du sol et la MO du sol ont été parmi les premiers indices utilisés et sont toujours en vogue pour indiquer l'azote disponible. Cette mesure ne peut pas estimer le taux de transformation de l'azote organique en formes inorganiques qui sont disponibles pour les plantes ; par conséquent, de nombreuses irrégularités dans la prévision de l'azote disponible dans son utilisation (Gowariker et al., 2009 ; Barker et Bryson, 2007). Toutefois, considérant que les transformations de N organique dépendent du type de MO, la température, l'aération, l'approvisionnement en eau, l'acidité, et d'autres facteurs, l'azote total est probablement aussi informatif que la détermination de la disponibilité d'autres indices.

c-Déterminations biologique de l'IDA.

De nombreux tests biologiques ont également été proposés, tel l'azote minéralisé dans 14 à 112 jours ou en 14 à 78 jours d'incubation Aérobie, d'incubation (Gowariker et al., 2009). Barker et Bryson (2007) proposent l'incubation des échantillons de sol pour 14 à 28 jours. D'autres méthodes telles que la libération de N par autoclavage et la minéralisation en anaérobie. Celles-ci n'ont pas été acceptées universellement, seulement celles basées sur libération du NO_3^- ont été acceptées (Gowariker et al., 2009). Les méthodes biologiques représentent seulement une estimation étant donné que la minéralisation dans le champ varie au cours de l'année.

d-Les extractions chimiques.

Les autres IDA qui sont déterminées par une extraction des sols avec de l'eau bouillante ou des solutions d'acides, bases, agents chélatants ou des sels à différentes concentrations et de températures. Ces extractions chimiques sont aussi populaires du fait qu'elles sont simples et prennent moins de temps. Parmi ces méthodes ou l'agent d'hydrolyse est soit : le sulfate d'ammonium de [1N ou 6N (NH₄)₂SO₄], l'hydroxyde de calcium (CaOH₂), l'hydroxyde de baryum (BaOH₂), le permanganate de potassium (KMnO₄), le chlorure de calcium (0.01N CaCl₂) et aussi d'hydroxyde de sodium (1N, NaOH). L'électro-ultrafiltration, qui est une forme d'électrophorèse, est utilisée en Allemagne pour déterminer l'exigence de l'engrais azoté pour les betteraves à sucre (Gowariker et al., 2009 ; Barker et Bryson, 2007).

e-Détermination de l'azote inorganique.

Du fait des faibles corrélations entre les méthodes d'extractions chimiques, biologiques le prélèvement de N par les plantes, des méthodes de dosage de l'azote minéral dans le sol ont été envisagées dans le but de trouver des corrélations avec l'assimilation de N par le végétal.

- Ammonium

L'ammonification est le passage de N-organique à N-inorganique, le NH₄⁺ ainsi produit se transforme rapidement en NO₃⁻. C'est pourquoi en général l'ammonium ne s'accumule pas dans les sols minéraux. Garcia et Hanway (1976) ont montré que la mesure initiale de NH₄⁺ dans le sol pendant l'échantillonnage est faiblement corrélée avec l'accumulation d'azote dans les plantes.

- Nitrate

Le nitrate est la forme de l'azote la plus utilisée par les plantes et peut s'accumuler dans les sols agricoles dépendamment du régime hydrique, sa teneur est très variable dans le temps et l'espace (le profil). Depuis le début des années 1900, les concentrations en nitrates dans les sols ont été utilisées dans les évaluations de la fertilité des sols (Barker et Bryson, 2007). Des travaux récents pour les prévisions des besoins de fertilisation azotée pour les cultures ont montré que les tests des nitrates dans les sols au printemps pouvaient prédire les rendements

des cultures. Ces tests sont communément appelés tests de prélevée test de nitrate (Pre-Plant Nitrate Test : PPNT). Pour mesurer le PPNT des échantillons de sol sont pris à partir d'une profondeur de 60 à 120 cm, juste avant le semi ou juste après la récolte (Gowariker et al., 2009 ; Barker et Bryson, 2007).

Un autre test de nitrate en postlevée (Pre-Sidedress soil Nitrate Test : PSNT) a été développé à l'université du Vermont par Magdoff et al., (1984). Ce test est considéré comme une photo ponctuelle du niveau de NO₃ accumulé dans les 30 premiers centimètres du sol. Le PSNT permet d'apprécier d'une part, si le N résiduel de la culture précédente est resté dans le profil, et d'autres parts le taux de minéralisation de N organique du sol. Grâce à des équipements portatifs d'analyse du NO₃ (nitrate-check), cette approche s'est popularisée, elle est presque généralisée dans la plupart des guides de fertilisation en Amérique du Nord.

1.4.1.2 . Indicateurs de croissance.

Certains indicateurs de croissance du blé, tels que la hauteur de la plante, la couleur des feuilles, la densité foliaire et la biomasse, peuvent donner des indices sur les besoins en azote. Par exemple, une faible hauteur de plante ou une couleur de feuille pâle peut indiquer un manque d'azote, tandis qu'une biomasse élevée peut suggérer un excès d'azote. L'observation visuelle de ces indicateurs peut aider à ajuster les niveaux d'apport en azote pendant la saison de croissance.

Il existe plusieurs approches diagnostiques des normes nutritives à savoir :

- i. La valeur minimale critique (VMC) ou d'intervalles critiques de suffisance**
- ii. Le DRIS (Diagnosis and Recommendation Integrated System)**
- iii. i. La valeur minimale critique (VMC) ou d'intervalles critiques de suffisance**
ii. Le DRIS (Diagnosis and Recommendation Integrated System) iii. Le CND (Compositional Nutrient Diagnosis) iii. Le CND (Compositional Nutrient Diagnosis)

a Valeur minimale critique (VMC) et intervalles de suffisance.

La VMC est la concentration d'un élément dans un tissu qui correspond à 90-95% du rendement maximal sur la courbe de rendement. Cette valeur peut être établie à partir d'expériences de fertilisation où l'élément en question est ajouté à des doses croissantes, en

postulant que les autres éléments sont présents en quantité suffisante, mais non excessives (attention ! cette condition n'est pas toujours respectée !). Si la courbe de réponse s'étend suffisamment vers la droite et s'affaisse, il est possible de définir un second seuil, le seuil d'excès. Il n'est généralement pas facile d'attribuer l'excès à un antagonisme ou à une toxicité sans recherche spécifique sur les mécanismes d'action.

Dans un cycle végétatif, la plante passe par plusieurs stades de développement à savoir ; implantation, croissance exponentielle et maturation. Dans la phase de l'implantation (installation), peu d'information ne peut être recueillie du moment que la plantule a un faible taux de croissance. C'est pourquoi la valeur diagnostique est faible à ce niveau. La phase de croissance exponentielle, qui exige une grande quantité de nutriments rapidement disponibles, a une grande valeur diagnostique. Enfin, la phase de maturation suscite peu d'intérêt sauf si l'on veut connaître la qualité d'éléments nutritifs exportés par la récolte. Ceci implique que pour effectuer un bon diagnostic, la période de l'échantillonnage et la partie de la plante à échantillonner sont d'une importance capitale. D'autres paramètres peuvent interférer tel que ; position du tissu échantillonné, stade phénologique, interactions entre les éléments, cultivar, conditions pédoclimatiques, lumière, période de la journée (pour le nitrate). L'approche VMC est actuellement la plus courante pour diagnostiquer les résultats des analyses tissulaires.

1.4.1.3. Modèles de prévision :

Les modèles de prévision utilisent des données météorologiques, des caractéristiques du sol et des informations sur le blé pour estimer les besoins en azote. Ces modèles prennent en compte des facteurs tels que la température, les précipitations, la croissance de la plante et la demande d'azote pour déterminer les recommandations d'apport en azote. Ces modèles peuvent être basés sur des équations mathématiques ou des systèmes d'aide à la décision basés sur des algorithmes.

La discussion des différentes méthodes et recommandations pour évaluer les besoins en azote du blé est un aspect important de la gestion de la fertilisation azotée dans les cultures de blé. Les agriculteurs et les agronomes doivent choisir la méthode la plus appropriée pour estimer les besoins en azote afin d'optimiser le rendement et la qualité des cultures tout en minimisant les pertes d'azote dans l'environnement.

1.4.2. Stratégies de fertilisation azotée.

L'objectif des stratégies de fertilisation azotée est de fournir aux plantes la quantité d'azote nécessaire pour répondre à leurs besoins tout en minimisant les pertes d'azote dans l'environnement. Une fertilisation adéquate en azote permet d'améliorer la productivité agricole tout en réduisant les impacts négatifs sur les écosystèmes et les ressources naturelles.

Les stratégies de fertilisation azotée peuvent également inclure des pratiques de gestion agronomique telles que la rotation des cultures, l'utilisation d'engrais organique, la gestion de l'irrigation et l'utilisation de technologies de pointe telles que l'agriculture de précision. L'objectif est d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote en minimisant les pertes, qu'elles soient liées à la volatilisation, à la lixiviation dans les eaux souterraines ou à l'émission de gaz à effet de serre.

Selon Nielsen (2017) et Fageria et Baligar (2008), il existe différentes méthodes d'apport d'azote dans les cultures, notamment :

1.4.2.1. Engrais minéraux.

Les engrais minéraux sont des sources d'azote solubles qui peuvent être appliquées directement sur le sol. Les types courants d'engrais azotés minéraux comprennent l'urée, le nitrate d'ammonium et le sulfate d'ammonium. Ils offrent une libération rapide de l'azote, ce qui en fait une option populaire pour répondre rapidement aux besoins des plantes.

1.4.2.2. Fumure organique.

La fumure organique consiste à apporter de la matière organique riche en azote au sol, telle que le fumier, le compost ou les résidus de culture. Ces sources d'azote organique se décomposent lentement dans le sol, libérant progressivement l'azote pour les plantes. La fumure organique améliore également la fertilité globale du sol en améliorant sa structure et sa capacité de rétention d'eau.

1.4.2.3. Cultures de légumineuses.

Les légumineuses ont la capacité de fixer l'azote atmosphérique grâce à la symbiose avec des bactéries spécifiques présentes dans leurs racines. Ces cultures sont souvent utilisées

comme cultures de couverture ou en rotation avec d'autres cultures pour enrichir le sol en azote grâce à la fixation biologique de l'azote.

1.4.2.4. Récupération de l'azote.

Certaines pratiques agronomiques, telles que la réutilisation des résidus de culture, la gestion des cultures de couverture ou la collecte des eaux de drainage, peuvent permettre de récupérer l'azote perdu dans le système et de le réutiliser dans les cultures suivantes.

1.4.2.5. Technologies de libération contrôlée.

Il existe également des technologies de libération contrôlée de l'azote, telles que les engrais à libération lente ou les revêtements d'azote qui retardent la libération de l'azote dans le sol. Ces technologies visent à améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote en fournissant une libération progressive et ciblée de l'élément aux plantes.

Il est important de choisir la méthode d'apport d'azote appropriée en fonction des conditions spécifiques du sol, des cultures cultivées et des objectifs de gestion agricole. Les recommandations d'apport d'azote sont généralement basées sur des évaluations de la fertilité du sol, des analyses de laboratoire, des pratiques agronomiques et des objectifs de rendement.

1.4.3. Différentes techniques de fractionnement de l'apport d'azote.

L'utilisation de techniques de fractionnement de l'apport d'azote est une pratique courante dans la gestion de la fertilisation azotée dans l'agriculture. Cette approche vise à fournir l'azote nécessaire aux cultures de manière plus efficace, en répartissant les apports d'engrais tout au long de la saison de croissance.

1.4.3.1. Apport de l'azote au semis.

L'apport de l'azote au semis est l'une des techniques de fertilisation utilisées dans l'agriculture pour fournir une quantité initiale d'azote aux cultures dès le début de leur croissance. L'objectif de l'apport d'azote au semis est de soutenir le développement initial des plantes et de favoriser une croissance vigoureuse dès le départ.

Pour éviter les pertes d'azote et maximiser son utilisation par les plantes, il est recommandé d'appliquer l'azote au semis à des doses modérées et de prévoir des apports

supplémentaires au cours de la saison de croissance, en fonction des besoins spécifiques de la culture (Meena et al., 2017).

1.4.3.2. Apport en cours de saison.

L'apport de l'azote en cours de saison est une autre technique couramment utilisée, c'est un apport en cours de saison, où l'azote est appliqué de manière fractionnée tout au long de la croissance des cultures. Cela peut se faire par des applications foliaires, des applications au sol à des stades de croissance spécifiques ou par irrigation fertigation. Cette approche permet de répondre de manière plus précise aux besoins en azote des cultures à différentes étapes de croissance, en évitant les surdosages initiaux ou les carences ultérieures (Wallace et Johnston, 2016).

1.4.4. Effets de la quantité, du moment et du mode d'application de l'azote sur le blé.

Les effets de la quantité, du moment et du mode d'application de l'azote sur le rendement, la qualité des grains et l'efficacité d'utilisation de l'azote par la plante sont des éléments clés à prendre en compte lors de la fertilisation azotée.

1.4.4.1. Quantité d'azote appliquée.

Elle peut avoir un impact significatif sur le rendement de la culture. Un apport adéquat d'azote est nécessaire pour soutenir la croissance vigoureuse de la plante, favoriser le développement des organes reproducteurs et maximiser la production de grains. Une quantité insuffisante d'azote peut entraîner une réduction du rendement, tandis qu'une surdose peut entraîner un gaspillage de ressources et des problèmes environnementaux tels que la pollution de l'eau (Fageria et Baligar, 2014).

1.4.4.2. Moment d'application de l'azote.

D'après Follett et Hatfield (2008), le moment d'application de l'azote est également crucial. Le blé a des besoins en azote qui varient tout au long de son cycle de croissance. Une répartition équilibrée de l'apport d'azote tout au long de la saison de croissance permet de répondre aux besoins spécifiques de la plante à différentes étapes, telles que le tallage, la montaison, la floraison et la formation des grains. Cela peut contribuer à optimiser le rendement et la qualité des grains.

1.4.4.3. Mode d'application de l'azote.

Le mode d'application de l'azote fait référence à la méthode utilisée pour fournir l'azote à la plante. Il peut s'agir d'applications foliaires, d'applications au sol par épandage ou par irrigation fertigation. Chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients en termes d'efficacité d'utilisation de l'azote, de facilité d'application et d'impact sur l'environnement. Par exemple, les applications foliaires peuvent permettre une absorption rapide de l'azote par les feuilles, tandis que l'irrigation fertigation peut assurer une distribution homogène de l'azote dans le système racinaire de la plante (Wallace et Johnston, 2016).

En résumé, la quantité, le moment et le mode d'application de l'azote ont des implications directes sur le rendement, la qualité des grains et l'efficacité d'utilisation de l'azote par la plante de blé. Il est essentiel de trouver un équilibre approprié en ajustant ces facteurs en fonction des conditions spécifiques de culture et des objectifs de gestion, afin d'optimiser les résultats agronomiques tout en minimisant les impacts environnementaux.

1.4.5. Facteurs influençant l'utilisation de l'azote par le blé.

1.4.5.1. Facteurs liés au sol et d'autres facteurs agronomiques.

La disponibilité du sol, l'acidité du sol, la compétition des mauvaises herbes et d'autres facteurs agronomiques peuvent avoir un impact significatif sur l'utilisation de l'azote par le blé.

Selon Hawkesford et Barraclough (2011), ces facteurs peuvent influencer l'utilisation de l'azote de la manière suivante :

1. **Disponibilité du sol :** La quantité d'azote disponible dans le sol joue un rôle crucial dans l'utilisation de l'azote par le blé. Un sol riche en matière organique et en nutriments favorise une disponibilité adéquate de l'azote, ce qui permet à la plante de l'absorber et de l'utiliser efficacement. Des pratiques de gestion telles que la fertilisation adéquate, la rotation des cultures et l'application d'amendements organiques peuvent contribuer à améliorer la disponibilité de l'azote dans le sol.
2. **Acidité du sol :** L'acidité du sol peut affecter l'utilisation de l'azote par le blé. Un pH du sol trop élevé ou trop bas peut inhiber l'absorption des nutriments par les racines de la plante, y compris l'azote. Un équilibre approprié du pH du sol, généralement dans la

plage de pH neutre, est essentiel pour favoriser une utilisation efficace de l'azote par le blé.

3. **Compétition des mauvaises herbes :** Les mauvaises herbes compétitrices peuvent réduire la disponibilité de l'azote pour le blé en utilisant les ressources du sol, y compris l'azote. Elles peuvent concurrencer le blé pour l'absorption de l'azote, ce qui peut entraîner une carence en azote pour la culture. Un bon contrôle des mauvaises herbes à l'aide de pratiques agronomiques telles que le désherbage mécanique, chimique ou culturel peut réduire la compétition des mauvaises herbes et favoriser une utilisation efficace de l'azote par le blé.
4. **Autres facteurs agronomiques :** D'autres facteurs tels que la densité de semis, la gestion de l'eau, la gestion des maladies et des ravageurs peuvent également influencer l'utilisation de l'azote par le blé. Une densité de semis adéquate permet une répartition appropriée des ressources, y compris l'azote, entre les plantes individuelles. Une gestion adéquate de l'eau assure une disponibilité suffisante de l'azote dans le système racinaire du blé. La gestion des maladies et des ravageurs contribuent à maintenir la santé de la plante, ce qui favorise une utilisation efficace de l'azote.

Pour optimiser l'utilisation de l'azote par le blé, il faut prendre en compte ces facteurs agronomiques, tout en mettant en œuvre des pratiques de gestion appropriées pour optimiser l'utilisation de l'azote par le blé, ce qui se traduit par une amélioration du rendement et de la qualité des grains.

1.4.5.2. Interaction entre l'azote et d'autres nutriments.

L'interaction entre l'azote et d'autres nutriments, tels que le phosphore, le potassium et d'autres éléments nutritifs, joue un rôle crucial dans la nutrition azotée du blé. Ces éléments nutritifs sont essentiels à la croissance et au développement des plantes, et leur disponibilité peut influencer l'utilisation de l'azote par la plante.

Selon Benton (2012), l'azote est un élément clé pour la croissance du blé. Cependant, la disponibilité d'autres nutriments, comme le phosphore et le potassium, peut affecter l'absorption et l'utilisation de l'azote par la plante. Par exemple, une carence en phosphore peut limiter la capacité de la plante à absorber et à utiliser efficacement l'azote, car le phosphore est nécessaire pour la conversion de l'azote inorganique en formes organiques utilisables par la plante. De l'azote et affecter le transport de l'azote dans la plante.

D'autre part, un excès de certains nutriments, tels que le potassium, peut également influencer l'utilisation de l'azote. Un déséquilibre entre l'azote et d'autres nutriments peut perturber l'absorption et le métabolisme de l'azote, entraînant des effets néfastes sur la croissance et le rendement du blé.

Il est donc essentiel de maintenir un équilibre adéquat entre l'azote et d'autres nutriments dans le sol pour optimiser la nutrition azotée du blé. Cela peut être réalisé en fournissant des niveaux appropriés de tous les nutriments nécessaires et en ajustant les ratios d'apport en fonction des besoins spécifiques de la culture et des conditions du sol.

En résumé, l'interaction entre l'azote et d'autres nutriments joue un rôle crucial dans la nutrition azotée du blé. La disponibilité et l'équilibre adéquat de ces nutriments dans le sol sont essentiels pour assurer une utilisation efficace de l'azote par la plante, ce qui a un impact direct sur la croissance, le rendement et la qualité du blé.

1.4.6. Les pratiques culturales.

Les pratiques culturales jouent un rôle crucial dans l'utilisation de l'azote par le blé. Différentes pratiques, telles que l'irrigation, la gestion des résidus et la rotation des cultures, peuvent avoir des effets significatifs sur la disponibilité de l'azote dans le sol, son absorption par les plantes de blé et son utilisation efficace.

Benton (2012) a expliqué le rôle des pratiques culturales dans l'utilisation de l'azote par le blé, de la façon suivante :

L'irrigation peut influencer la disponibilité de l'azote dans le sol en régulant la teneur en eau. Un apport adéquat en eau peut favoriser l'activité microbienne et la minéralisation de l'azote organique, ce qui rendra l'azote disponible pour les plantes. Cependant, une irrigation excessive peut entraîner des pertes d'azote par lixiviation, ce qui réduit son utilisation par les plantes.

La gestion des résidus, tels que les résidus de culture et les engrais organiques, peut également influencer l'utilisation de l'azote par le blé. Les résidus de culture peuvent contribuer à la libération d'azote dans le sol par décomposition microbienne, tandis que les engrais organiques peuvent fournir de l'azote sous une forme organique qui doit être minéralisée avant d'être utilisée par les plantes.

La rotation des cultures peut avoir des effets positifs sur l'utilisation de l'azote par le blé. Par exemple, les cultures légumineuses fixent l'azote atmosphérique grâce à leur relation symbiotique avec des bactéries spécifiques, ce qui enrichit le sol en azote pour les cultures suivantes, comme le blé.

1.4.7. Évaluation de l'efficacité de la nutrition azotée.

1.4.7.1. Méthodes d'évaluation de l'efficacité d'utilisation de l'azote par le blé.

Les méthodes d'évaluation de l'efficacité d'utilisation de l'azote par le blé sont essentielles pour évaluer l'efficience avec laquelle la plante utilise l'azote fourni par la fertilisation

plusieurs auteurs Follett et Hatfield (2008), Barraclough (2011), Benton (2012) et Hawkesford et al. (2014) indiquent que les différents paramètres qui peuvent être pris en compte pour évaluer cette efficacité sont :

1. Rendement.

Le rendement est l'un des indicateurs les plus couramment utilisés pour évaluer l'efficacité d'utilisation de l'azote. Une augmentation du rendement avec une quantité d'azote appliquée donnée indique une utilisation efficace de l'azote par la plante.

2. Teneur en protéines.

La teneur en protéines du grain de blé est souvent utilisée comme indicateur de l'utilisation de l'azote. Une teneur en protéines plus élevée peut indiquer une utilisation plus efficace de l'azote par la plante, car l'azote est un élément essentiel dans la synthèse des protéines.

3. Indice de récolte.

L'indice de récolte est un indicateur qui mesure la quantité d'azote accumulée dans la partie récoltable de la plante (grains) par rapport à la quantité totale d'azote absorbée. Un indice de récolte élevé indique une utilisation plus efficace de l'azote.

4. Bilan d'azote.

Le bilan d'azote permet d'évaluer la quantité d'azote absorbée par la plante par rapport à la quantité perdue sous forme de pertes (volatilisation, lessivage, dénitrification). Un bilan d'azote équilibré indique une utilisation efficace de l'azote.

5. Indices de nutrition azotée.

Certains indices de diagnostic peuvent être utilisés pour évaluer l'état nutritionnel en azote de la plante, tels que le contenu en chlorophylle des feuilles ou le rapport entre la teneur en nitrate et la teneur en chlorophylle.

Ces différentes méthodes d'évaluation permettent de mesurer l'efficacité d'utilisation de l'azote par le blé et de guider les décisions en matière de gestion de la fertilisation azotée pour optimiser le rendement et la qualité des cultures. Il est important d'utiliser une combinaison de ces méthodes pour obtenir une évaluation complète de l'efficacité d'utilisation de l'azote.

1.4.7.2. Discussion des indicateurs de l'efficacité d'utilisation de l'azote et de leur interprétation.

La discussion des indicateurs de l'efficacité d'utilisation de l'azote, précédemment cités, se concentre sur les mesures et les paramètres utilisés pour évaluer comment le blé utilise l'azote disponible. Ces indicateurs fournissent des informations essentielles sur l'efficacité de l'utilisation de l'azote par la plante et permettent d'évaluer l'efficacité des pratiques de gestion de l'azote (Follett et Hatfield, 2008 et Benton, 2012).

L'interprétation de ces indicateurs dépend des objectifs spécifiques de la culture et des conditions environnementales. Les chercheurs utilisent ces indicateurs pour évaluer l'efficacité des pratiques de gestion de l'azote et pour prendre des décisions éclairées en matière de fertilisation et de gestion des cultures (Hawkesford et Barraclough, 2011 et Benton, 2012).

Selon Fageria et Baligar (2014), il convient de noter que l'interprétation des indicateurs peut varier en fonction des différentes régions, des systèmes de culture et des objectifs de production. Il est donc important de prendre en compte les recommandations spécifiques à chaque contexte pour une évaluation précise de l'efficacité d'utilisation de l'azote dans le cas du blé.

1.5. Besoins en eau du blé.

Les besoins en eau du blé dur varient selon les stades de développement de la plante. Dans leurs travaux, Mahdi et al. (2017) estiment des besoins en eau pour chaque stade de développement comme suit :

De la germination à la levée (20 à 30 jours), les besoins en eau sont de l'ordre de 200 à 250 mm.

Du tallage à la fin de la croissance des feuilles (30 à 70 jours) ; les besoins en eau sont de 300 à 350 mm.

Du début de la formation de l'épi à la floraison (70 à 110 jours), les besoins en eau sont de 400 à 450 mm.

De la floraison à la maturité (110 à 150 jours), les besoins en eau sont de 450 à 500 mm

Ils soulignent que ces estimations peuvent varier en fonction des conditions climatiques, de la variété de blé cultivée, du type de sol, et des pratiques agronomiques utilisées. Il est donc important de considérer ces facteurs lors de l'estimation des besoins en eau du blé dur.

1.6. Utilisation des engrais azotés.

1.6.1. Dans le monde.

Afin d'augmenter les rendements et la production agricole mondiale, l'emploi d'azote a considérablement augmenté depuis le milieu du XXe siècle (Cassman et al., 2003 ; Hirel et al., 2011).

Les apports d'azote aux cultures ont globalement considérablement augmenté depuis les années 1960, avec des pays occidentaux et asiatiques qui ont par exemple des consommations très largement supérieures à celle des pays africains (de nombreux agriculteurs en subsistance dépendent du capital azoté de leur sol et n'ont pas accès aux engrais azotés (commerciaux) (Cassman, 2021).

Selon FAO (2020), la consommation mondiale d'engrais azotés a atteint environ 118 millions de tonnes en 2020, les principaux pays consommateurs d'engrais azotés sont la Chine, l'Inde, les États-Unis, le Brésil et la Russie.

L'utilisation des engrais azotés est plus répandue dans les cultures céréalières, telles que le blé, le maïs et le riz, qui ont des besoins élevés en azote pour leur croissance et leur rendement.

L'utilisation des engrais azotés peut varier d'une région à l'autre en fonction des pratiques agricoles, des politiques de fertilisation et des disponibilités locales.

1.6.2. En Algérie.

L'utilisation de fertilisant azoté en Algérie connaît une large variation dans la quantité utilisée au cours de la période 2002 à 2016. Cette variation est indépendante des disponibilités

des fertilisants, il est corrélé très fortement avec la dose appliquée par les agriculteurs. Il est variable au cours des années. La dose appliquée est de près de 13kg/ha contrairement à l'année 2005, avec une dose appliquée autour de 1 kg/ha (FAOSTAT, 2019b).

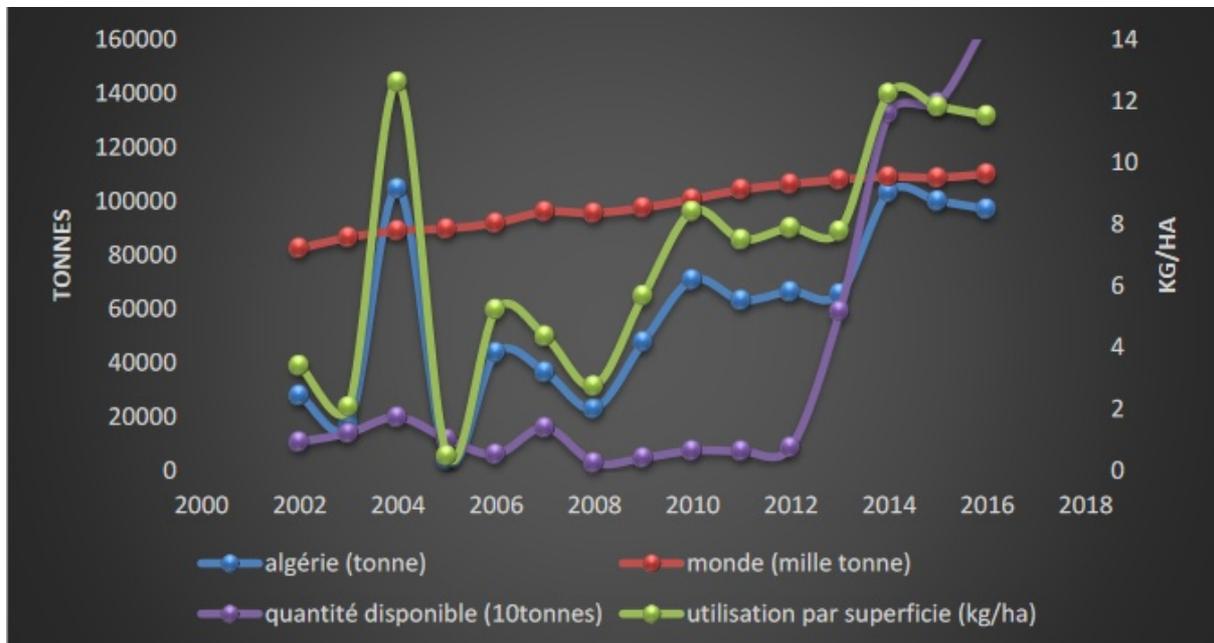


Figure 4. Utilisation des engrais azotés dans le monde et dans l'Algérie (FAOSTAT, 2019b)

La variation interannuelle d'utilisation d'azote en Algérie, ainsi que la dose appliquée par hectare permettent de constater que cette pratique est moins maîtrisée par les agriculteurs algériens. Elle est considérée comme une technique culturale négligeable.

En agriculture, les engrais sont principalement apportés au sol sous trois formes différentes : ammonitrate, urée, et solution azotée. Chaque formulation d'engrais – qu'elle que soit sa structure (granulés, bouchons, poudre...) et son type (engrais complet, starter, engrais soufrés, engrais protégés...) a des cinétiques différentes et comparer les engrais entre eux est un peu plus compliqué que simplement comparer des quantités.

L'ammonitrate ou nitrate d'ammonium est considérée comme la forme d'engrais la plus performance, car disponible le plus rapidement pour la plante.

L'azote uréique (dans l'urée) a de son côté besoin d'être hydrolysé pour être assimilé.

Quant à la solution azotée sous forme liquide, encore la plus utilisée pour des raisons de coût, une partie est assez rapidement volatilisée lorsqu'elle est apportée s'il ne pleut pas rapidement (l'ammonium NH_4^+ apporté est converti en ammoniac gazeux NH_3 qui s'envole dans l'atmosphère) diminuant par là même le coefficient d'utilisation de l'azote (l'urée aussi se volatilise assez rapidement et il est plus sensible à la volatilisation que la solution azotée).

Outre la contrainte de coût (l'urée est aussi moins chère que l'ammonitrate), ce sont parfois des conditions environnementales (ou peut-être de fournisseurs) qui pousseront un peu plus à l'utilisation de tel ou tel engrais.

Les sols cultivés contiennent entre 0.02 et 0.4 % d'azote total (Black, 1968) en Algérie, ce pourcentage varie entre 0.04 % et 0.4 % (Nkundikije, 1974) ce qui permet de distinguer :

- Les sols peu fertiles à 0.04 % d'azote total,
- La teneur des sols moyennement fertiles reste comprise entre 0.04 et 0.075 % par contre le taux d'azote des sols fertiles est supérieur à 0.075 % (Reguieg, 2007).

CHAPITRE - II

Matériel et méthodes

2.1. Caractéristiques générales de la région d'étude.

Afin de réaliser cette étude, nous avons choisi la région semi-aride de l'Est algérien, à savoir Sétif et Constantine (El-Khroub) (figure 5).

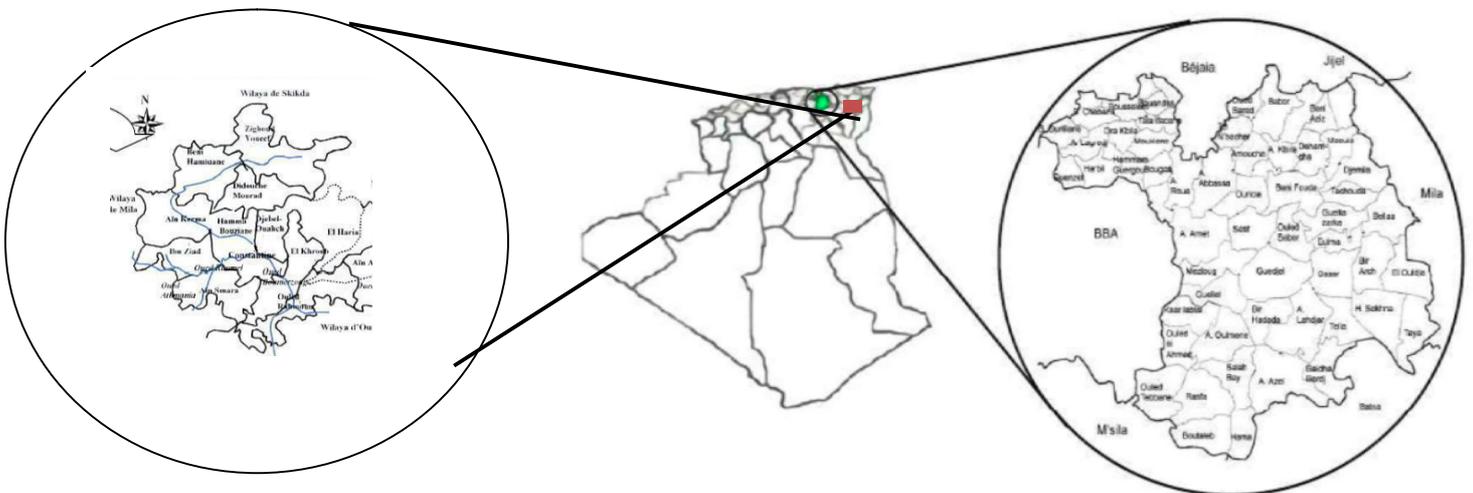


Figure 5. Localisation des deux régions d'étude (Sétif et Constantine) en Algérie.

2.1.1. La situation géographique et administrative de la région d'étude.

2.1.1.1. Région de Sétif.

Situation géographique de la région de Sétif.

S'étendant sur une superficie de 6549.64 km² (soit 0.27 % de l'Algérie entière) à 100 km du littoral, Sétif se situe au nord-est du pays algérien. Les limites du massif de Sétif correspondent aux coordonnées géographiques 5° à 6° de longitude et 35° à 36.5° de latitude Nord. Elle est délimitée administrativement par les wilayas de Bejaia et Jijel au Nord, Mila à l'Est, Batna et Msila au Sud, et Bordj Bou Arreridj à l'Ouest, occupant 20 daïras et 60 communes (Chacha, 2011) (Figure 6).



Figure 6. Carte des limites administratives de la région de Sétif (DPAT-2010)

La wilaya de Sétif est une région à vocation agricole. Elle a été depuis longtemps une région propice à la culture traditionnelle des céréales et à l'élevage ovin. Le relief est relativement accidenté dans sa partie nord, dominé par les montagnes boisées ; il est plutôt plat dans ses parties centrales et celle du sud où émergent quelques mamelons dénudés. (Bouzerzour et al., 2006).

Les caractéristiques physiques du massif sétifien sont renseignées selon Barkat (2014) ; Far (2016) et SDATWS (2015) comme suit :

1.Morphologie

Le massif sétifien est riche et varié. Son relief est divers présentés par la zone montagneuse de l'AtlasTellien au nord et les monts de Hodna au sud, la première est humides et boisés tandis que la dernière est à caractère steppique. Une zone de propriétés différentes repose entre ces deux zones montagneuses, celle des hautes plaines.

2.Géologie

Le massif sétifien constitue un bain de gisements importants d'argiles, de calcaires, de dolomies, de grès, de gypse, et de sel gemme.

3.Hydrogéologie

Le massif sétifien inclut un réseau hydrographique dense qui se compose de nombreux oueds.

4.Écologie

Le massif sétifien est doté de potentialités forestières incontestables présentes sur l'ensemble des forêts de ; Boutaleb, Bousselem, Zenadia, Ain oulmane, Ouled Si Ahmed, Guenzet, Babor, Tamntout, Beni Slimane, Laalam, conférant à Sétif des atouts d'intérêts environnementaux.

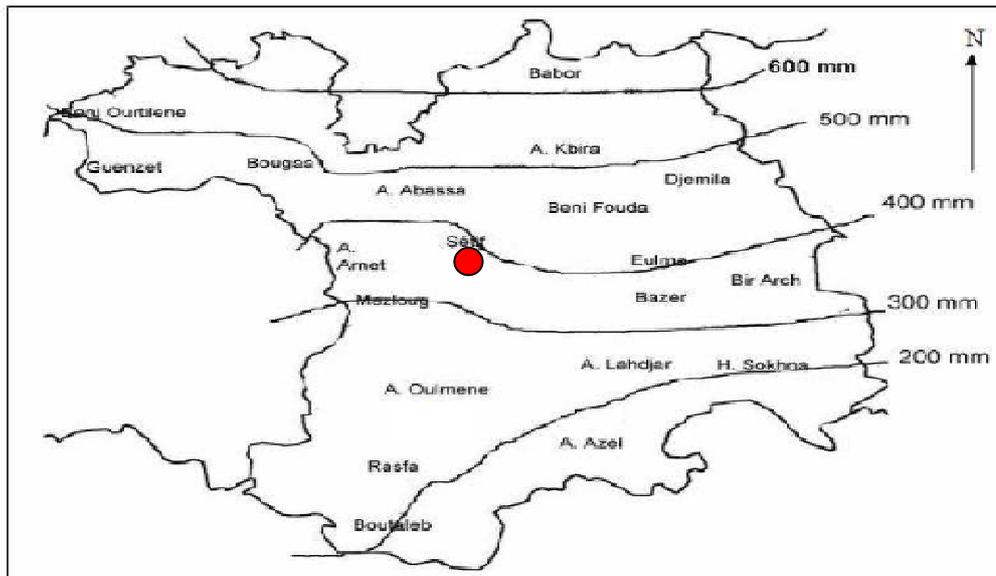


Figure 7. Répartition des niveaux de précipitations dans la région d'étude (DSA de Sétif, 2011)

Selon les informations récupérées à partir de l'historique des indicateurs climatiques de la région d'étude sur MétéoBlue (2020) :

- Le climat est semi-aride sur les plaines sétifiennes, les piémonts et dans le sud des hautes plaines, et il est humide à semi-humide froid sur la zone montagneuse du nord.
- L'accentuation de contraste thermique est remarquable avec des températures hivernales basses et estivales élevées où les écarts sont faibles dans les montagnes du nord dû à la neige régulière aux altitudes et journalièrement et saisonnièrement fortes dans les hautes plaines dues aux gelées fréquentes et étalées.
- En ce qui concerne les précipitations, et malgré l'appartenance de la région à la zone la plus arrosée du pays comme est courant, Sétif et selon l'observation et l'analyse de sa carte pluviométrique ne reçoit en moyenne que moins de 250 mm d'eau par an. Les chutes ont tendance d'être irrégulières et réparties, sont maximales en hiver surtout sur les monts, l'évaporation est constamment considérable. Ceci revient au rôle important que joue le relief sur la distribution des pluies sur la région. Une projection de la carte pluviométrique sur l'ensemble morphologique (Figure 7 et 8) de la région d'étude montre que la zone montagneuse nordique de l'Atlas Tellien reçoit la quantité la plus importante des pluies, et que cette quantité diminue sensiblement sur les hautes plaines et encore plus sur la zone sud-sud-est, les précipitations symbolisent aussi que les zones de Sud-ouest sont les moins arrosées.

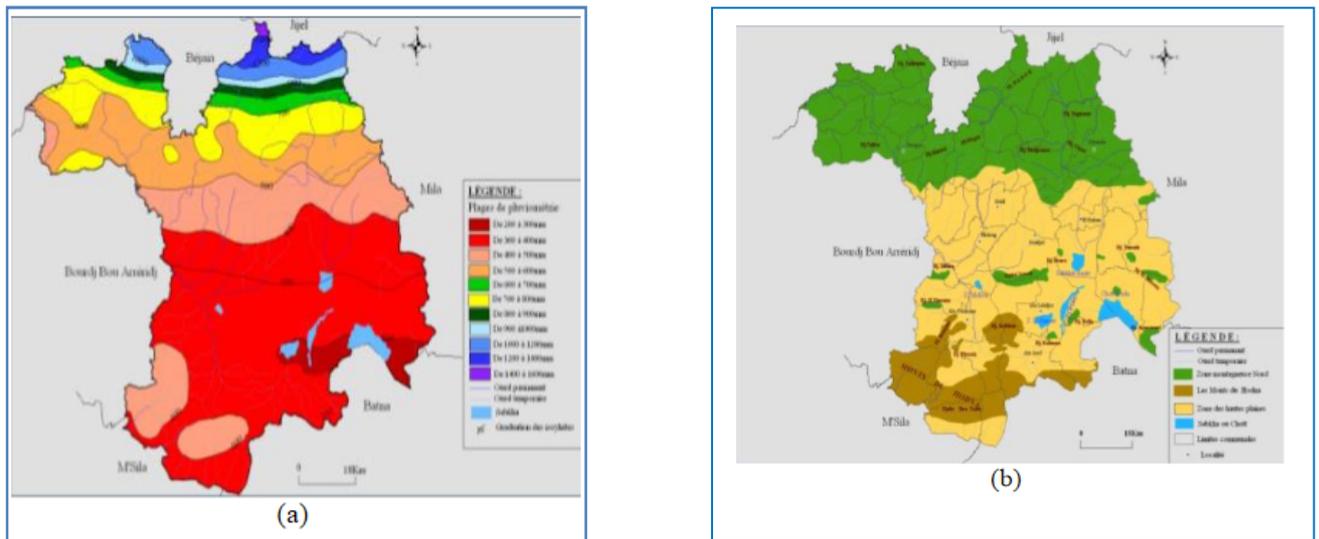


Figure 8. (a) Carte pluviométrique (b) Vs ensembles morphologiques de la région de Sétif (SDATWS, 2015)

2.1.1.2. Région de Constantine

Situation géographique de la région de Constantine

Se situe entre latitudes 36° 17' et la longitude 6° 37', à 245 km des frontières algéro-tunisiennes, à 431 km de la capitale Alger vers l'Ouest, à 89 km de Skikda vers le Nord et à 235 km de Biskra vers le Sud. Elle se situe entre les deux colles KENTOUR 400 et 800 m et 1200 m vers le Sud et compte douze communes.

Elle s'étend sur une superficie de l'ordre de 2297,20 Km², et est limitée par : Au nord par la wilaya de Skikda, à l'est par la wilaya de Guelma, à l'ouest par la wilaya de Mila, au Sud par la wilaya d'Oum el Bouaghi (figure 9).

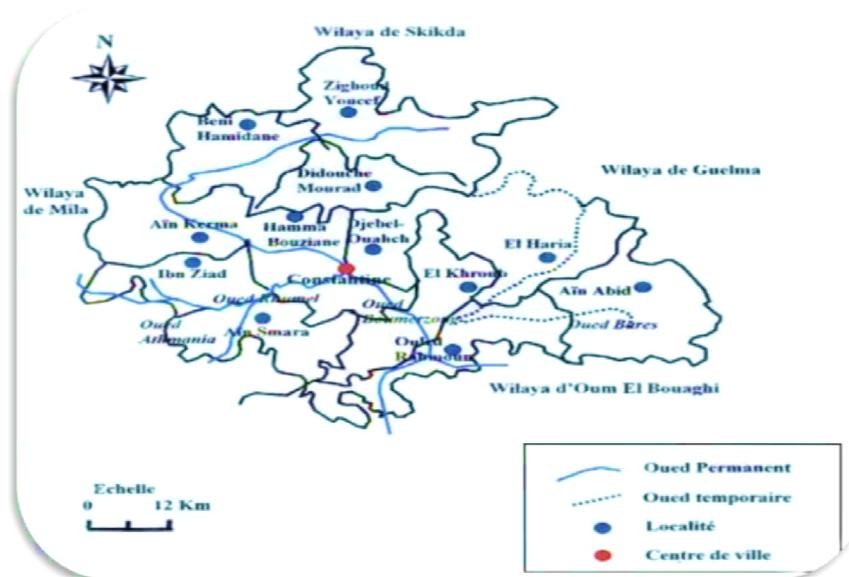


Figure 9. Limite administrative de La Wilaya de Constantine (Louadi, 1999 A).

1. Topographie

La wilaya de Constantine est caractérisée par une topographie très accidentée, marquée par une juxtaposition de montagnes, de hautes plaines, de dépressions et de ruptures brutales de pentes donnant ainsi un site hétérogène (Boussouf, 2012). La wilaya est subdivisée en trois zones géographiques :

- La zone montagneuse : située au nord de la wilaya
- Les bassins intérieurs : les cuvettes intérieures sont occupées généralement par la céréaliculture et les terrains de parcours.
- Les hautes plaines : situées au sud de la wilaya elles sont occupées essentiellement par la céréaliculture.

2.2. Description du site expérimental des deux zones d'étude

L'expérimentation a été conduite au cours de trois années successives 2016/2017, 2017/2018 et 2018/2019, sur deux sites différents se situent à :

2.2.1. L'Institut Technique de Grandes Cultures (ITGC) de Sétif.

À la ferme Expérimentale agricole de IITGC Sétif, le lieu expérimental dit R'mada, situé dans la commune de Mezloug, de la daïra de Ain-Arnat, à une altitude de 962 m et aux coordonnées aux géographiques 36°08'N, 5°20'E (Chennafi et al., 2006). Le site expérimental est pratiquement soumis au climat des hautes plaines orientales algériennes, qui se caractérise par des hivers froids, un régime pluviométrique irrégulier, des gelées printanières très fréquentes et des vents chauds et desséchants en fin de cycle de la céréale (Baldy et al., 1993).

2.2.2. L'institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) d'El Khroub (Constantine).

Au niveau de la ferme expérimentale agricole de l'Institut Technique des Grandes Cultures d'Elkhroub (Constantine) à une altitude de 640 m, une latitude de 6°67' N et une longitude de 36°55' E au site dénommer El Baaraouiasur la parcelle Saad Belkhir. La région d'El-Khroub située dans l'est du pays fait partie des hautes plaines intérieures algériennes (Benbelkacem, 2000). Elle est limitée au Nord par la région de Constantine, au Sud par la wilaya d'Oum-El-Bouaghi, à l'Est par la région d'Oued Zenati et à l'Ouest par la wilaya de Mila (Madaci, 1991).

2.3. Climat

Pour caractériser le climat des deux zones d'étude, Sétif et Constantine, nous avons utilisé des données climatiques de trois années d'étude, 2016/2017, 2017/2018 et 2018/2019, ces données sont recueillies au niveau de la station météorologique d'Ain El-Bey de

Constantine avec une latitude : 36° 26' et une longitude : 06° 61' et celle de Ain Skhouna de Sétif.

2.4.1. Température

Le tableau 3 présente les températures caractérisant la région de Sétif et de Constantine durant les trois années d'étude 2016/2017, 2017/2018 et 2018/2019 durant le mois de septembre à juin.

La température moyenne mensuelle présente une distribution basse au cours des stades végétatifs, tallage, montaison, gonflement et élevée au cours de la floraison, remplissage du grain et la phase d'installation de la culture (semis - début tallage). En effet la température moyenne mensuelle est au-dessous de 11 °C au cours des mois allant de décembre à mars et s'élève rapidement au cours du reste des mois de l'année (tableau 1). Cette variation de la température limite la croissance de la végétation au cours de la période où généralement le sol est humide et accélère la croissance à un moment où la contrainte hydrique est plus présente.

Tableau 1. Données des températures moyennes mensuelles, minimas et maximas allant de septembre à juin dans la région de Sétif et de Constantine années (2016/2017, 2017/2018 et 2018/2019).

Région	T(°C)/Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Janv.	Fev.	Mars	Avr.	Mai	Juin
Constantine 2016/2017	T _{max} °C	28.6	27.04	19.13	14.84	10.46	15.86	19.14	20.95	28.7	33.48
	T _{min} °C	14.6	13.25	6.85	5.24	1.44	3.98	5.21	7.11	12.31	17.38
	T _{moy} °C	20.8	19.2	12.2	9.4	5.37	9.36	11.68	13.43	20.1	25.12
Constantine 2017/2018	T _{max} °C	25.72	19.65	13.20	9.87	7.88	8.07	10.47	11/91	14.34	26.63
	T _{min} °C	23.26	17.61	11.60	8.55	7.10	6.74	8.95	10.38	12.72	23.43
	T _{moy} °C	24.35	18.79	12.37	9.22	7.88	7.39	9.74	11.10	13.61	25.56
Constantine 2018/2019	T _{max} °C	21.97	17.38	13.12	9.78	8.12	7.81	9.25	15.88	20.74	27.14
	T _{min} °C	19.90	15.50	11.57	8.50	6.85	6.36	7.82	13.81	18.32	24.53
	T _{moy} °C	21.09	16.53	12.27	9.11	7.48	7.08	8.60	14.89	19.67	25.92

Sétif 2016/2017	T _{max} °C	27.69	25.18	16.15	12.60	7.70	14.32	16.08	17.78	20.35	26.63
	T _{min} °C	14.10	11.84	4.93	2.82	0.86	2.20	4.45	5.4	12.70	14.93
	T _{moy} °C	20.10	17.91	10.12	7.71	3.15	8.27	10.26	11.59	20.35	21.56
Sétif 2017/2018	T _{max} °C	28.30	22.26	14.56	9.83	11.81	9.6	13.42	17.72	21.33	27.63
	T _{min} °C	13.5	9.63	4.34	1.19	1.05	0.6	4.30	4.70	9.47	13.93
	T _{moy} °C	20.90	15.95	9.45	5.28	6.43	3.43	8.86	11.21	15.40	20.78
Sétif 2018/2019	T _{max} °C	28.40	19.40	14.50	12.90	7.74	11.12	15.17	18.21	20.90	33.60
	T _{min} °C	16	9.60	4.60	1.64	-0.52	-0.06	3.35	6.30	8.08	17.21
	T _{moy} °C	21.06	14.10	9.30	6.85	3.35	5.30	8.75	11.83	14.38	25.06

Source : (station météorologique d'Ain El-Bey de Constantine ONM, Aéroport de Sétif 2019)

D'après les prélèvements des températures, il ressort que :

Pour l'année 2016/2017 et d'après les données des températures du tableau 1, nous avons enregistré respectivement pour la région de Sétif et Constantine des températures moyennes minimales de l'ordre de 3.15 °C et 5.37 °C au mois de janvier, qui coïncide avec le stade de germination. Les basses températures au cours de stade d'épiaison réduisent fortement la fertilité des épis. Les températures les plus élevées ont été enregistrées au mois de mai avec 20.35 et 20,1 °C respectivement dans la région de Sétif et celle de Constantine. Ainsi Couvreur (1981) et Rachedi (2003) signalent qu'au cours du remplissage du grain, une élévation brutale de la température peut provoquer une rupture de l'alimentation en eau de la plante, même, si celle-ci a les pieds dans l'eau, il y aura échaudage et les graines formées seront petites et ridées. Bahlouli et al. (2005) confirment que les hautes températures sont parmi les facteurs importants intervint dans la limitation des rendements.

L'année 2017-2018, les températures varient respectivement pour la région de Sétif et celle de Constantine de 3.43 °C et 7.39 °C pour le mois de février qui correspond au mois le plus froid à 20.90 °C et 24.35 °C en septembre correspondant au mois le plus chaud (tableau 1).

L'année 2018/2019 se caractérise par une température plus au moins élevée durant les mois de septembre, octobre 2018 et, mai, juin 2019, alors que la température durant les mois d'hiver est relativement basse (tableau 1).

2.4.2. Précipitations

Les années 2016/2017, 2017/2018 et 2018/2019 ont enregistré, respectivement, un cumul pluviométrique de 301.4 mm, 366 mm et 449.6 mm pour la région de Constantine et 195.12 mm, 419.10 mm et 345.9 mm pour la région de Sétif, allant du mois de septembre à juin (tableau 2).

L'écart interannées est très élevé ce qui explique la variabilité pluviométrique à laquelle est sujet le climat des deux régions d'étude (hautes plaines orientales et le constantinois dont les sites expérimentaux ITGC de Sétif et ITGC de Constantine) en fait partie.

Tableau 2. Pluviométrie enregistrée durant les trois années d'étude (2016/2017, 2017/2018 et 2018/2019)

Région/Mois		Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Total
Constantine	2016-2017	76	20	30.5	7.8	88.4	33.2	0.1	25.6	6.4	13.4	301.4
	2017-2018	12.8	10.4	74.2	35.6	14	30	91	50	41	7	366
	2018-2019	7	142	5.6	19	79.2	47.6	50.4	38.2	60.4	0.2	449.6
Sétif	2016-2017	12	14.90	29.70	7.20	46.90	13.82	-	5.90	9.20	55.50	195.12
	2017-2018	41	10.70	55.70	33.50	13.90	23.2	90.20	81.30	51.90	17.80	419.40
	2018-2019	25	63.70	25.70	10.80	77.10	15.10	26.80	43.80	58.60	-	345.9

Par mois et pour l'année 2016/17, le maximum de pluviométrie a été observé aux mois de janvier (88.4 mm) et septembre (76 mm), pour Constantine et le mois de juin (55.5 mm) pour Sétif, et aux mois de mars (91 mm) et novembre (74.2 mm), pour Constantine et au mois de mars (90.20 mm) et avril (81.30 mm), pour Sétif en 2017/18. Et au mois d'octobre (142 mm), pour Constantine et au mois de janvier avec 77.1 mm pour la région de Sétif en 2018/19. Par contre, le minimum a été observé au mois de mars 0.1mm et 0 mm respectivement pour Constantine et Sétif en 2016/17 et 7 mm et 17.8 mm au mois de juin. Par contre en 2018/19, le minimum de pluviométrie a été noté au mois de juin pour les deux régions, dont 0,2 mm (Constantine) et 00 mm (Sétif) (tableau 2).

Du point de vue distribution mensuelle des précipitations, les trois années sont très différentes. L'année 2016/2017 se caractérise par une période printanière très sèche (mars, avril et mai) coïncidant avec des stades critiques de développement de la céréale dont le cumul pluviométrique mensuel est de 32 mm pour la région de Constantine et de 15 mm pour

la région de Sétif alors que les mois de novembre, janvier et février enregistrent un cumul mensuel de 152 mm (Constantine) et supérieur à 90 mm (Sétif) (tableau 2).

L'année 2017/18 se caractérise, au contraire, par des mois de septembre, octobre dont le cumul mensuel est de 23 mm, une période pluvieuse s'étalant de novembre à janvier enregistrant un cumul mensuel respectif de 124 mm et 103 mm pour la région de Constantine et de Sétif, alors que seuls les mois février, mars, avril et, mai enregistrent un cumul pluviométrique de plus de 212 mm et de 247 mm respectivement pour les régions de Constantine et de Sétif. Le mois de juin était plus pluvieux dans la région de Sétif (plus de 17mm) que celui de Constantine, avec seulement 7 mm.

Au cours de l'année 2018/19, la période automnale a enregistré à Constantine un cumul pluviométrique de 154.6 mm alors que la région de Sétif n'a enregistré qu'un cumul de 114.4 mm

La période hivernale présente un cumul pluviométrique de l'ordre de 145.8 mm pour Constantine et 103 mm pour Sétif.

Alors que la période printanière (mars, avril, mai) enregistre respectivement un cumul pluviométrique de 149mm et 129 mm pour la région de Constantine et de Sétif.

Le mois de juin est très sec pour les deux régions.

Ces résultats indiquent que la pluviométrie est irrégulière et variable, du point de vue intensité et du positionnement le long du cycle de la culture.

2.4. Sols des deux stations d'études.

2.4.1. Caractéristiques physico-chimiques des sols.

Pour caractériser nos champs expérimentaux, nous avons effectué quelques analyses physico-chimiques du sol au laboratoire de l'institut des sciences agronomiques de Batna.

2.4.1.1. Les caractéristiques physico-chimiques des sols de l'ITG de Sétif.

Les échantillons du sol analysés ont été prélevés à deux niveaux de profondeurs : 0-20 cm et 20-40 cm révèlent que ces sols sont moyens à lourds, pauvres sur le plan chimique, très riches en calcaire total avec une texture fine limono-argileuse, non saline (0.36mmhos/cm) (tableau 3).

Tableau 3. Caractéristiques physico-chimiques des sols de la station de l'ITGC de Sétif.

Propriétés physiques		Caractéristiques du sol	Profondeur		Moyenne
			0-20 cm	20-40 cm	
Argile	35.72 %	pH	8.04	8.11	8.07
Limons	37.82 %	Calcaire total (%)	20.22	32.99	26.60
Sable	26.45 %	Calcaire actif (%)	11	12.2	11.6

Texture	Limono argileuse	Conductivité électrique Mmohs/cm	0.33	0.40	0.36
		Taux de MO (%)	2.82	1.74	2.28
		Azote N (%)	0.09	0.07	0.08
		Phosphore P (ppm)	10.97	6.21	8.59
		Potassium K (ppm)	166.7	136.7	151.7

Pour la première couche du sol, nous notons une forte concentration en calcaire total, présentant une teneur de 20.22 % qui tend vers 3.99 % sur la deuxième couche (20-40 cm). Le pH du sol dans les deux profondeurs est alcalin (supérieur à 7) avec un gradient croissant sur la profondeur, révélant ainsi la nature calcaire des sols de la région des hauts plateaux (20.22 % de CaCO₃ dans la 1^{re} couche et 32.99 % dans la 2^e couche).

La valeur du pH a une action sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol qui crée un milieu plus favorable à l'alimentation minérale et à la croissance des plantes. Il indique la disponibilité des éléments minéraux pour la plante. Le sol est assez pauvre en phosphore, très faible en azote.

Selon les normes établies par l'I.T. A (1977) (GEPPE in Baize (1988), le sol est moyennement riche en matière organique (2.82 % dans la 1^{ère} couche et 1.74 % dans la 2^{ème} couche) (tableau 3).

Granulométrie.

Le sol est formé sur des dépôts conglomératiques. Ce sont des sols moyennement profonds (40-70 cm), caractérisés par une texture fine argileuse à limono-argileuse et riches en calcaire avec une charge caillouteuse qui présente sur toute la profondeur composée essentiellement de galets, de gravillon et de débris de silex (ITGC, 2011).

Chennafi et al. (2006) confirment que le site expérimental est représentatif de la zone centrale des hautes plaines, caractérisée par des terres plates, peu fertiles et un fort risque de gel tardif et de la sécheresse en fin de cycle, sa densité apparente est de 1.35 g cm⁻³, et sa capacité au champ est de 25 % et son point de flétrissement se situe à 12 %.

2.4.1.2. Les caractéristiques physico-chimiques des sols de l'ITG de Constantine.

Les analyses physico-chimiques permettent de déterminer quelques caractéristiques du sol de site expérimental (tableau 4). Le sol de la parcelle d'étude est caractérisé par une texture argilo-limoneuse, et pauvre en matière organique (1.47 %). Faiblement salins et très riches en calcaire total (CaCO₃ = 33,88 %) (ITGC, 2018).

Tableau 4. Caractéristiques physico-chimiques des sols de l'ITG de Constantine.

Propriétés physiques		Caractéristiques du sol	Profondeur		Moyenne
			0-20 cm	20-40 cm	
Argile	49.5 %	pH	8.7	8.7	8.7
Limons	32.52 %				
Sable	18 %	Calcaire total (%)	33.23	34.53	33.88
Texture	Argilo-limoneuse	Calcaire actif (%)	10.33	11.01	10.67
		Conductivité électrique mmhos/cm	0.5	1.70	1.1
		Taux de MO (%)	1.49	1.45	1.47
		Azote N (%)	0.07	0.06	0.06
		Phosphore P (ppm)	10.66	7.12	8.89
		Potassium K (ppm)	167.5	138.4	152.95

Granulométrie.

Le sol est moyennement profond (40-70 cm), situé en surface plane et caillouteux. Le sol est caractérisé par une texture fine ; argileuse à limono-argileuse (ITGC, 2011).

2.5. Mise en place de l'essai.

2.5.1. Matériel utilisé.

a- Matériel végétal.

Le matériel végétal est la variété Waha de blé dur (*Triticum durum* Desf.).

Waha est une sélection provenant du matériel ICARDA-CIMMYT, qui est censée remplacer MBB dans les plaines intérieures et les hauts plateaux. Pedigree : Plc 's'/Ruf 's'//Gta 's'/3/Rolette CMI 17904 -3 m -1y -1 m -0y

Les caractéristiques de la variété expérimentées sont représentées dans le tableau 5.

Tableau 5. Caractéristiques morphologiques, culturelles et qualitatives de la variété Waha (Boufenar et al, 2006).

Variétés	Waha
Caractéristiques morphologiques : Compacité de l'épi (Couleur de l'épi (Hauteur de la plante à la maturité	Demi-lâche à compact Clair ambré à roux 80-90 cm
Caractéristiques culturelles : Alternativité <ul style="list-style-type: none"> • Cycle végétatif • Tallage 	Hiver Précoce

<ul style="list-style-type: none"> • Résistance : <ul style="list-style-type: none"> - au froid - à la verse - à la sécheresse - Égrenage <p>Résistance aux maladies</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rouille jaune • Rouille brune • Rouille noire • Piétin verse • Piétin échaudage • Oïdium • Septoriose • Fusariose 	<p>Moyen à fort</p> <p>Tolérante</p> <p>Résistante</p> <p>Sensible</p> <p>Résistante</p> <p>Tolérante</p> <p>Tolérante</p> <p>Tolérante</p> <p>Résistante</p> <p>Sensible</p> <p>Résistante moyennement</p> <p>résistante moyennement</p> <p>résistante</p>
<p>Conditions techniques :</p> <p>Date de semis</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dose de semis (kg/ha) • Fertilisation (U/ha) • Azotée • Phosphatée • Potassique <p>Productivité (rendement en grain optimal)</p>	<p>Novembre à décembre</p> <p>100-120</p> <p>46-90</p> <p>46-90</p> <p>46</p> <p>45q/ha</p>
<p>Caractéristiques qualitatives :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Poids de mille grains (PMG) • Qualité semoulière • Mitadinage • Moucheture 	<p>Moyen (44,4 g)</p> <p>Assez bon</p> <p>Résistante</p> <p>Résistante</p>

b- Engrais azote.

L'urée est un engrais azoté solide de couverture le plus concentré, contient 46 % d'azote total et 1 % de biuret. L'urée est obtenue par synthèse à partir de l'ammoniac et du gaz carbonique suivant la réaction schématique : $CO_2 + 2 NH_3 \rightarrow CO (NH_2)_2 + H_2O$. L'urée est habituellement sous forme perlée ou de plus en plus granulée. Très soluble, elle est hydrolysée dans le sol et passe, en quelques jours, à l'état d'azote ammoniacal. Ce dernier est, suivant les conditions climatiques du moment, soit fixé par les colloïdes du sol, soit transformé en azote nitrique par les micro-organismes (Pontailler, 1971 ; Christian et al, 2005).

Il agit moins rapidement que les nitrates, et son effet dur plus longtemps, l'hydrolyse de l'urée dépend de la température du sol. Elle ne nécessite que de trois à cinq jours en sol froid tandis que quelques heures suffisent en sol réchauffé. Son application est recommandée avant une pluie et il doit être enfoui afin d'éviter, d'éventuelles pertes par volatilisation (Ziadi, 2007).

2.5.2. Méthodes de travail.

2.5.2.1. Travail du sol et de semis.

L'essai est installé sur un précédent jachère travaillée. Les techniques culturales adoptées sont un labour profond réalisé au mois de septembre, avec une charrue à soc réversible, suivi de deux passages du cover-crop à trois passages (région de Constantine) pour reprendre le labour et détruire les adventices installées, puis un hersage avec une roto herse (fin novembre).

Le semis est réalisé suivant le tableau 10, pour les trois années à une densité de 250 graines/m².

Tableau 6. Dates de réalisation du semis dans les deux régions d'étude pour les trois années.

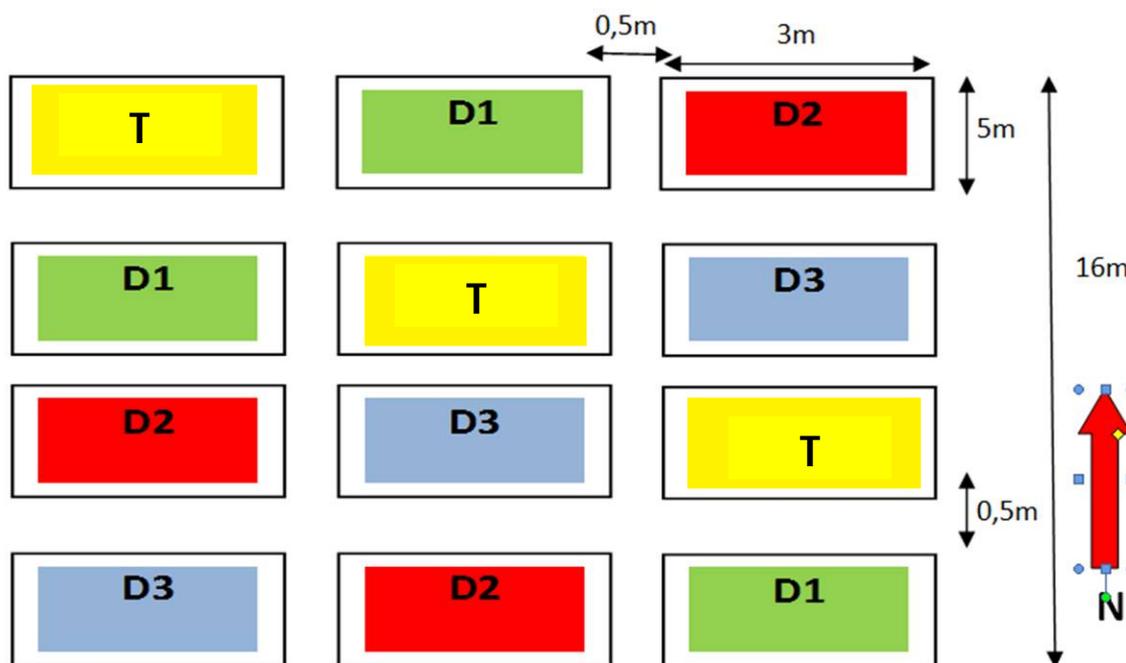
Année	Sétif	Constantine
2016/2017	20/11/2016	02/01/2017
2017/2018	14/12/2017	29/11/2017
2018/2019	19/12/2018	03/01/2019

2.5.2.2. Dispositif expérimental.

Nous avons adopté un dispositif en bloc aléatoire complet, comportant quatre (04) niveaux et trois (03) répétitions, où le seul facteur de variation est le niveau de fertilisation azotée.

Nous avons défini quatre niveaux d'apport de N encadrant les valeurs préconisées de la région semi-aride. La dose d'azote est fractionnée en trois apports : la 1^{re} fraction a été utilisée comme engrais de démarrage, pour booster le développement des racines, sous forme de mono ammonium phosphate (MAP : 12-52-00) (dose starter) est épandu à raison de 100 kg ha⁻¹ au semis (12 unités de N). La deuxième fraction consiste à un apport de 1/3 de 46 unités de N (15.3uN) au stade tallage épi 1cm (stade A) et en enfin une troisième fraction représentant 2/3 (30.6 uN) de la dose totale apportée au stade montaison (stade B) (figure 10).

Le choix de ces doses a été en fonction de la dose de référence que les céréaliculteurs des deux régions apportent à leurs parcelles.



T: témoin apport 12u de N (MAP). D1 : 46 unités de N, D2 : 69 u de N, D3 : 92 u de N

N. B. Tous les traitements ont reçu 12 unités de N comme premier apport au semis sous forme de MAP (12-52-00)

Figure 10. Dispositif expérimental réalisé dans les deux sites (ITGC Sétif ITGC Constantine).

2.5.2.3. Entretien de culture.

A. Fertilisation du sol.

La quantité totale d'azote apporté est fractionnée en trois apports dont ; la première a été appliquée au semis (12uN) sous forme de MAP pour tous les traitements (dose starter), le deuxième apport au stade tallage (épi 1 cm) représente 1/3 des différentes doses retenues pour cette expérimentation et enfin le troisième apport a été appliqué au stade début montaison représente 2/3 restant de ces doses.

Selon les analyses du sol qui indiquent une teneur en potassium de 151 ppm, cela correspond à une quantité de 780 kg de potassium par hectare sur une profondeur de 40 cm. Cette quantité est généralement considérée comme suffisante pour répondre aux besoins en potassium d'une culture de blé. Sachant que les besoins de blé sont de l'ordre de 100 kg de K_2O (ITAB et ARVALIS, 2013).

B. Désherbage.

Le désherbage chimique fut réalisé dès le stade plein tallage par un herbicide combinant un anti-dicotylédones et un anti-graminées avec deux herbicides.

2.5.2.3. Échantillonnage du végétal.

Le prélèvement a été effectué en récoltant au ras du sol les lignes, en évitant les lignes de la bordure. Les prélèvements ont été effectués au cours du cycle végétatif de la céréale, selon le tableau 7. Les échantillons du végétal prélevés sont placés dans des sachets en plastique étiquetés.

Tableau 7. Observations et mesures au cours du cycle du blé.

Date	Prélèvements, observations et mesures		Échantillonnage
Semis	Sol	Humidité du sol, N minéral initial	1 échantillon composite (10prélèvement)
Stade A	Sol	Humidité du sol. N minéral.	1 prélèvement/parcelle élémentaire et par horizon (0-20 et 20-40cm)
	Végétal	N total, peuplement pied, production de matière sèche	2 placettes de 0.25 m ² /parcelle élémentaire
Stade B	Sol	Humidité du sol. N minéral.	1 prélèvement/parcelle élémentaire et par horizon (0-20 et 20-40cm)
	Végétal	Teneur en chlorophylle	30 pieds/parcelle élémentaire
		N total, production de matière sèche	2 placettes de 0.25 m ² /parcelle élémentaire
Mi-Montaison	Sol	Humidité du sol. N minéral.	1 prélèvement/parcelle élémentaire et par horizon (0-20 et 20-40cm)
	Végétal	Teneur en chlorophylle	30 pieds/parcelle élémentaire
		N total, production de matière sèche	2 placettes de 0.25 m ² /parcelle élémentaire
Floraison	Sol	Humidité du sol. N minéral.	1 prélèvement/parcelle élémentaire et par horizon (0-20 et 20-40cm)
	Végétal	Teneur en chlorophylle, peuplement épis	30 pieds/parcelle élémentaire
		N total, production de matière sèche	2 placettes de 0.25 m ² /parcelle élémentaire
Maturité	Sol	Humidité du sol. N minéral.	1 prélèvement/parcelle élémentaire et par horizon (0-20 et 20-40cm)
	Végétal	N total, production de matière sèche	2 placettes de 0.25 m ² /parcelle élémentaire
		Rendements grains et paille	2 m ² /parcelle élémentaire.

2.5.2.4. Paramètres mesurés.**2.5.2.4.1. Notation et mesures.****2.5.2.4.1.1. Caractères phénologiques et morphologiques (Durée des stades du cycle de développement de la céréale).****a- Date de levée.**

La date de levée est notée, à l'apparition de 50 % de plants levés.

b- Date d'épiaison.

Elle est notée lorsque 50 % des épis apparaissent nettement hors de la gaine de la feuille étendard.

c-Date de maturation.

Dans cette phase les enveloppes de l'épi perdent leurs couleurs vertes qui deviennent jaunes.

2.5.2.4.1.2. Mesures liées au sol.**a- Humidité du sol.**

Parmi les objectifs de notre travail est le suivi du profil hydrique durant tout le cycle végétatif plusieurs prélèvements d'humidité du sol ont été réalisés durant tout le cycle végétatif de la céréale, au cours de l'année agricole, sur deux profondeurs 0-20 cm, 20-40 cm. Les échantillons prélevés sont placés sur le champ dans des boîtes métalliques et mis à l'étuve après avoir été pesés. Après une durée de 24 heures, à une température de 105 °C, ces échantillons sont à nouveau pesés et le calcul du pourcentage d'humidité relative au poids sec du sol est donné par la formule suivante (Baize, 2000).

$$\text{Humidité pondérale (\%)} = (\text{Poids humide} - \text{Poids sec} / \text{Poids sec}) * 100$$

c- Azote minéral du sol.

Le dosage a été fait par la méthode Drouineau et Gouny in Bouneau et Souchier (1979). Par extraction au KCl (2N) plus une agitation pendant deux heures, suivi par une distillation en présence de NaOH plus alliage de DEWARDA pour le dosage de 2 formes simultanément.

Les échantillons du sol sont prélevés à une profondeur de 0-20 et 20-40cm. Les deux échantillons de chaque parcelle ont été mélangés pour constituer l'échantillon moyen analysé.

Toutes les variables relatives à la culture ont été déterminées sur la base des mesures faites sur une station d'observation (échantillon de végétation) d'un mètre linéaire avec trois répétitions pour chaque traitement, puis les chiffres obtenus seront ramenés au mètre carré.

2.5.2.4.1.3. Mesures liées au végétal.

L'échantillonnage du végétal pour les différents stades (tallage, début montaison, mi-montaison, floraison et maturité) se fait selon le tableau n° 3. Après séchage pendant 72 heures à une température de 80 °C, les analyses sont réalisées sur la matière sèche broyée.

2.5.2.4.1.3. 1. Biomasse aérienne.

Les échantillons du végétal récolté au cours du cycle de la culture sont conditionnés au laboratoire. Au stade de floraison, les épis sont séparés de la paille et au stade maturité complète, les épis sont battus après étuvage pour la séparation des grains. L'ensemble de ces échantillons a subi un séchage à l'étuve pendant 72 heures à une température de 80 °C, puis pesé afin de déterminer le poids sec puis broyé pour déterminer le pourcentage de l'azote total par la méthode Kjeldhal.

a. Matière sèche totale (en kg/ha).

La matière sèche est mesurée au stade tallage, début et mi du stade de montaison. La matière sèche totale à la floraison est composée de la matière sèche paille et matière sèche épi. La matière sèche totale au stade de maturité est composée de la paille et grain.

b. Azote total dans le végétal.

L'azote total des tissus nous permet de déterminer la quantité d'azote exportée par la plante tout au long du cycle de la culture. Le dosage de l'azote dans le végétal (paille et grain) a été effectué par la méthode KJELDHAL (Brenner et Mulvaney 1982).

2.5.2.4.1.3. 2. Coefficient d'utilisation apparent de l'engrais azoté (C.U.A%).

L'objectif de ce paramètre est de mesurer la capacité d'une plante de répondre à une augmentation d'azote appliquée par une augmentation de prélèvement d'azote. Il est très élevé lorsque la croissance de la plante est rapide, son système racinaire dense permet une meilleure captation des ions NO_3^- et NH_4^+ dans le sol. Ceci permet d'éviter les pertes vers l'hydrosphère ou l'atmosphère (Lemaire et Gastal, 2016). Ce paramètre est la différence de la quantité d'azote absorbé par la plante dans une parcelle fertilisée et la quantité d'azote absorbé dans une parcelle non fertilisée par rapport à la quantité d'azote apportée (Fageria, 2009).

Le C.U.A en % est calculé par la formule suivante :

$$\text{CUA} = \frac{Q_{NCF} - Q_{NCNF}}{NA} * 100$$

Q_{NCF} : Quantité de N d'une Culture Fertilisée.

Q_{NCNF} : Quantité N d'une Culture non Fertilisée.

NA : la dosed'Nappliquée.

2.5.2.4.1.3. 3. Indice de récolte azoté (IRN%).

L'efficacité de l'incorporation de l'azote dans la biomasse végétale et l'efficacité de remobilisation de l'azote vers les grains est définie par l'indice de récolte azoté (NHI) (Souissi et al., 2018).

L'indice de récolte azoté (NHI) est exprimé par la quantité d'azote dans les grains par rapport à la quantité d'azote totale absorbée par la plante (grains et paille). Il est calculé par la formule :

$$\text{IRN} = \frac{\text{azote dans les grains}}{\text{Azote total dans la plante à la maturité}} * 100$$

2.5.2.4.1.3. 4. Efficacité de l'utilisation de l'azote absorbé (EUA).

Elle est calculée par la formule suivante (Maynard et Aubry 1988) :

$$\text{NUEA} = \frac{\text{RMSGNPF} - \text{RMSGNPNF}}{\text{NA}} * 100$$

RMSGNPF= Rendement MS des grains N de la parcelle fertilisée

RMSGNPNF= Rendement MS des grains N de la parcelle non fertilisée

NA = dose d'azote appliquée

2.5.2.4.1.3. 5. Rendement en paille et en grains.

À la récolte, le poids de la paille et le poids des épis constituent le poids de la biomasse totale. Le poids des grains qui constitue le rendement grains est obtenu après battage des épis et étuvage à 80 °C pendant 72 heures.

Le rendement paille pour chaque échantillon récolté est obtenu par différence entre la biomasse totale produite à la maturité et le poids des grains du même échantillon par unité de surface. Le rendement et la biomasse totale des échantillons servent au calcul de l'indice de récolte et au comptage des épis.

Après la récolte de toutes les parcelles, nous avons procédé à la peser des grains et le rendement est rapporté à l'hectare en quintaux (q/ha).

2.5.2.4.1.6. Indice de récolte (IR%).

L'indice de récolte est le rapport du rendement en grains sur le rendement en biomasse aérienne totale. (Bouzerzour, 1998) rapporte que dans les milieux variables, il faut assurer une production de biomasse aérienne suffisante pour garantir rendement acceptable.

$$\text{IR} = \frac{\text{Rendement en grains}}{\text{Biomasse}} * 100$$

2.5.2.4.1.7. Rendement en paille et en grains.

À la récolte, le poids de la paille et le poids des épis constituent le poids de la biomasse totale. Le poids des grains qui constitue le rendement grains est obtenu après battage des épis et étuvage à 80 °C pendant 72 heures. Le rendement paille pour chaque échantillon récolté est obtenu par différence entre la biomasse totale produite à la maturité et le poids des grains du même échantillon par unité de surface. Le rendement et la biomasse totale des échantillons servent au calcul de l'indice de récolte et au comptage des épis.

2.5.2.4.1.7.1. Composantes du rendement.

1. Nombre d'épis par mètre carré (NE/m²).

Au stade de maturation, on a mesuré le nombre d'épis par un mètre carré dans chaque parcelle élémentaire (traitement).

2. Nombre de graines par épi (NGE).

À la fin de maturation des grains, on a pris au hasard sur chaque traitement 10 épis, où on a effectué un comptage des grains par épis.

3. Poids de mille grains (PMG).

À la récolte finale de grains en pleine maturation on a pesé 250 graines manuellement puis on a rapporté à 1000 graines, en multipliant par quatre, en unité grammes.

2.5.2.4.1.8. Teneur en chlorophylle totale.

La teneur en chlorophylle totale présente dans les feuilles a été déterminée à l'aide d'un chlorophylmomètre plante digital de type SPAD 501, qui donne des lectures en unité SPAD. Le SPAD-501 est un appareil compact facile à utiliser pour mesurer la teneur en chlorophylle des feuilles des plantes sans les détériorer. Il est utilisé pour évaluer la teneur en azote des feuilles puisque la majeure partie de l'azote est contenue dans la chlorophylle. Le principe repose sur la mesure de la fraction de la lumière transmise par la feuille à deux ondes (650 nm et 940 nm) sur une surface de 2 mm × 3 mm. Sur le milieu de la feuille étandard, nous avons mesuré la teneur moyenne en chlorophylle totale à raison de dix plants par chaque traitement étudié. La chlorophylle est le pigment vert qui permet aux plantes de réaliser la photosynthèse.

2.5.2.4.1.9. Traitement statistique.

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel le XLSTAT 2016 version 14, nous avons réalisé une analyse de la variance avec une comparaison de moyennes par le test de Newman-Keuls à une probabilité d'erreur de 5 %. Et pour les corrélations, nous avons utilisé le logiciel R.

CHAPITRE - III

Résultats et discussion

1ERE PARTIE.**Croissance et développement de la culture en réponse à la fertilisation azotée.**

La région semi-aride de l'Est est bien connue par l'importance de la céréaliculture, mais également par les faibles rendements et par une forte irrégularité de production qui est conditionnée par les aléas climatiques (Ammar, 2014 ; Rastion et Benabdrezak, 2014). Les stress abiotiques tels que les stress hydrique et thermique sont considérés comme d'importants facteurs limitant la production de blé (Bouzerzour et Monneveux, 1992 ; Benbelkecem et al., 1995 ; Mefti et al., 2000 ; Ciũca et al., 2009). Les hautes températures (sirocco) et de froid (gelées printanières) affectent le développement et tous les aspects de croissance de la céréale tout au long de son cycle (Bouzerzour et Monneveux, 1992 ; Benbelkecem et al., 1995 ; Mefti et al., 2000).

Au vu de travaux déjà effectués dans un milieu voisin Dutil et Ballif, (1971) in Boiffin et al. (1981), ont confirmé que cette liaison peut être imputée à l'effet des pluies sur la nutrition azotée du blé.

Les mêmes auteurs insistent qu'au sein d'une même année, certaines variations de comportement de la culture en fonction de la pluviosité locale, du type de sol et de l'histoire culturelle semblaient également pouvoir s'interpréter dans le sens d'une influence prédominante des conditions de nutrition azotée.

Compte tenu de la variabilité du métabolisme de l'azote selon l'indicateur face aux différents états de la nutrition azotée, les normes d'interprétation diffèrent énormément.

Les céréales ont fait l'objet de divers travaux de recherche, en matière de fertilisation et sont par conséquent mieux connues. Ces travaux ont permis d'établir des références régionales pour la culture du blé dur (Constantine, Sétif) qui peuvent servir de base pour évaluer cette méthode encore peu connue en Algérie.

Nous avons tenté de réaliser des conditions environnementales optimales où le seul facteur de variation serait la nutrition azotée qui permettra d'établir des conditions contrastées de nutrition azotée entraînant ainsi plusieurs niveaux de production.

C'est en créant ces situations diverses que nous pourrions établir et modéliser la relation entre les paramètres étudiés et l'état nutritionnel de la culture.

À partir de cela, nous pourrions quantifier les valeurs critiques de l'indicateur en question pour lequel une chute de la production est observée.

3.1. Durée des stades du cycle de développement de la variété Waha.

La datation des stades a permis de situer les différentes phases de développement de la culture et de vérifier les conditions climatiques dans lesquelles s'est déroulée chacune de ces phases.

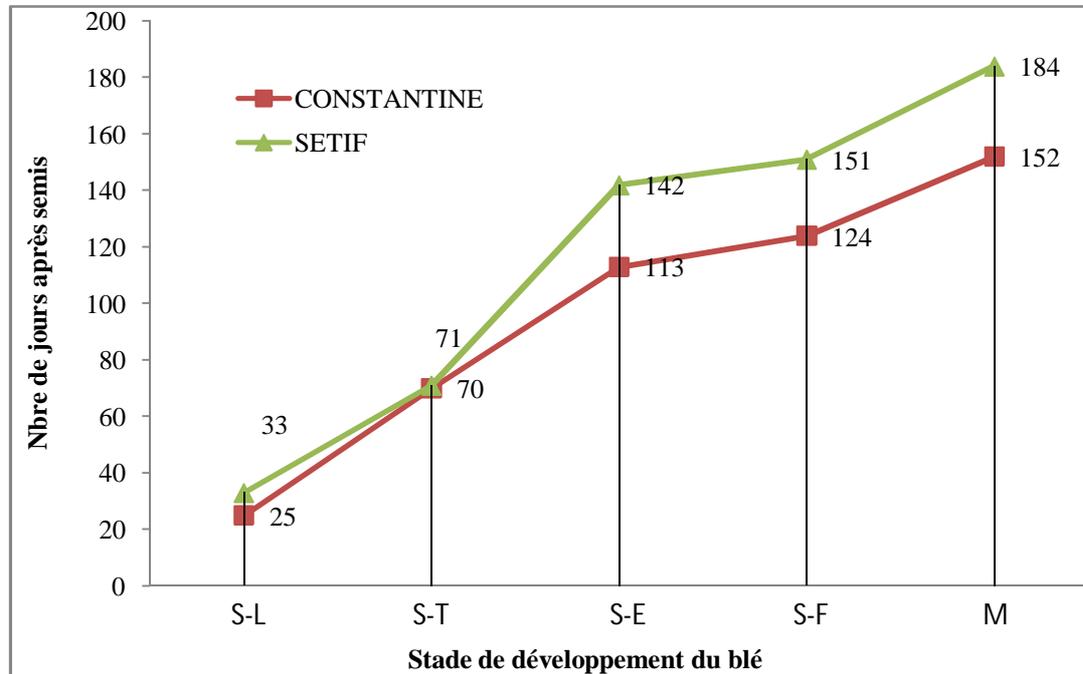
3.1.1. Région de Constantine.

Selon la figure 11 et durant la phase floraison-maturité, nous avons observé une élévation de la température qui est passée de 11.68, 9.74 et 8.6 °C (mi-montaison) à 25.12, 25.56 et 25.92 °C successivement pour les trois années 16/17, 17/18 et 18/19. Le régime de précipitations a baissé à partir de la mi-montaison soit des valeurs de 0.1 mm en 2016/2017 (année exceptionnelle et très sèche), 91 mm et 50.4mm pour les deux années 17/18 et 18/19.

Durant la phase floraison-maturité, et successivement pour les trois années 16/17, 17/18 et 18/19, les précipitations enregistrées sont de 45.04mm, 98 mm et 98.6mm (tableau 2).

3.1.2. Région de Sétif.

Pour les trois années 16/17, 17/18 et 18/19 et durant la même phase (floraison-maturité) (figure 11), nous avons remarqué une augmentation de la température passant de 11.59, 11.21 et 11.83 °C (mi-montaison) à 21.56, 20.78 et 25.06 °C, ainsi, nous avons remarqué que le régime de précipitations a baissé à partir de la mi-montaison (mi-avril), soit des valeurs de



S-L : Semis-Levée. S-T : Semis-tallage. S-E : Semis-Epaison.

S-F : Semis-Floraison. M : Maturité.

Figure 11. Durée en jours de chaque période étudiée au cours du cycle de développement de la variété Waha.

70.6 mm pour l'année 16/17, la quantité la plus importante a chuté durant le mois de juin (n'est pas bénéfique) les mois d'avril et mai étaient très secs 5.9 mm et 9.2 mm successivement, 151 mm pour la année 17/18 et 102.4 mm pour la année 18/19 (tableau 2).

Pour les deux régions d'étude, nous pouvons préciser que l'année 16/17 et particulièrement pour cette phase considérée comme la plus longue où la culture est exposée à des risques de conditions hydriques limitantes, qui ajoutées à l'élévation de la température, ont pu se répercuter sur la phase de remplissage des grains.

D'après ces résultats, nous remarquons que la phase semis-épiaison est plus lente à Sétif qu'à Constantine (figure 11). Selon Amokrane (2001) in Bouzerzour et al. (2002), les variétés locales de blé dur très tardives sont plus aptes à valoriser les pluies printanières que les variétés introduites dont le cycle de développement est plus court.

La datation nous a permis de situer les dates d'échantillonnage le long du cycle.

Les indicateurs de la nutrition azotée ont été mesurés en début de cycle. En effet, l'intérêt principal de ces indicateurs est de pouvoir raisonner et corriger les apports azotés qui se font essentiellement au stade A (début tallage) et au stade B (début montaison).

3.2. Paramètres mesurés du sol.

3.2.1 Humidité du sol.

L'humidité pondérale du sol est une mesure de la quantité d'eau présente dans le sol par unité de poids. Elle représente la fraction d'eau contenue dans les pores du sol, qui est essentielle pour le développement et la croissance des plantes. Elle est un facteur clé qui influence de nombreux processus biologiques, chimiques et physiques dans le sol, ainsi que la disponibilité des nutriments et la productivité des cultures.

L'humidité du sol étant peu variable d'un traitement à l'autre, nous avons représenté l'évolution de l'humidité pondérale moyenne du sol aux différents stades de développement du blé, années et profondeurs.

La conservation de l'eau est un paramètre important de la qualité du sol. Elle constitue souvent un facteur limitant dans la productivité en agriculture (Maamri et al., 2011 et Benniou et al., 2018).

3.2.1.1. Évolution de l'humidité du sol au cours du cycle de la culture dans les deux régions d'étude (Sétif et Constantine) et pour les trois années.

Le suivi de l'évolution de l'humidité pondérale du sol est indispensable au diagnostic de l'état de la culture et nous permet de déterminer s'il y a eu des périodes de stress.

L'évolution de l'humidité pondérale du sol cultivé a été réalisée au cours du cycle végétatif de la culture de blé dur au niveau de deux profondeurs : 0-20 cm et 20-40 cm pour les trois années 2016/2017, 2017/2018 et 2018/2019.

3.2.1.1.1. Région de Constantine.

Les courbes de l'évolution de l'humidité moyenne du sol pour les trois années (figures 12 et 13) montrent qu'elle varie en fonction de la profondeur du sol (0- 20 cm et 20-40 cm) et les stades physiologiques de la culture.

La partie sous-jacente (20-40 cm) a accumulé plus de l'eau que la partie supérieure (0-20 cm), pour les trois années.

Pour l'année 2016/2017 et au semis, une humidité moyenne relativement élevée correspondant respectivement à 18.6 % et 18.75 % en profondeur de 0-20 cm et 20-40cm. Cela est dû aux pluies de novembre et décembre ainsi que la faible évaporation du sol à cette période de l'année.

Entre le stade tallage et la mi-montaison, l'humidité moyenne du sol a progressivement baissé du fait de la transpiration du couvert, de l'augmentation des températures et de la baisse des précipitations. La légère augmentation de l'humidité à la floraison est survenue suite aux précipitations de fin avril.

Cependant, en fin du cycle végétatif (stade de maturité), une humidité moins importante dans les deux profondeurs et qui représente un taux de 10.35 % et 11.95 % pour la profondeur 0-20 cm.

Pour l'année 2017-2018, au semis et sur les deux profondeurs de 0-20 cm et 0-40 cm, l'humidité moyenne est respectivement de 21.5 % et 22 %.

Pour cette année, les pluies tombées présentent une quantité importante durant tout le cycle végétatif de la culture, notamment en fin de cycle (tableau 2). Ces dernières ont favorisé un bon état hydrique du sol.

Au stade épiaison, l'humidité moyenne est importante dans les deux profondeurs (0-20 cm) et (20-40 cm) du sol présentant des valeurs respectives de 14.9 % et 15 %.

En fin de cycle, en comparaison des deux profondeurs : 0-20 cm et 20-40 cm, les résultats ont montré que la profondeur 0-20 cm présent un taux d'humidité de 11 % et 11.45 % pour la profondeur 20-40.

Pour l'année 2018/2019, les courbes de la figure 12 et 13 montrent qu'au semis, l'humidité moyenne est relativement élevée, elle est de l'ordre respectif de 19.33 % et 20 %, pour les profondeurs (0-20cm) et (20-40cm).

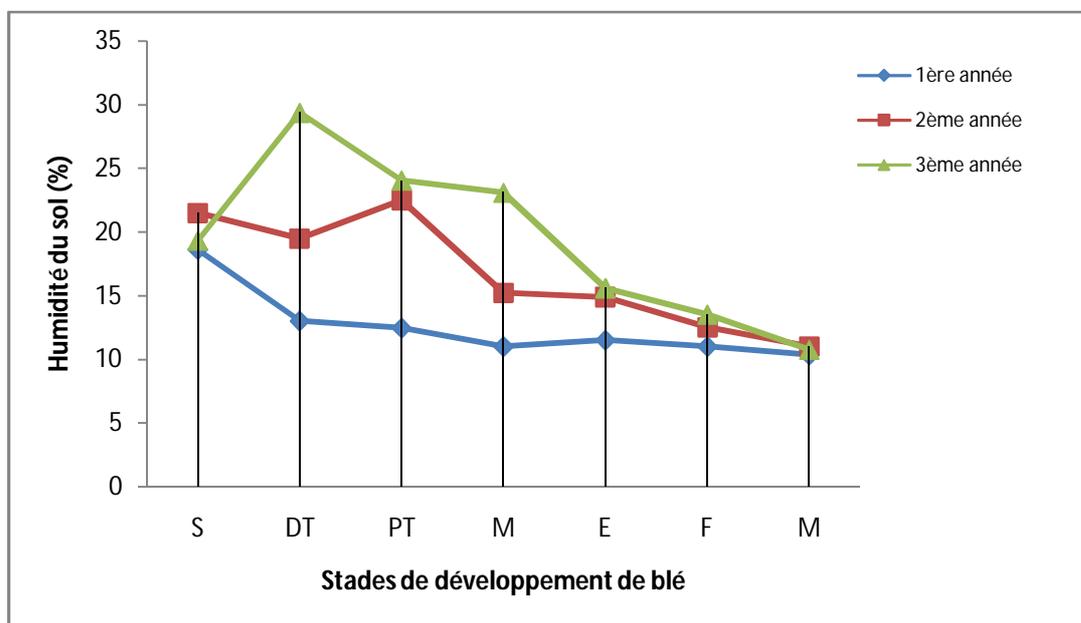
Au stade montaison, une augmentation nette du taux d'humidité, dans les deux profondeurs 0-20 cm 20-40 cm qui est respectivement de l'ordre de 23.1 % et 24.4 %.

Cependant, en fin du cycle végétatif, essentiellement au stade de maturité, dans les deux profondeurs (0-20 cm, 20-40 cm), le sol a gardé une proportion d'humidité respectivement de l'ordre de 10.75 % et 11.95 %.

À la maturité, lorsque l'humidité est au point de flétrissement, elle peut affecter le remplissage des grains.

L'analyse de la variance de l'humidité du sol (tableau 1 en annexes) a révélé :

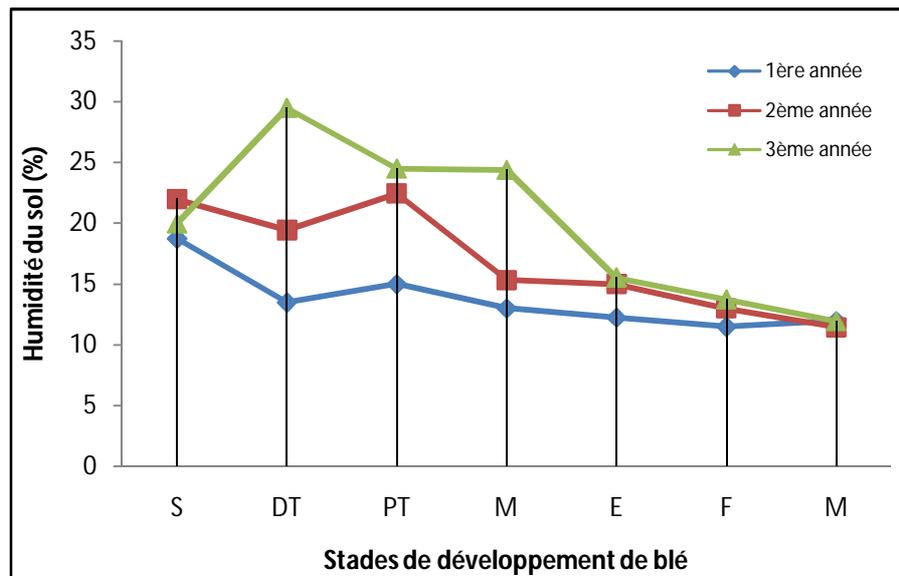
- Un effet stade très hautement significatif ($P < 0.0001$), avec des différences qui sont observées au stade début tallage, plein tallage suivit par les stades semis, montaison épiaison, floraison et enfin le stade maturation,
- Un effet année très hautement significatif avec un effet plus remarquable sur celui des deux années 2017/2018 et 2018/2019 (régime des pluies) par rapport à celui de l'année 2016-2017, caractérisées par un faible régime des pluies (sécheresse a sévi durant presque tout le cycle végétatif de la plante),
- Un effet profondeur très hautement significatif, avec un effet plus notable sur la profondeur 20-40 cm (16.872a) que la profondeur 0-20 cm (16.226 b).



S :Semis. DT : Début tallage. PT : Plein tallage. M : Montaison. E : Epiaison.

F : Floraison. M : Maturité.

Figure 12. Évolution de l'humidité du sol moyenne dans la couche 0-20cm au cours du cycle de la culture pour les trois années dans la région de Constantine.



S : Semis. DT : Début tallage. PT : Plein tallage. M : Montaison. E : Epiaison.
F : Floraison. M : Maturité.

Figure 13. Évolution de l'humidité du sol moyenne dans la couche 20-40cm, au cours du cycle de la culture pour les trois années dans la région de Constantine.

3.2.1.1.2. Région de Sétif.

Les courbes de l'évolution de l'humidité moyenne du sol (figures 14 et 15) montrent que l'humidité pondérale varie en fonction de la profondeur du sol et les stades physiologiques de la culture.

La profondeur du sol (20-40 cm), comme celle de Constantine a accumulé plus de l'eau que la partie supérieure (0-20 cm), pour les trois années.

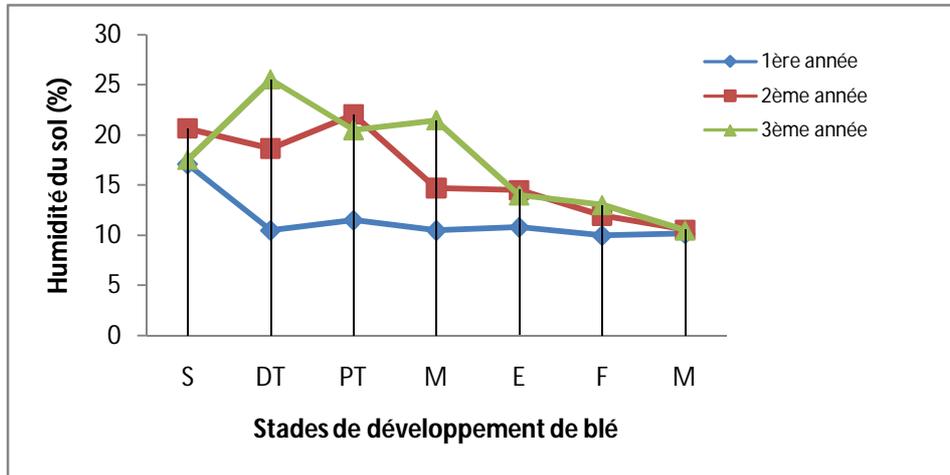
L'analyse de la variance de l'humidité du sol a montrée un effet année très hautement significatif ($P < 0.0001$) (tableau 2 en annexes) avec un effet plus remarquable sur celui des deux années 2018/2019 et 2017/2018 avec respectivement 18.05%a et 16.17%b qui traduit la chute des pluies plus importante dans l'ITGC de Sétif comme dans celle de Constantine par rapport à celui de l'année 2016-2017.

Quant aux effets stades, des différences très hautement significatives sont observées au stade semi puis les stades début et plein tallage, montaison, épiaison, floraison et enfin le stade maturation ($P < 0.0001$) (tableau 2 en annexes).

L'effet profondeur à son tour est très hautement significatif ($P < 0.0001$) avec un taux d'humidité plus remarquable dans la couche sous-jacente 20-40 cm par rapport à la couche superficielle 0-20 cm (tableau 2 en annexes).

Les figures 14 et 15 montrent que :

Pour l'année 2016/2017 et au semis, une humidité moyenne relativement élevée qui est de l'ordre respectif de 17.08 % et 15.78 % pour la profondeur 0-20 cm et 20-40cm. Cela est lié à la chute des pluies durant les mois de novembre et décembre, ainsi qu'une faible

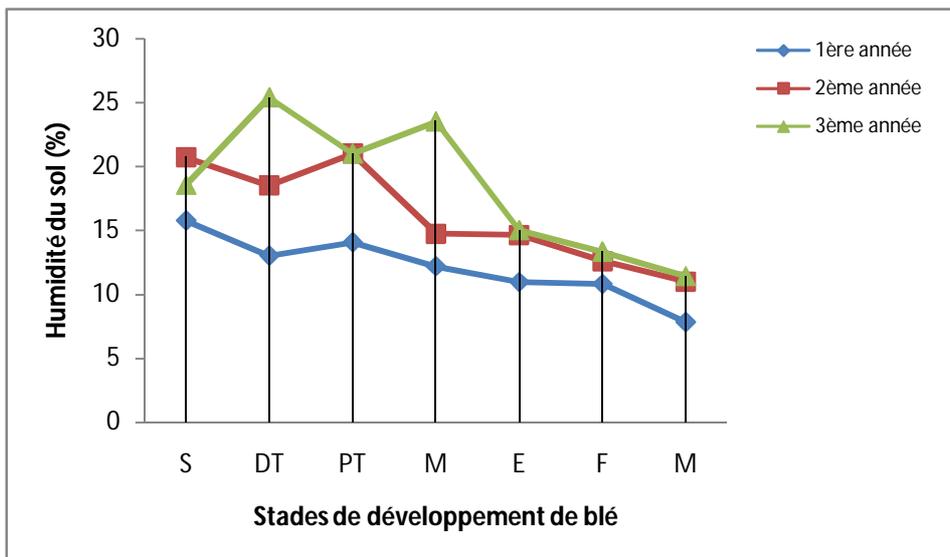


évaporation au cours de cette période de l'année.

S : Semis. DT : Début tallage. PT : Plein tallage. M : Montaison. E : Epiaison.

F : Floraison. M : Maturité

Figure 14. Évolution de l'humidité du sol moyenne dans la couche 0-20cm au cours du cycle de la culture pour les trois années dans la région de Sétif.



S : Semis. DT : Début tallage. PT : Plein tallage. M : Montaison. E : Epiaison.

F : Floraison. M : Maturité

Figure 15. Évolution de l'humidité du sol moyenne dans la couche 20-40cm au cours du cycle de la culture pour les trois années dans la région de Sétif.

Au stade de maturité, l'humidité a baissé dans les deux profondeurs avec des taux de 10.19 % (0-20 cm) et 7.83 % (20-40 cm). Cela peut être attribué aux précipitations récentes du mois de juin, il est possible que l'eau ait été principalement retenue dans la couche superficielle. Les précipitations peuvent être plus facilement absorbées par la couche supérieure du sol, tandis que la couche plus profonde peut mettre plus de temps à recevoir l'eau. Ou bien parce que la plante de blé peut continuer à absorber de l'eau au stade de maturité, mais généralement à un rythme plus lent que pendant les stades de croissance actifs.

La quantité d'eau absorbée dépendra de plusieurs facteurs, tels que les besoins de la plante, la disponibilité d'eau dans le sol et les conditions environnementales.

Pour l'année 2017-2018 et au semis, l'humidité moyenne est de l'ordre de 20.66 % et 20,73 % successivement pour la profondeur 0-20 cm et la profondeur 0-40 cm. Cette année est caractérisée par des chutes de quantités intéressantes de pluies durant tout le long du cycle végétatif de la céréale qui ont amélioré l'état hydrique du sol (tableaux 2).

Au stade épiaison, l'humidité moyenne est de l'ordre successif de 14.52 % et 14.65 % pour la couche superficielle et la couche profonde.

À la maturité, la profondeur 0-20 cm présente un taux d'humidité de 10.58 % par rapport à la profondeur 20-40 cm (11 %), avec un écart de 0.42 %.

Pour l'année 2018/2019 et au semis, l'humidité moyenne est importante avec des valeurs, de 17.52 % pour la couche 0-20 cm et 18.58 %, pour la couche 20-40 cm.

Au stade montaison, une augmentation nette du taux d'humidité, dans les deux profondeurs 0-20 cm 20-40 cm qui est respectivement de l'ordre de 21.46 % et 23.53 % (Sétif).

Cependant, en fin du cycle végétatif, essentiellement au stade de maturité, dans les deux profondeurs (0-20 cm, 20-40 cm), le sol a gardé une proportion d'humidité, respectivement de l'ordre de 10.5 % et 11.44 %.

À la maturité, lorsque l'humidité est à l'humidité du point de flétrissement, elle peut affecter le remplissage des grains.

Discussion.

La mesure de l'humidité pondérale est importante pour comprendre les conditions de croissance des plantes et les processus biogéochimiques dans les sols. L'humidité pondérale affecte la structure et la texture du sol, la disponibilité de l'eau et des nutriments pour les plantes, ainsi que les taux de réactions chimiques et biologiques. La gestion de l'humidité pondérale est donc un élément clé de la gestion des sols pour la production agricole, la protection de l'environnement et la conservation des ressources naturelles.

Selon Zhou (1995) et Mkhabela et al (2005), l'eau du sol est importante au cours de la période de la croissance de blé d'hiver, il est intéressant de noter que la disponibilité de l'humidité du sol durant le début de cycle détermine la densité des plantes, cependant, le stade de maturité est le plus critique, en déterminant le rendement grain (Benniou, 2013).

Le profil hydrique demeure un paramètre très important pour déceler son importance sur l'évolution du cycle physiologique de la culture du blé, notamment enfin du cycle, période très critique pour le remplissage du grain en Algérie.

À partir du semis jusqu'au stade épiaison, le taux d'humidité a diminué dans les deux couches, pour les deux régions d'étude. Du stade floraison jusqu'à la maturité de la culture et pour toutes les années, le niveau de la teneur en eau atteint des valeurs inférieures à 15 % et tend vers le point de flétrissement (Fig. 12, 13, 14 et 15), cette période de manque d'eau coïncide avec les stades d'épiaison et de remplissage du grain des épis. Ces résultats corroborent ceux rapportés par des auteurs dans les mêmes conditions (Hannachi et Fellahi, 2010 ; Chennafi, 2010 ; Latreche, 2011 ; Belagrouz, 2013).

L'interaction stades profondeur fait varier l'humidité du sol tout en déterminant l'évolution de la teneur en eau du sol en fonction du stade de développement de la culture. Il semble que la plante extrait beaucoup plus sur les profondeurs de 0-20, 20-40cm particulièrement entre épiaison et floraison. Le plus important est que dès le l'épiaison, le niveau d'humidité baisse et atteint des valeurs faibles voisinant le point de flétrissement, cela est valable pour les deux profondeurs.

Clément–Grandcourt et Prats (1971) affirment qu'entre le tallage et la floraison, la vitesse de croissance de la plante chez le blé est à son maximum pour élaborer les trois quarts de la matière sèche totale. Pour assurer cette fonction, la plante transpire en utilisant l'eau disponible pour réguler la demande climatique dont dépendent l'intensité de la photosynthèse et le degré de transpiration de la plante. Dans les conditions des hauts plateaux Sétifiens, le stade épiaison coïncide avec les fortes températures. Pour lutter contre la chaleur, la plante transpire uniquement pour réguler la température interne (Clément–Grandcourt et Prats, 1971 ; Chennafi, 2010 b ; Chennafi, 2012). L'extraction de l'eau profonde est utile pour augmenter le rendement (Kirkegaard et Lilley, 2007).

3.2.2. Azote minéral du sol.

La gestion de l'azote doit être raisonnée de plus en plus finement pour atteindre des objectifs multiples de rendement et de qualité des produits récoltés, mais aussi de respect de l'environnement. Ces objectifs ne peuvent être atteints qu'en pilotant la fertilisation azotée au plus près des besoins de la plante afin de réduire les pertes d'azote nitrique et sous forme

gazeuse. Pour cela, il convient de connaître et de prévoir précisément la dynamique saisonnière de la minéralisation de l'azote.

La comptabilisation de l'azote disponible du sol peut procurer des bénéfices économiques, car sous de bonnes conditions de sol et de climat, le sol peut fournir jusqu'à 200 kg d'azote à la culture. En effet, dans un sol riche en azote, plus de deux tiers des besoins des cultures en azote peuvent être comblés par le sol, le reste provenant de l'engrais minéral azoté (N'Dayegamiye, 2007).

Autant, plusieurs facteurs déterminent la croissance et les activités des microorganismes du sol, et par conséquent les quantités d'azote minéralisées au cours de la saison de végétation telles les cultures de rotation, les modes de fertilisation organique ou minérale, les techniques culturales, les teneurs en matière organique du sol et les résidus organiques apportés, la texture et la structure du sol, le pH et les conditions pédoclimatiques.

3.2.2.1 Région de Constantine.

3.2.2.1.1. Effet du facteur traitement sur l'évolution de l'azote minéral dans le sol aux différents stades de la culture.

L'évolution de l'azote est la même pour l'ensemble des traitements (figure 16). Entre le stade tallage et le stade début montaison, nous observons une diminution de la teneur du sol en azote minéral. Au-delà du stade début montaison, il n'y a plus de variation importante. À la maturité, nous pouvons constater une différence entre les traitements : les traitements bien fertilisés ont des teneurs supérieures en azote en fin de cycle.

3.2.2.1.2. Effet du facteur année sur l'évolution de l'azote minéral dans le sol aux différents stades de la culture.

Concernant l'effet année, les analyses statistiques ont révélé un effet THS ($P < 0.0001$) pour tous les stades (tableau 3 en annexes).

La figure 16 confirme que les années humides 17/18 et 18/19 présentent des quantités élevées d'azote minéral que l'année sèche 16/17.

Les années humides présentent des quantités d'azote minéral plus importantes, soit une quantité d'azote minéral de 14.34 ppm pour D3 par rapport à T 7 ppm (année 17/18) et 14.06 ppm pour D3 par rapport à T 6.65 ppm (année 18/19) par rapport à l'année sèche (2016/2017) avec une valeur de 11.89 ppm d'azote minéral par rapport à T avec une valeur de 5 ppm. Ce qui nous laisse penser qu'il existe un effet de la température et l'humidité sur la minéralisation de l'azote.

3.2.2.2. Région de Sétif.

3.2.2.2.1. Effet du facteur traitement sur l'évolution de l'azote minéral dans le sol aux différents stades de la culture.

Pour ce paramètre, nous avons remarqué :

- Une chute de la quantité d'azote avant le semis,
- Une évolution de l'azote similaire pour l'ensemble des traitements où nous remarquons entre le stade tallage et le stade début montaison, une baisse de la teneur du sol en azote minéral. À partir du stade début montaison, l'évolution de l'azote minéral dans le sol ne subit pas de variation significative. À la maturité, une différence très nette entre les traitements a été observé où nous avons remarqué que les traitements D3 (13.1 ppm a) et D2 (12.06 ppm b) suivis par D1 (8.18 ppm c) présentent des valeurs d'azote dans le sol plus importantes par rapport au témoin T avec une valeur de 5.96 ppm (d) (figure 17).

3.2.2.2.2. Effet du facteur année sur l'évolution de l'azote minéral dans le sol aux différents stades de la culture.

L'évolution de l'azote minéral moyen du sol de la moyenne des différents traitements pour les trois années et aux différents stades de développement de blé montre que l'azote évolue presque de la même façon pour les années 16/17, 17/18 et 18/19 avec des valeurs plus importantes de la dose D3 pour les années humides (18/19 et 17/18) soit une quantité d'azote minéral en fin de cycle de la culture, successive de l'ordre de 13.66 ppm et de 14.06 ppm par rapport à l'année sèche (16/17) qui est de l'ordre de 11.58 ppm (figure 17).

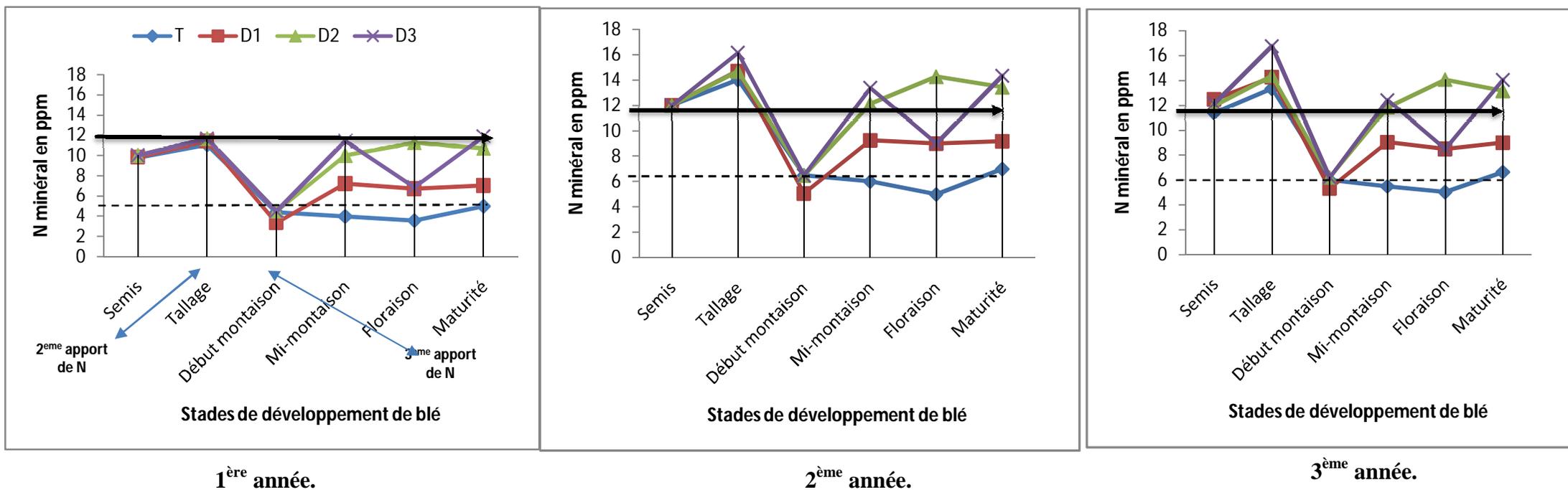
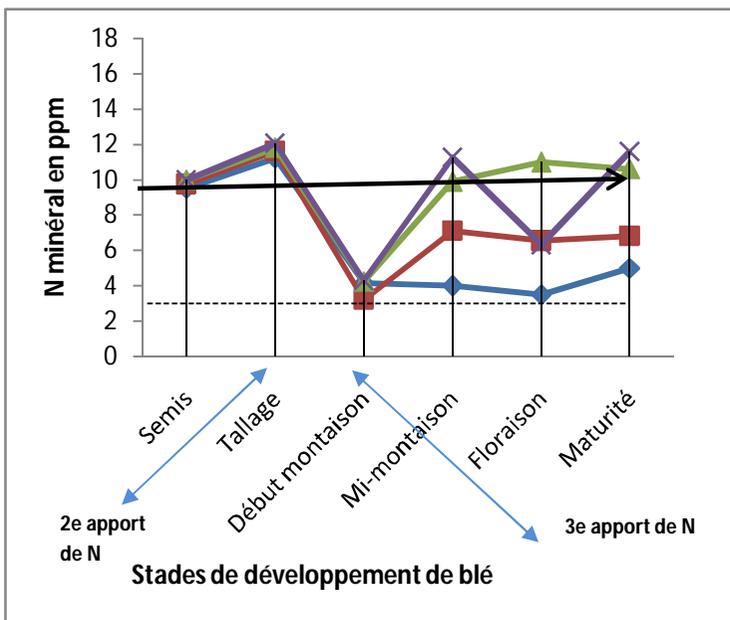
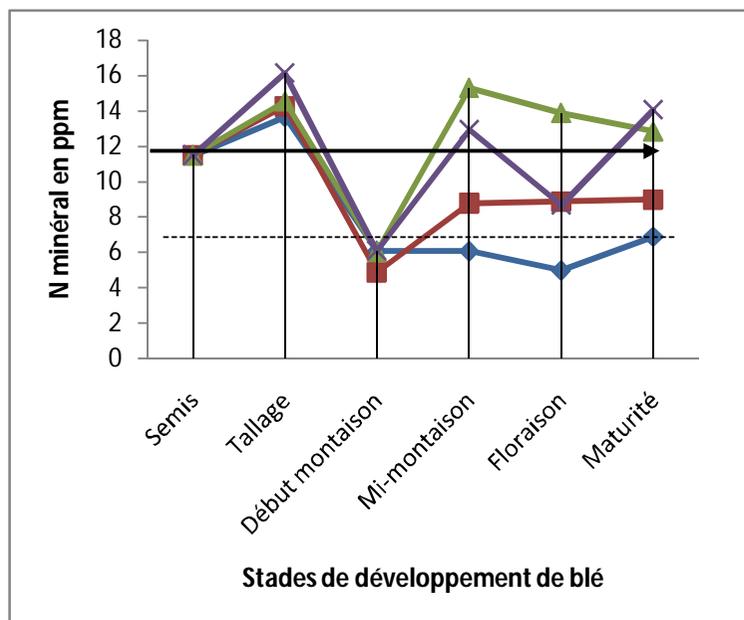


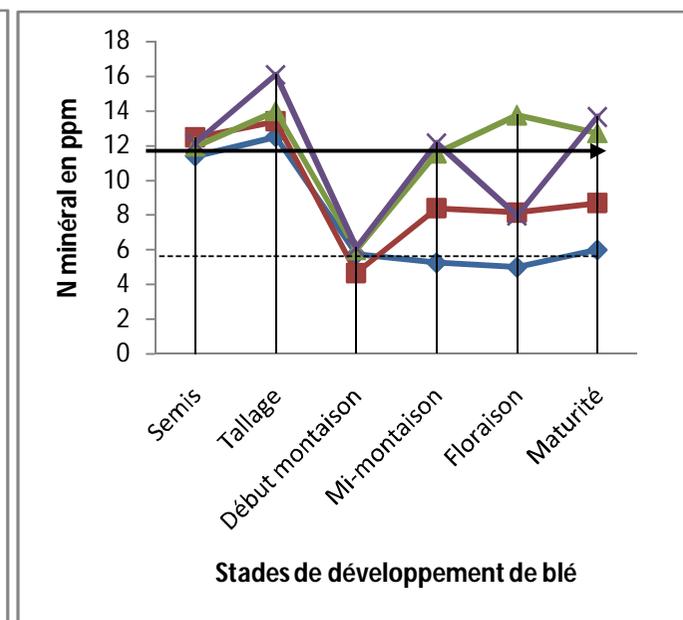
Figure 16. Évolution de l'azote minéral moyen du sol aux différents stades de développement du blé dur pour les différents traitements, dans la région de Constantine.



1^{ère} année.



2^{ème} année.



3^e année.

Figure 17. Évolution de l'azote minéral moyen du sol aux différents stades de développement du blé dur pour les différents traitements, dans la région de Sétif.

Discussion

La minéralisation de l'azote est un processus effectué par des micro-organismes tels que les bactéries et les champignons présents dans le sol. La quantité et la vitesse de la minéralisation dépendent de plusieurs facteurs tels que la teneur en matière organique du sol, la température, l'humidité, le pH et la disponibilité en nutriments. Une compréhension de la minéralisation de l'azote est importante pour optimiser la gestion de l'azote dans les cultures, éviter les pertes d'azote dans l'environnement et améliorer l'utilisation de l'azote dans l'agriculture.

La chute de la quantité d'azote enregistrée avant le semis pour les deux régions (Constantine et Sétif) est due aux fortes précipitations de novembre et décembre qui ont pu engendrer une lixiviation de l'azote qui est pour une grande part nitrique et donc mobile ou du moins son déplacement hors de la couche 0-40cm.

L'évolution de l'azote est la même pour l'ensemble des traitements pour les deux régions avec une baisse de la teneur du sol en azote minéral entre le stade tallage et le stade début montaison. Cette baisse est expliquée par l'absorption de l'azote par le végétal durant cette période de croissance végétative ; à partir du stade début montaison, l'évolution de l'azote minéral dans le sol ne subit pas de variation significative. À la maturité, une différence très nette entre les traitements dont les doses croissantes D3 et D2 puis D1 présentent des valeurs d'azote dans le sol plus importantes par rapport au témoin T.

L'évolution de l'azote minéral dans le sol au cours des différents stades de croissance de la culture peut être expliquée de la manière suivante :

Au début de la culture, lors de l'application du MAP (Mono-Ammonium phosphate) contenant 12 % d'azote, une quantité d'azote minéral intéressante est présente dans le sol. Cela correspond à la disponibilité initiale d'azote pour la plante.

Au stade de tallage, un deuxième apport d'azote est effectué, représentant 1/3 de la dose totale d'azote requise pour la culture. Cela entraîne une augmentation de la quantité d'azote minéral dans le sol. Cet apport supplémentaire vise à répondre à la demande croissante d'azote de la plante à mesure qu'elle se développe.

Au stade de début montaison, une diminution de la quantité d'azote minéral dans le sol, qui peut être due à l'utilisation accrue d'azote par la plante pour soutenir sa croissance et son développement. À ce stade, un troisième apport d'azote est effectué, représentant 2/3 de la

dose totale d'azote requise, expliquant l'augmentation de la quantité d'azote minéral dans le sol au stade de mi-montaison. Puis une diminution de la quantité d'azote minéral dans le sol, au stade de floraison. Cela peut être attribué à l'utilisation accrue d'azote par la plante pour la formation des fleurs et le développement des organes reproducteurs.

Au stade de maturité, la quantité d'azote minéral dans le sol remonte. Cette augmentation peut être due à la sénescence des parties aériennes de la plante et à la libération d'azote provenant de la dégradation des tissus végétaux.

De façon générale, l'azote du sol pour les deux régions (Constantine et Sétif) n'a pas subi d'importantes variations entre le début et la fin de cycle. Ce qui nous a amenés à penser qu'il n'y a eu ni enrichissement ni appauvrissement entre le semis et la récolte, ce qui traduit un certain équilibre entre les exportations de la culture et les fournitures du sol.

Les années humides 17/18 et 18/19 présentent des quantités élevées d'azote minéral que l'année sèche 16/17. Cela prouve qu'il existe une relation entre températures, précipitations et niveau des reliquats azotés.

Cette faiblesse au niveau des quantités d'azote minéral du sol soit au niveau de la région de Sétif ou celle de Constantine est due de la faible minéralisation provoquée par les faibles pluies automnales et des précipitations hivernales qui font migrer le peu d'azote minéral formé à l'automne, hors d'atteinte des racines.

Ainsi, Valé (2006) a indiqué que la minéralisation de la matière organique du sol est un processus biologique sous l'influence des conditions environnementales, principalement la température et l'humidité. La température régule l'activité des micro-organismes tandis que la teneur en eau du sol contrôle la diffusion de l'oxygène dans le sol (et donc les conditions aérobies/anaérobies). L'humidité du sol régule aussi la mise à disposition des substrats aux micro-organismes du sol. La modélisation de l'effet de la température et de l'humidité sur la minéralisation du carbone et de l'azote est une étape essentielle à la prédiction de la fourniture d'azote par le sol pour les cultures, mais aussi de l'évolution du dégagement de CO₂ par le sol (problématique du réchauffement global).

Le même auteur travaillant sur la quantification et la prédiction de la minéralisation nette de l'azote du sol in situ, sous divers pédoclimats et systèmes de culture ont confirmé que l'augmentation de la température ou de l'humidité accroît la minéralisation de l'azote.

Même sur un sol sec, la minéralisation de l'azote peut être non négligeable. Une étude effectuée par Valé et al. (2007), confirme en effet que la minéralisation dans un sol sec représente plus de 50 % du potentiel maximal de minéralisation de l'azote.

Lorsque la température augmente de 10 °C, la minéralisation de l'azote est multipliée par 3,15 pour des températures inférieures à 25 °C. Entre 25 et 35 °C, la minéralisation augmente moins rapidement ajoutent Valé et al. (2007).

Dans le même ordre d'idée, ces auteurs affirment que sur une plage de 0 à 35 °C, la vitesse de minéralisation de l'azote dans les sols augmente avec la température. Par ailleurs, le processus de minéralisation est plus rapide sur un sol humide.

L'expérimentation réalisée par l'Institut ARVALIS en 2007 a montré également que la minéralisation estivale peut rester élevée dans un sol relativement sec, car la température élevée compense l'effet de la dessiccation des couches de surface. Il peut en être de même pour la minéralisation hivernale, les températures basses étant partiellement compensées par une humidité du sol optimale.

Schmidt et Von Fragstein, (1999) rapportent que le blé est souvent semé après retournement des légumineuses fourragères, valorisent l'enrichissement du sol en azote lié aux matières organiques compostées ou non. L'accumulation des nitrates dépend essentiellement de l'ensoleillement (facteur principal pour la photosynthèse), la température (plus elle est élevée plus la minéralisation de la matière organique est importante, il en est de même pour l'absorption des éléments nutritifs par les racines et le métabolisme de la plante), la pluviométrie et l'irrigation (qui lessivent les nitrates présents dans le sol superficiel) et essentiellement du régime de fertilisation azotée (AFSSA, 2003).

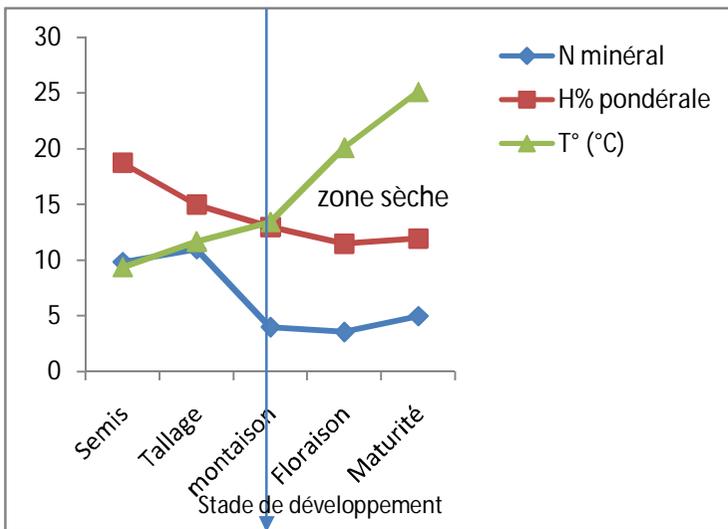
Pour connaître l'effet de l'humidité et de la température sur la minéralisation de l'azote, nous avons dressé des graphiques (figure 18) exposant l'effet des changements de température et d'humidité sur la minéralisation de l'azote pour les trois années d'étude, dans la région de Constantine et Sétif. Ces graphiques montrent que :

- La minéralisation de l'azote est influencée par les effets interférents de la température et de l'humidité. Autrement dit, que des températures et des niveaux d'humidité plus élevés augmentent la minéralisation de l'azote. La température joue également un rôle important dans la minéralisation de l'azote dans le sol. Une augmentation de la température augmente la vitesse des réactions biologiques responsables de la minéralisation de l'azote. Cependant, cette relation dépend de la plage de température optimale pour chaque micro-organisme impliqué dans la décomposition de la matière organique. De même Liu et al. (2013) ont remarqué qu'il existe une relation positive

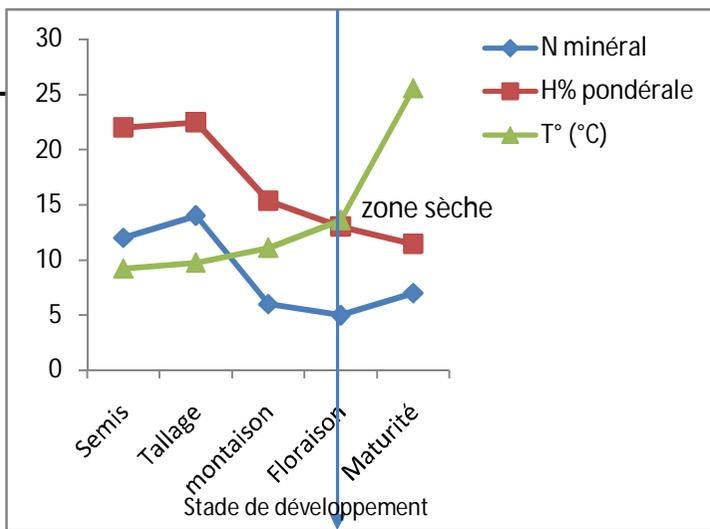
entre la température et la vitesse de la minéralisation de l'azote dans une large gamme de températures.

- La minéralisation de l'azote est plus forte dans les sols humides (années 17/18 et 18/19) que dans les sols secs (16/17). Nos résultats corroborent avec ceux de Bai et al. (2011) qui ont étudié les effets interactifs de la température, de l'humidité et de l'apport d'azote sur la respiration du sol et la minéralisation de l'azote dans une steppe tempérée.
- L'humidité pondérale du sol, la température et les précipitations jouent un rôle important dans la minéralisation de l'azote dans le sol.
- Une augmentation de l'humidité pondérale du sol entraîne une augmentation de la minéralisation de l'azote organique, c'est-à-dire la conversion de l'azote organique en azote minéral disponible pour les plantes.

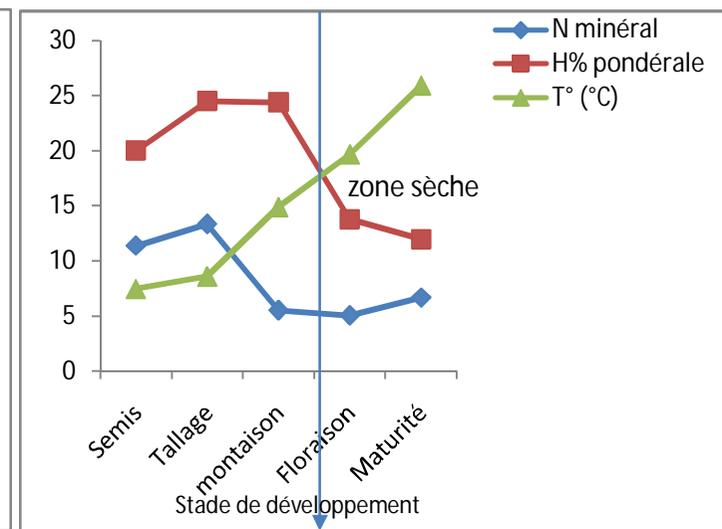
Enfin, la quantité et la répartition des précipitations influencent la disponibilité en eau du sol, ce qui peut affecter la minéralisation de l'azote. Cela peut être expliqué par les périodes prolongées de sécheresse qui peuvent réduire la minéralisation de l'azote en limitant l'activité biologique dans le sol, tandis que des précipitations excessives peuvent entraîner une saturation du sol en eau, réduisant ainsi l'activité biologique et la minéralisation de l'azote.



1^{ère} année.

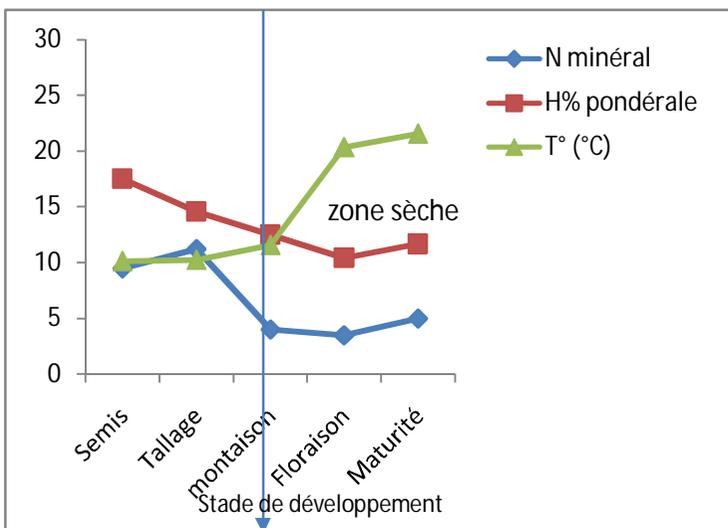


2^{ème} année.

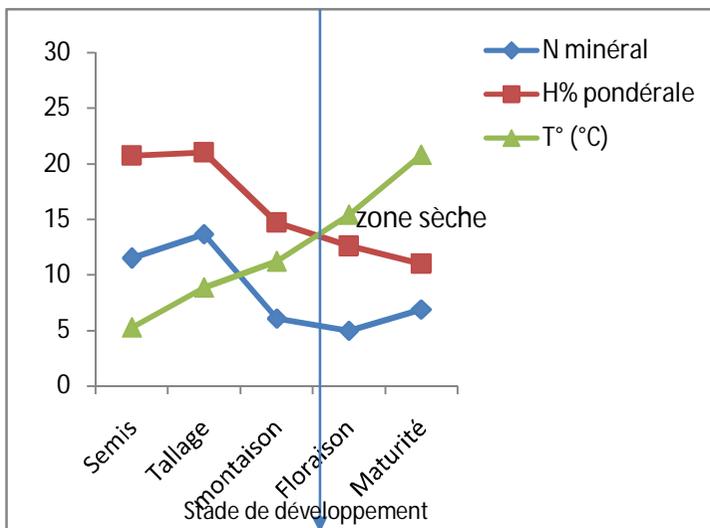


3^{ème} année.

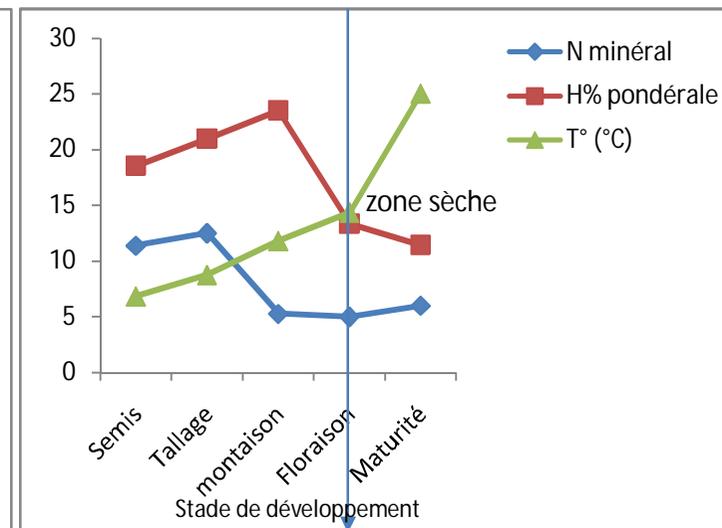
Région de Constantine.



1^{ère} année.



2^{ème} année.



3^{ème} année.

Région de Sétif.

Figure 18. Effet de l'humidité et de la température sur la minéralisation de l'azote pour les différents stades

de la culture et pour le traitement T, dans les deux régions d'étude.

Ces résultats rejoignent ceux de Zhou et al. (2008) qui ont montré que les régimes de précipitations influencent la minéralisation de l'azote dans le sol. Les conditions de précipitations fréquentes et abondantes ont conduit à une augmentation de la minéralisation de l'azote, tandis que les conditions de précipitations sporadiques ou rares ont entraîné une diminution de la minéralisation de l'azote.

Ils ont également constaté que les effets des régimes de précipitations sur la minéralisation de l'azote étaient liés à des changements dans l'humidité du sol et la composition de la communauté microbienne. Les sols avec des régimes de précipitations fréquentes et abondantes présentaient une plus grande activité microbienne et une plus grande disponibilité de l'azote pour la minéralisation.

Conclusion partielle.

Pour bien éclairer la relation de l'humidité pondérale du sol et de la température sur la minéralisation de l'azote, nous avons établi des courbes d'évolution de l'azote minéral en fonction de l'humidité du sol et des températures aux différents stades de la culture et pour les trois années d'étude, dans les deux régions d'étude (figure 18).

Concernant l'humidité du sol.

L'étude de l'évolution de l'humidité du sol au cours du cycle de la culture dans les régions de Sétif et Constantine a permis les observations suivantes :

- Des variations de l'humidité pondérale en fonction de la profondeur du sol et des stades de la culture. La partie inférieure du sol a accumulé plus d'eau que la partie supérieure pour les trois années. Cependant, au fur et à mesure que la culture se développait, l'humidité moyenne diminuait avec l'augmentation des températures et de la diminution des précipitations.

Les pluies ont joué un rôle important dans l'état hydrique du sol, notamment lors des années 2017/2018 et 2018/2019 où des quantités importantes ont été enregistrées tout au long du cycle de la culture.

- L'humidité pondérale du sol est un facteur clé pour le développement optimal du blé et pour maximiser son rendement. Le cycle du blé est fortement influencé par l'humidité du sol. Donc, il est essentiel de suivre l'humidité du sol pour diagnostiquer l'état de la culture et détecter d'éventuelles périodes de stress.

Concernant les besoins de la culture en eau.

En général, le blé a besoin d'une quantité suffisante d'eau pour germer, émerger et se développer correctement. Ces besoins varient selon les stades de développement de la plante. Son prélèvement par le blé est étroitement lié à ses besoins (voir partie bibliographique).

Au début du cycle de croissance, les besoins du blé en eau sont modérés pour favoriser la germination et l'enracinement. Au stade de tallage, les besoins en eau sont moyens pour maintenir une croissance saine et équilibrée. Au stade d'épiaison, le blé a besoin des quantités d'eau plus élevées pour favoriser la formation de l'épi et la floraison. Enfin, au stade de remplissage des grains, le blé a besoin d'une quantité d'eau suffisante pour permettre la croissance et le remplissage des grains, ainsi que l'absorption de l'azote.

Ces besoins dépendent des variations d'humidité pondérale du sol qui peuvent affecter le prélèvement en eau et en azote par le blé, et peuvent donc avoir un impact sur le rendement de la culture. En d'autres termes, pour assurer une croissance optimale et une productivité élevée, les prélèvements en eau du blé doivent correspondre à ses besoins. Ces prélèvements dépendent aussi de l'humidité disponible dans le sol. Cette humidité fait référence à la quantité d'eau présente dans le sol en fonction de son poids. Elle est essentielle pour maintenir l'activité métabolique des racines du blé et leur permettre de prélever les nutriments nécessaires à leur croissance.

Lorsque l'eau présente dans le sol ne couvre pas les besoins de la céréale au cours de son cycle de croissance (avec des phases de croissance plus intenses où les besoins en eau sont plus élevés), le blé peut souffrir de stress hydrique et se trouve contraint de puiser dans les réserves en eau du sol pour subvenir à ses besoins. Cela se traduit par une diminution de la teneur en eau du sol, mesurée par l'humidité pondérale du sol. Ainsi, plus le sol est sec (cas de 1^{ère} année), plus le blé doit puiser dans les réserves en eau pour satisfaire ses besoins, cela peut affecter la croissance et le développement des plantes, en réduisant leur capacité à absorber les nutriments et à se développer correctement, ce qui peut avoir des répercussions négatives sur sa croissance, sa production de biomasse, son rendement et sa qualité.

En revanche, lorsque le sol est bien humidifié (cas de la 2^{ème} et la 3^{ème} année), le blé peut puiser facilement l'eau dont il a besoin et maintenir une croissance optimale.

Par conséquent, pour optimiser le rendement du blé, il est important de surveiller régulièrement l'humidité du sol pour ajuster les pratiques de gestion de l'eau et de l'azote en fonction des besoins de la culture à différents stades de son cycle de croissance.

En ce qui concerne l'évolution de l'azote minéral dans le sol, des différences significatives ont été observées entre les traitements et les années, ainsi qu'entre les stades de la culture. Les années humides ont généralement présenté des quantités plus élevées d'azote minéral par rapport à l'année sèche. Les traitements bien fertilisés ont également montré des teneurs en azote supérieures en fin de cycle. Les pluies insuffisantes (1^{ère} année) ont entraîné une réduction de l'apport en eau dans le sol, ce qui a limité la minéralisation de l'azote et sa disponibilité pour la plante.

L'humidité du sol et la température sont des facteurs clés qui influencent l'évolution de l'azote minéral dans le sol, et par conséquent la nutrition du blé.

L'humidité du sol est importante, car elle influence la croissance des racines du blé et la capacité des racines à absorber les nutriments du sol. En effet, une humidité insuffisante peut limiter l'absorption des nutriments, y compris de l'azote, ce qui peut avoir un impact négatif sur le rendement du blé.

La température est également importante, car elle influence les processus biologiques qui régulent la transformation de l'azote organique en azote minéral. En effet, les micro-organismes responsables de la transformation de l'azote organique en azote minéral sont plus actifs à des températures plus élevées, ce qui peut accélérer la libération de l'azote minéral dans le sol. Toutefois, si la température est trop élevée, cela peut également entraîner une perte d'azote par volatilisation ou par lessivage dans le sol.

Si la disponibilité d'azote minéral est limitée en raison d'une faible humidité du sol ou d'une température trop basse pour permettre une transformation suffisante de l'azote organique en azote minéral, cela peut entraîner une croissance lente ou une réduction du rendement du blé. En revanche, si l'azote minéral est disponible en quantité suffisante, cela peut favoriser une croissance rapide et saine du blé, conduisant à un rendement élevé.

Ainsi, la relation entre l'humidité du sol, la température, l'évolution de l'azote minérale et la nutrition du blé est complexe et interdépendante. Une compréhension adéquate de ces facteurs est essentielle pour maximiser le rendement du blé et améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote dans les cultures de blé.

3.3. Analyse de la croissance du blé.

3.3.1. Production de matière sèche.

3.3.1.1. Région de Constantine.

3.3.1.1.1. Effet du facteur traitement sur l'évolution de la matière sèche aux différents stades de la culture.

Au stade début montaison, les différences entre les traitements sont très hautement significatives ($P < 0.0001$) (tableau 5 en annexes), le test de Newman et Keuls indique quatre groupes homogènes. L'apport de 200 kg d'engrais/ha a permis la production de MS, pour les trois années, supérieure à celle obtenue par les autres traitements.

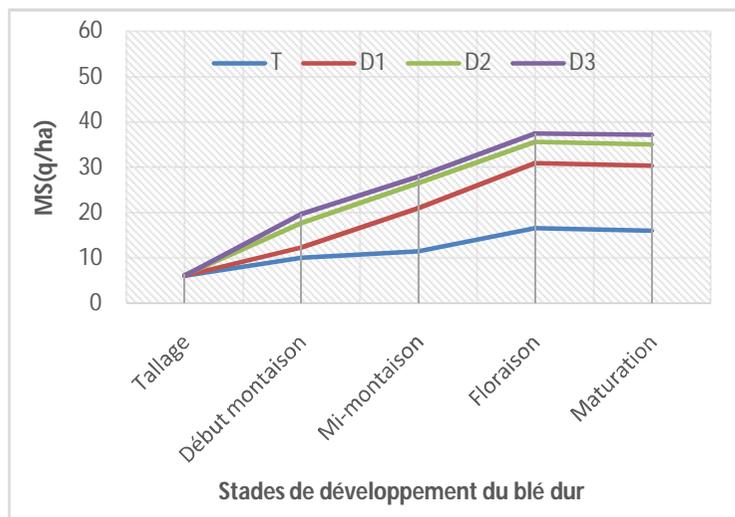
À la mi-montaison, la différence entre les traitements est nettement plus marquée chez le traitement D3 avec 37.83 q/ha (2^{ème} année), 34.43 q/ha (3^{ème} année), et 27.92 q/ha (1^{ère} année). À ce stade, la production de la matière sèche est plus importante avec un effet plus prononcé, pour les différentes doses.

À la floraison, il apparait et pour toutes les années une distinction nette entre le témoin et les autres traitements recevant plus d'azote. En d'autres termes, à ce stade où l'essentiel de la production de biomasse a été accompli, l'apport de 150 et 200 kg d'engrais/ha ont permis une augmentation importante de la production de la biomasse.

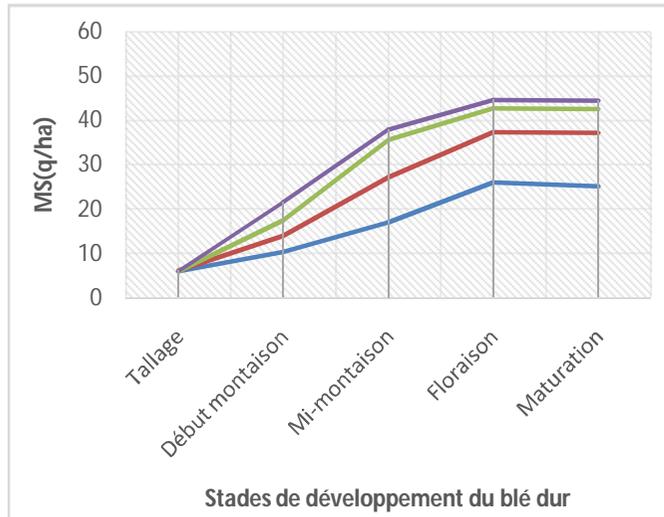
La production totale (paille et grains) de la matière sèche à la maturité est toujours meilleure chez le traitement D3 et pour les trois années.

3.3.1.1.2. Effet du facteur année sur l'évolution de la matière sèche aux différents stades de la culture.

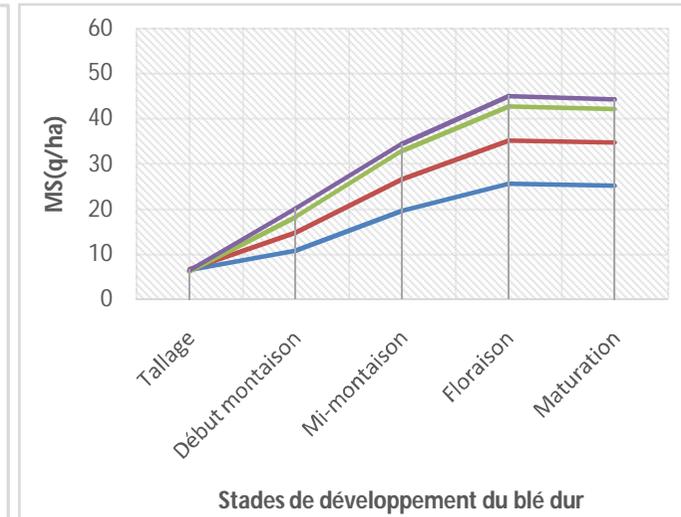
Nos résultats appuyés par une analyse statistique de l'effet moyen année sur la production de la matière sèche (figure19 et tableau 5 en annexes) montrent que les années 2016/17, 2017/18 et 2018/19 diffèrent fortement et montre que les traitements présentent des différences très hautement significatives pour l'expression du paramètre matière sèche pour les différents stades de développement de la culture du blé dur.



1^{ère} année.

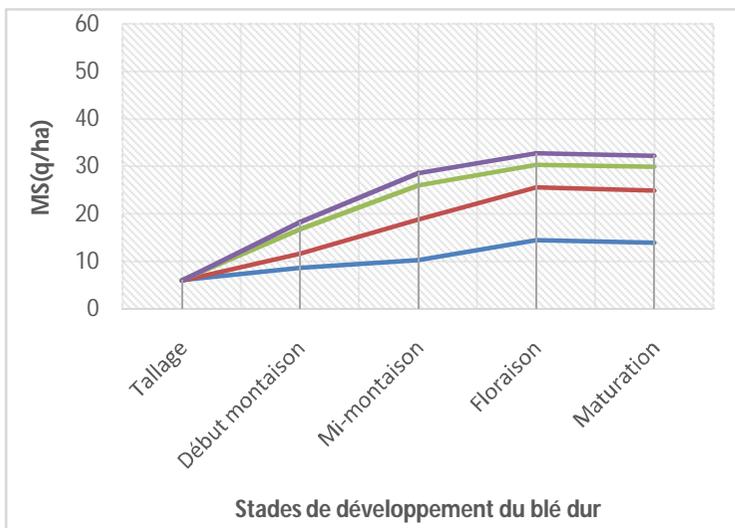


2^{ème} année.

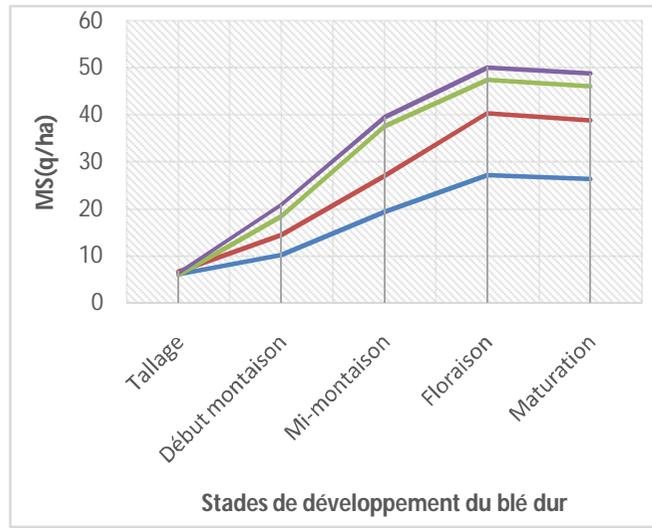


3^{ème} année.

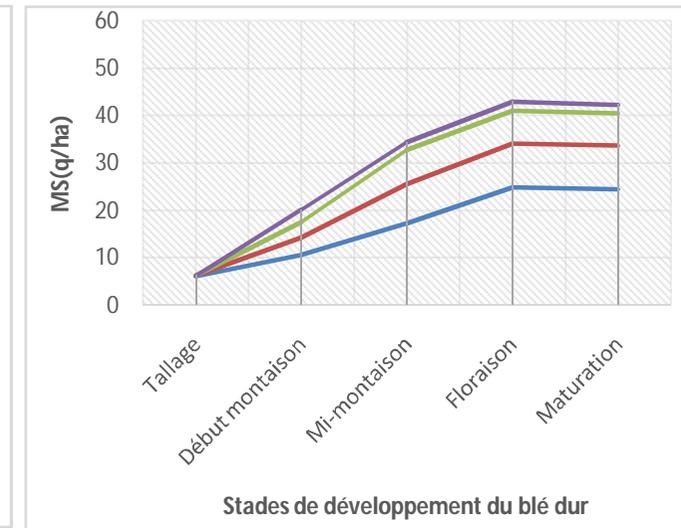
Région de Constantine.



1^{ère} année.



2^{ème} année.



3^{ème} année.

Région de Sétif.

Figure 19. Évolution de la production de la matière sèche aux différents stades de développement du blé dur pour les différents traitements, dans les deux régions d'étude.

À partir du stade mi- montaison, les différences entre les traitements sont très hautement significatives, et le test de Newman-Keuls désigne trois groupes homogènes classant la 2^{ème} année comme meilleure année suivie par la 3^{ème} année et en dernière position l'année 16/17.

3.3.1.2. Région de Sétif.

3.3.1.2.1. Effet du facteur traitement sur l'évolution de la matière sèche aux différents stades de la culture.

L'analyse statistique de l'effet moyen traitement (tableau 6 en annexes) montre que la production moyenne de la MS est significative ($P < 0.001$) (stade tallage) à très hautement significatives pour tous les stades de la culture ($P < 0.0001$), La quantité de la MS moyenne produite chez la dose D3 présente les meilleures valeurs et cela pour les différents stades et pour les trois années par rapport aux autres traitements. (Figure 19).

3.3.1.2.2. Effet du facteur année sur l'évolution de la matière sèche aux différents stades de la culture.

La 2^{ème} année a enregistré des valeurs de matière sèche allant de 6q/ha (stade tallage) à 40.01 q/ha (stade maturité) par rapport aux autres années 3^{ème} et 1^{ère} année qui présentent des valeurs respectives allant de 6.21 q/ha, 6.06 q/ha (stade tallage) à 35.25 q/ha et 25.33 q/ha (stade maturité).

Discussion.

La matière sèche est une mesure utilisée pour évaluer la quantité de substances solides présentes dans un échantillon après élimination de toute l'eau.

D'une façon générale, la production de la matière sèche suit une allure similaire le long du cycle, pour toutes les années et pour les deux régions (Constantine et Sétif), avec une production maximale entre le stade début montaison et la floraison. Cette allure générale montre que l'effet de l'azote ne se manifeste pas sur la tendance du phénomène d'accumulation de matière sèche, mais agit sur la quantité de matière sèche produite. Aussi, la disposition des courbes de différents traitements montre que l'azote agit sur la quantité de matière sèche accumulée et donc sur le niveau de production.

L'évolution de la production de la matière sèche pour les deux régions d'étude selon les différents stades peut être épiloguée comme suit :

L'absence d'effet significatif au niveau de la région de Constantine, pour le stade tallage s'explique par l'homogénéité du milieu évoqué lors de la caractérisation du milieu en matière d'azote minéral initial.

Au stade début montaison, la production de matière sèche est plus importante pour la D3, pour les trois années par rapport aux autres traitements. Nos résultats vont avec ceux de

Obulbigal et Kaboré-Zoungana (2007) qui ont montré que pour un témoin non fertilisé et par rapport à des doses croissantes d'azote apportées, la biomasse aérienne au stade épi 1 cm est augmentée de manière significative, ils attribuent ce résultat à la fourniture d'azote par le sol qui n'est pas suffisante pour satisfaire les besoins précoces du blé.

À ce stade, la production de la matière sèche est plus importante avec un effet plus prononcé, pour les différentes doses, cela est le résultat du deuxième apport (stade début montaison).

À la mi-montaison, la production de la matière sèche est très importante, pour les trois années, cela est le résultat du deuxième apport (stade début montaison).

À la floraison et pour les deux régions, la production de la matière sèche est nettement distincte entre le témoin et les autres traitements recevant des doses croissantes d'azote. Autrement dit qu'au stade floraison l'essentiel de la production de biomasse a été accompli, l'apport de 150 et 200 kg d'engrais/ha ont permis une augmentation importante de la production de la biomasse. Ainsi, Woledge (1978) in Lemaire et al. (1984), ont confirmé que ce stade est caractérisé par une augmentation de la vitesse de croissance, phase qui s'accompagne en outre d'une augmentation des capacités photosynthétiques du végétal.

La production totale (paille et grains) de la matière sèche à la maturité est toujours meilleure chez le traitement D3 et pour les trois années.

D'une façon générale, l'azote a agi sur le niveau de production de matière sèche, et ce, en agissant sur la matière sèche des grains et de la paille. Les traitements ayant reçu 100 kg d'engrais/ha ou plus ont permis d'obtenir des niveaux de production plus élevés. L'azote agit directement sur la paille en favorisant la croissance du feuillage. Par contre le remplissage des grains est influencé de manière indirecte par l'azote et est affecté par d'autres facteurs, en particulier les conditions climatiques durant le remplissage des grains.

Dans leurs travaux, Rao et al. (2006) ont montré que l'augmentation de la dose d'azote entraîne une augmentation significative de l'accumulation de matière sèche et d'azote dans les parties aériennes de la plante.

Ainsi Lemaire et al. (1984), dans leurs travaux ont montré qu'en condition d'offre en azote non limitant, la plante permet d'exprimer les besoins instantanés d'azote par kg de matière sèche élaborée, tout en impliquant un amortissement progressif des besoins en azote au cours de la croissance pour l'élaboration de la matière sèche. Ceci se traduit, au niveau de la plante, par une « dilution » de l'azote par la matière sèche élaborée. Cet amortissement des besoins en azote de la plante par rapport à sa croissance peut s'expliquer de 2 manières :

- D'une part, en début de croissance, elle est assurée principalement par la morphogenèse et l'élongation de nouveaux organes ; cette phase nécessite essentiellement des protéines, les besoins en azote par kg de matière sèche élaborée sont alors élevés. Le déploiement de ces organes va permettre une augmentation de la masse de carbone fixée conduisant à la différenciation des tissus et une augmentation rapide de leur poids par unité de surface (Gillet et al., 1984 in Lemaire et al. 1984).
- D'autre part, les feuilles ayant une durée de vie relativement courte (Gillet, 1980 in Lemaire et al. 1984), il existe des mécanismes de recyclage des protéines à partir des feuilles sénescentes, permettant à la plante de continuer à fabriquer de nouvelles générations de feuilles (Thomas et Stoddart, 1980 Lemaire et al. 1984).

Les 3 années diffèrent fortement et montre que les traitements présentent des différences très hautement significatives pour l'expression du paramètre matière sèche pour les différents stades de développement de la culture du blé dur.

D'une manière générale la 2^e et la 3^e année de culture qui sont considérées plus humide, ont présenté les meilleurs rendements de MS pour les différents stades par à la 1^{ère} année qui été moins humide

L'efficacité de cette réponse positive de la culture à la fumure est étroitement liée comme toute culture pluviale aux aléas climatiques et surtout à la répartition spatio-temporelle des pluies. L'augmentation de la biomasse due à la fumure accroît les besoins en eau de la plante et de ce fait, fragilise l'aptitude de la culture à la tolérance à la sécheresse (Boyer, Roberge et Friot, 1985).

Dans le même contexte, Mekhlouf et al. (2005) et Bahlouli et al. (2005a) ont montré que les contraintes abiotiques souvent mises en cause sont les basses températures printanières (gel tardif), la sécheresse (déficit hydrique) et les hautes températures terminales.

Hammer et al (1987) ont confirmé qu'une augmentation de l'apport en azote a entraîné une augmentation de la production de MS, tandis qu'une irrigation régulière a favorisé une meilleure production de MS par rapport à une irrigation limitée. De plus, il a été observé que la remobilisation de la MS des parties aériennes vers les grains était également influencée par ces facteurs.

3.4. Assimilation de l'azote.

3.4.1. Quantités d'azote absorbé par le blé.

3.4.1.1. Région de Constantine.

3.4.1.1.1. Effet du facteur traitement sur l'assimilation et l'absorption de l'azote par le blé.

Pour chacun des traitements, nous avons représenté l'évolution de l'azote absorbé en fonction des stades de développement de la céréale par année de culture.

Les courbes de la quantité moyenne d'azote absorbé par le végétal (figure 20) montrent que ce paramètre augmente avec le développement de la céréale (stade tallage jusqu'au stade floraison) puis il diminue au stade maturité, sauf pour les doses T et D2.

Concernant les quantités moyennes absorbées, comme pour production de MS, l'allure générale n'est pas affectée par l'azote. L'absorption de N est maximale entre le stade montaison et la floraison et baisse au-delà de ce stade, et ce, quelle que soit la dose d'azote absorbée.

L'observation des courbes montre que le niveau de fertilisation azotée agit sur la quantité d'azote prélevée. La différence entre les traitements est plus visible à partir de la mi-montaison, après les périodes de croissance végétatives durant lesquelles les besoins en azote sont élevés.

Les traitements azotés agissent de manière très hautement significative sur la quantité d'azote prélevée à chaque stade.

Au stade tallage, le test de Newman et Keuls (tableau 7 en annexes) classe les différents traitements en 4 groupes homogènes où le groupe A est représenté par D3 (7.48 kg de N/ha) et D2 (7.43 kg de N/ha) et le groupe B englobe D1 (6.04 kg de N/ha) et T (6.04 kg de N/ha).

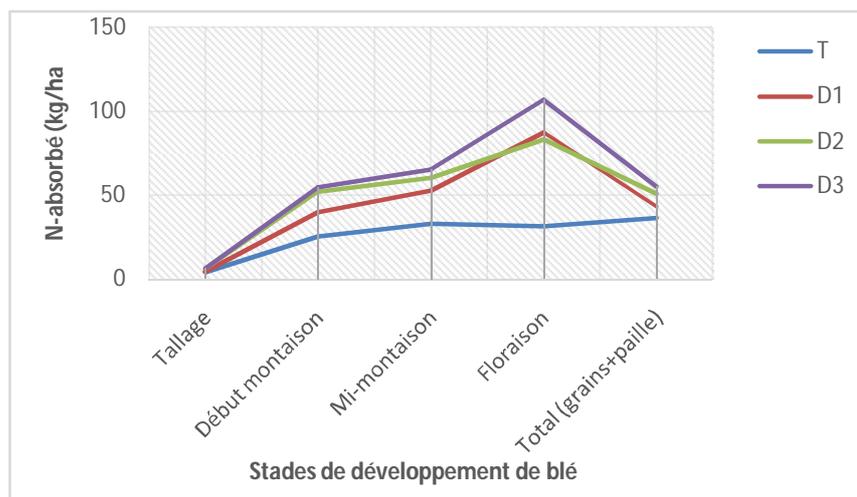
À la montaison, l'effet de l'azote est plus marqué à la mi-montaison que pour le stade début montaison, et ce pour l'ensemble des traitements.

À la floraison l'azote total accumulé est toujours influencé par les traitements azotés avec une absorption de la dose T nettement inférieure aux autres traitements.

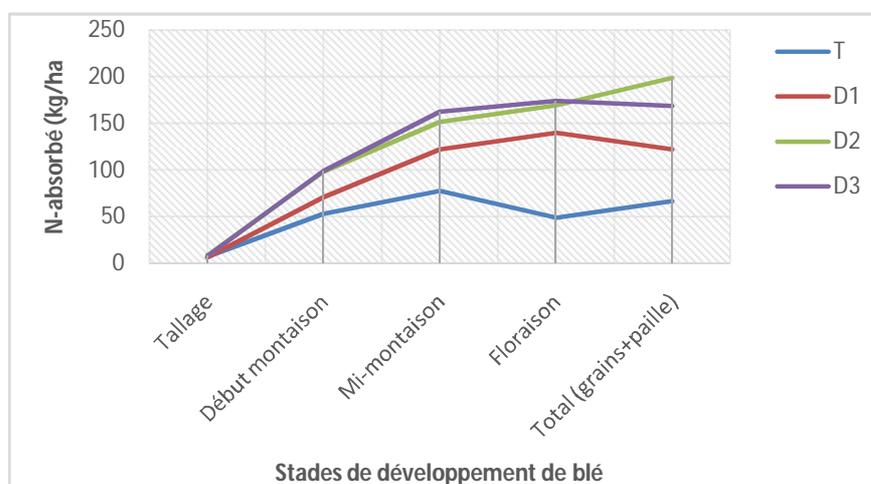
À la maturité, la quantité d'azote absorbé est moins marquée, elle présente une quantité importante, pour la dose D2 suivit par la dose D3 puis la dose D1 et en dernière position la dose T. L'azote absorbé à la maturité est réparti entre la paille et les grains, et pour les deux parties de la plante, l'effet de l'azote a été hautement significatif.

- Au niveau de la paille, la dose T a exprimé une absorption de l'azote de l'ordre de 37.81 kg de N/ha inférieure aux autres traitements D2 (106.03 kg de N/ha), D3(94.47 kg de N/ha) et D1(64.89 kg de N/ha).

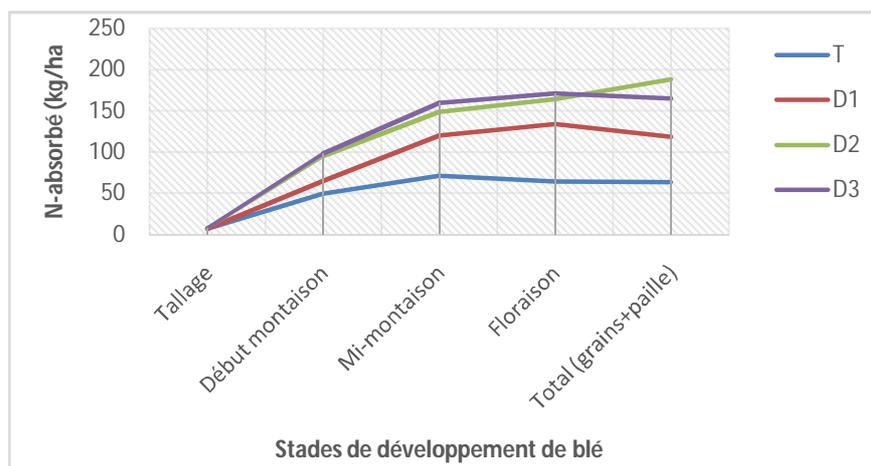
- Pour les grains, les différences entre les traitements sont plus réduites où la dose D2 présente une moyenne d'azote absorbé plus importante 39.94 kg de N/ha suivit par la dose D3 34.907 kg de N/ha et la dose D1 29.48 kg de N/ha par rapport la dose T avec une quantité absorbée d'azote de 17.57 kg de N/ha.



1^{ère} année



2^{ème} année



3^{ème} année.

Figure 20. Courbes de quantité moyenne de l'azote absorbé dans les tissus du végétal, pour les différents stades de développement dans la région de Constantine pour les trois années.

3.4.1.1.2. Effet du facteur année sur l'assimilation et l'absorption de l'azote par le blé.

L'examen de la figure 21 montre qu'en fin de croissance l'ensemble des courbes restent remarquablement parallèles, excepté l'année 2016/2017 qui présente un net fléchissement (avec une quantité d'azote absorbé de 46.24 kg de N/ha (c)) contre une quantité d'azote absorbé de 138.94 kg de N/ha (a) et 133.64 kg de N/ha (b) successivement pour la 2^{ème} année et la 3^{ème} année (tableau 7 en annexes).

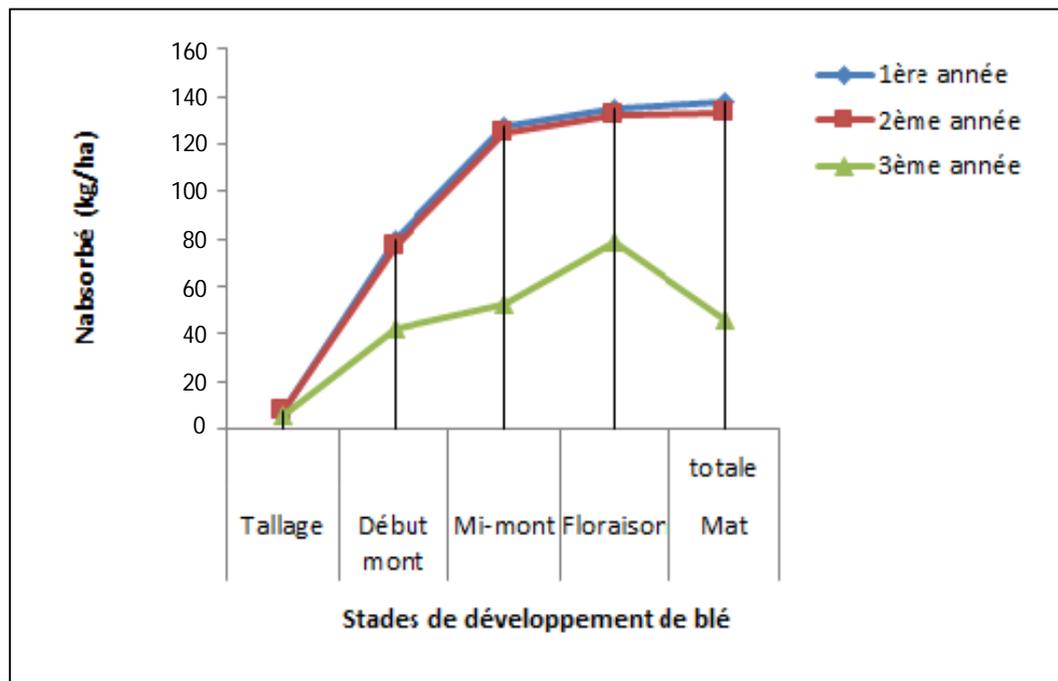


Figure 21. Absorption de l'azote par le blé aux différents stades de développement pour les différentes années (région de Constantine).

3.4.1.2. Région de Sétif.

3.4.1.2.1. Effet du facteur traitement sur l'assimilation et l'absorption de l'azote par le blé.

Nos résultats appuyés par des analyses statistiques et après une analyse de la variance (tableau 8 en annexes) du paramètre quantité d'azote absorbé dans les tissus du végétal décèle un effet facteur traitement très hautement significatif pour tous les stades.

La figure 22 montre que l'assimilation de l'azote par les tissus de la céréale s'accroît avec le développement de cette dernière, autrement dit, l'azote absorbé par la plante augmente au stade tallage jusqu'au stade floraison puis il s'affaiblit au stade maturité, exceptées la dose T et la dose D2.

Le test de Newman et Keuls classe les différents traitements suivant les stades végétatifs comme suit :

Au stade tallage le groupe A est représenté par D2 et D3 et le groupe B avec D1 et le groupe C avec la dose T.

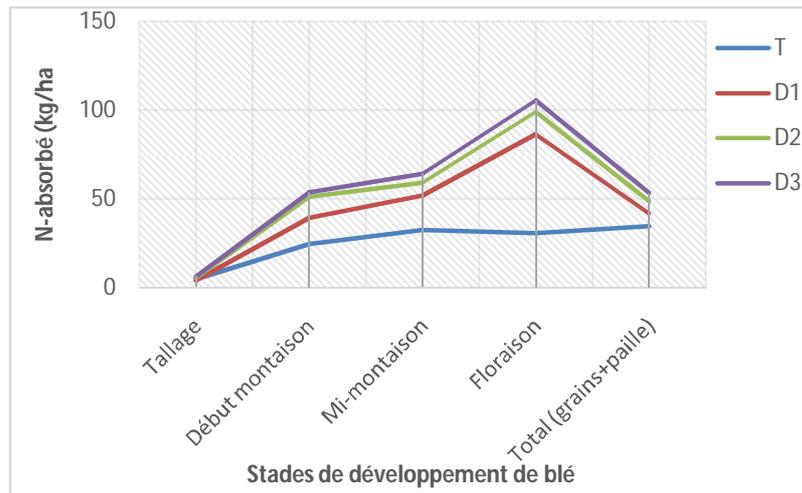
A la montaison, l'effet de l'azote est plus clair à la mi-montaison que pour le stade début montaison, et ce pour l'ensemble des traitements.

À la floraison l'azote accumulé par le végétal est toujours influencé par les traitements azotés avec une absorption importante chez la dose D3 suivi par les doses D2 et D1 puis en dernier lieu la dose T.

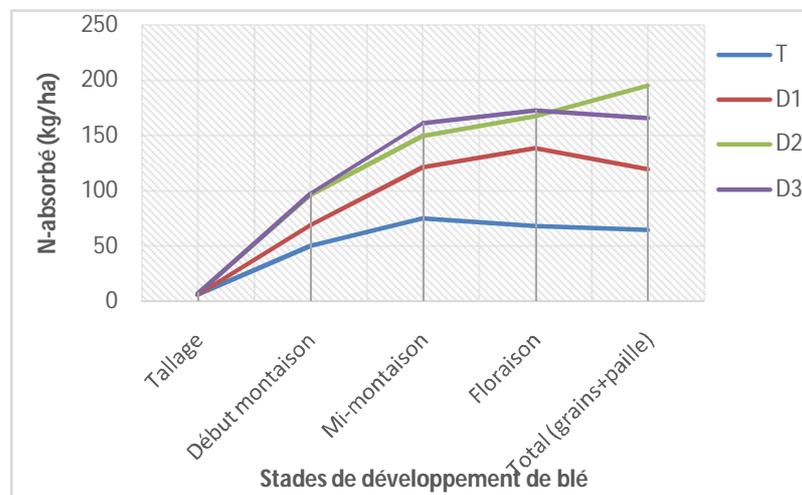
À la maturité, la dose D2 présente une quantité de 143.37 kg de N/ha, la dose D3 127.13 kg de N/ha et D1 et T ont donné des quantités d'azote absorbées de l'ordre de 92.48 kg de N/ha et 54.05 kg de N/ha, successivement.

L'azote absorbé à la maturité est réparti entre la paille et les grains, et pour les deux parties de la plante, l'effet de l'azote a été hautement significatif ($P < 0.001$) (tableau 8 en annexes).

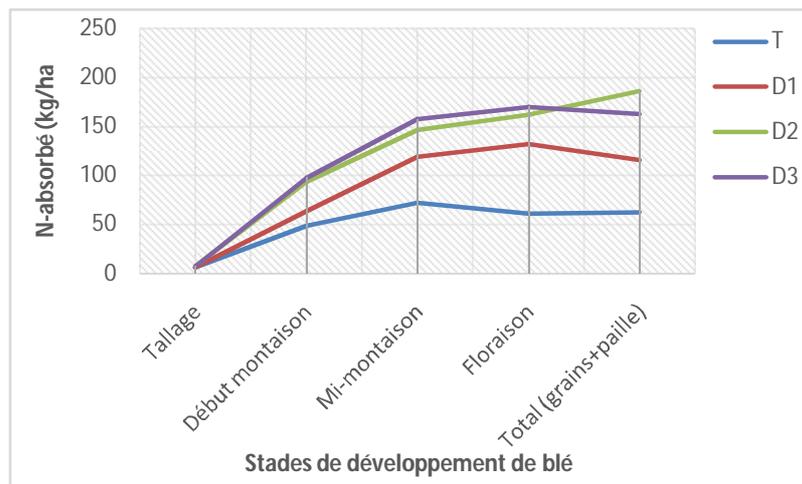
- Au niveau de la paille, la dose D2 a extériorisé une quantité absorbée d'azote par les tissus du végétal plus importante que celles des autres traitements.
- Pour les grains, les différences entre les traitements sont THS ($P < 0.001$) où la dose D2 extériorise toujours une quantité d'azote absorbée plus élevée que les autres traitements.



1^{ère} année.



2^{ème} année.



3^{ème} année.

Figure 22. Courbes de quantité moyenne de l'azote absorbé dans les tissus du végétal, pour les différents stades de développement dans la région de Sétif pour les trois années.

3.4.1.2.2. Effet du facteur année sur l'assimilation et l'absorption de l'azote par le blé.

Le tableau 8 en annexes montre un effet année très hautement significatif ($P < 0.0001$), pour tous les stades végétatifs du blé sur l'absorption et l'assimilation de l'azote au niveau de la plante. Le blé dur a absorbé, pendant tout son cycle végétatif, une quantité d'azote de l'ordre de 138.94 kg de N/ha (a) et 133.64 kg de N/ha (b), respectivement pour les années pluvieuses (2017/2018 et 2018/2019) contre 46.24 kg de N/ha (c) pour l'année sèche (2016/2017). Cette année, contrairement aux autres années a montré qu'en fin de cycle une nette diminution de l'absorption de l'azote (figure 23).

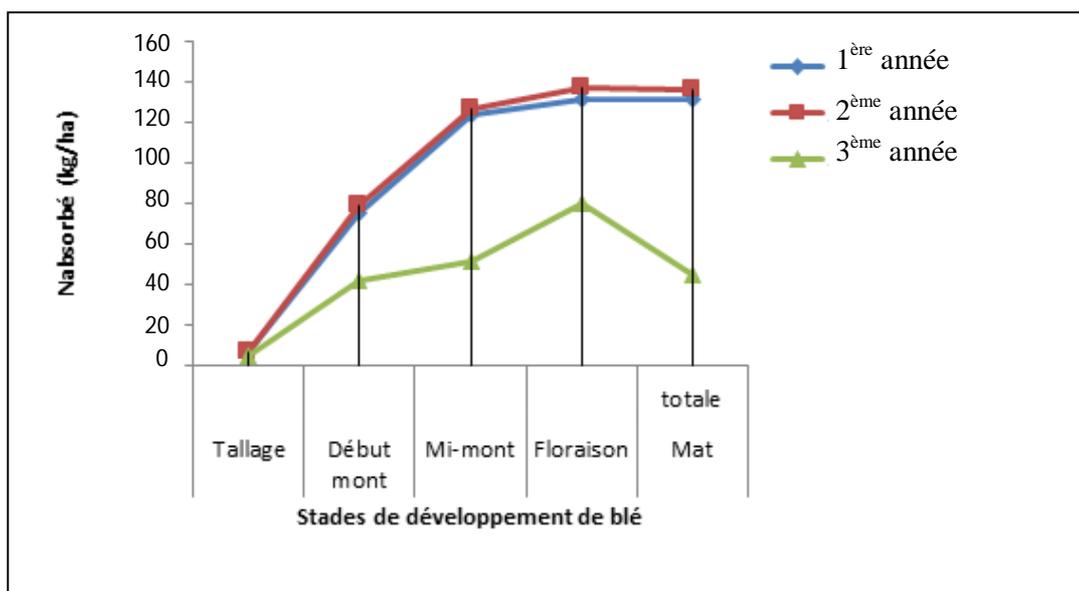


Figure 23. Absorption de l'azote par le blé aux différents stades de développement pour les différentes années (région de Sétif).

Discussion.

L'assimilation et l'absorption de l'azote par le blé sont des processus essentiels pour la croissance et le développement de la plante. L'azote est un élément clé dans la formation des protéines, des acides aminés et d'autres composés nécessaires au métabolisme et à la structure cellulaire.

Pour les deux régions d'étude les quantités d'azote absorbées par les tissus de la céréale, comme pour l'accumulation de la matière sèche, l'allure générale n'est pas affectée par l'azote. L'absorption est maximale entre le début montaison et la floraison et baisse au-delà de ce stade, et ce, quelle que soit la dose d'azote absorbée (exception faite pour le stade floraison et maturité pour T et D2). Ces résultats sont tout à fait cohérents avec ceux obtenus

par (Limaux, 1994) où il a illustré que la cinétique d'absorption de l'azote ou la production de MS est généralement bien représentée par des fonctions de type sigmoïde (Whitmore et Addiscoti, 1987): une première partie de la courbe est de forme exponentielle, elle correspond à une augmentation constante de la vitesse d'absorption (s'il s'agit d'azote absorbé) ou production de MS, la deuxième partie de la courbe correspondant à une diminution de cette vitesse, le point d'inflexion de cette courbe correspondant à la vitesse maximale, ou encore le moment où la vitesse de la production de MS devient nulle.

L'observation des courbes montre que le niveau de fertilisation azotée agit sur la quantité d'azote prélevée. La différence entre les traitements est plus visible à partir de la mi-montaison, après les périodes de croissance végétatives durant lesquelles les besoins en azote sont élevés.

À la montaison, l'effet de l'azote est plus prononcé à la mi-montaison que pour le stade début montaison, pour les deux régions d'étude, ceci est le résultat de l'apport d'azote en début montaison ou de la minéralisation à la sortie de l'hiver, qui a rendu l'azote plus disponible. Par ailleurs, la phase début montaison - mi-montaison constitue une phase de croissance active durant laquelle les besoins en azote sont importants. L'absorption est donc élevée et est favorisée par l'apport d'azote au début montaison.

Au stade maturité, et pour les deux régions, la dose D2 (apport de 150 kg d'engrais/ha) a exprimé les meilleures quantités d'azote absorbées que se soit pour les grains ou pour la paille par rapport aux autres traitements et particulièrement par rapport à la dose D3 (apport de 200 kg d'engrais/ha) malgré la quantité importante d'azote, la plante exprime une faible capacité d'absorption. Ainsi, Remy (1984) précise qu'en cas de faibles capacités d'absorption, la compétition pour l'azote tourne à l'avantage de la microflore du sol au détriment de l'absorption racinaire, les quantités d'azote ainsi organisées ne redevenant éventuellement disponibles qu'après la période d'absorption de la céréale. Par ailleurs, le même auteur a éclairé les raisons qui expliquent les faibles niveaux d'absorption en azote lorsque les biomasses sont réduites :

- La réduction des nitrates dans la plante est le résultat de l'activité d'un enzyme, la nitrate réductase, dont l'action est une fonction linéaire de la concentration, avec saturation, une fois un certain seuil atteint.
- Cette activité de la nitrate réductase est donc liée à la présence de nitrate, mais également aux possibilités de les transformer en azote protéique, l'énergie nécessaire à cette transformation étant fourni par la photosynthèse et selon Lorot (1982) in Recous (1987), à chaque stade de développement de la plante, un équilibre synthèse protéique

- photosynthèse doit être respecté. Donc la capacité d'absorption des nitrates par le système racinaire est fonction de l'état de croissance de la plante et en particulier les organes qui assurent la photosynthèse, c'est-à-dire les parties aériennes (Limaux, 1994).

Yang et al. (2017) ont rapporté que l'absorption d'azote par le blé augmente avec l'augmentation des doses d'azote appliquées. Cependant, il existe une relation non linéaire entre le taux d'absorption d'azote et les doses d'azote, indiquant que l'efficacité d'utilisation de l'azote diminue avec l'augmentation des doses.

Une métaanalyse faite par Garcia-Mina et al. (2019) qui ont compilé et analysé les données de plusieurs études portant sur l'effet de différentes doses de fertilisation azotée sur les paramètres d'utilisation de l'azote tel que l'absorption d'azote, production de MS et le rendement du blé. Les résultats de cette métaanalyse ont montré que l'augmentation de la dose de fertilisation azotée conduit généralement à une augmentation de l'absorption d'azote par le blé. Cependant, il a été observé que l'efficacité d'utilisation de l'azote, mesurée par le rendement du blé par unité d'azote appliquée, diminue avec l'augmentation des doses d'azote.

L'amélioration de la nutrition azotée du blé s'accompagne d'un accroissement des prélèvements (Mhiri, 2002)

Les quantités maximales absorbées augmentent avec la dose apportée ainsi que les quantités provenant apparemment de l'engrais (Limaux, 1994).

De leurs parts Laclau et al. (2000) ; Safou-Matondo et al. (2005) ont montré que l'azote contenu dans les tissus des végétaux représente approximativement la quantité d'azote prélevée par la plante dans le milieu.

Ainsi Debake et al. (1995) ont indiqué que l'azote des grains provient en grande partie de la remobilisation et est donc indirectement influencé par la disponibilité de l'azote dans le sol.

Ils argumentent que lorsque l'assimilation nette de N est faible au cours du remplissage, la contribution des réserves au poids du grain est plus forte. Ce processus contribue au maintien d'un indice de récolte minimum et d'un poids de 1 000 grains proche du potentiel pour les conditions de très faible assimilation en postfloraison.

À leur tour Mosseddaq et Mogli (1999) ont indiqué que durant le stade semis-stade début tallage, l'absorption de l'azote est faible et dépend des conditions de l'environnement et du niveau de la fertilité du sol. À partir du début tallage, les besoins augmentent. Le stade montaison-floraison est une phase à grand besoin du fait de l'existence d'une certaine

compétition entre la croissance reproductive (élaboration des composantes de l'épi) et la croissance végétative (production de matière sèche). La quantité d'azote absorbée avant la floraison représente selon Mosadaq et Mogli (1999) de 70 % à 80 % de l'azote total assimilé.

À la fin de cycle de croissance de la céréale, l'année 2016/2017 se distingue par un ralentissement dans l'absorption d'azote par le blé, contrairement aux années 2017/2018 et 2018/2019 où cette absorption est restée constante. Cette diminution peut être expliquée par la faible quantité d'azote absorbée au cours de cette année, ce phénomène pouvant être attribué à une sécheresse exceptionnelle pendant la saison printanière. En effet, les mois de mars, avril et mai ont enregistré respectivement des précipitations de 0,1 mm, 25,6 mm et 6,4 mm à Constantine, et de 0 mm, 5,90 mm et 9,20 mm à Sétif.

L'année pluvieuse a accru l'absorption de N qu'il convient d'attribuer :

- Soit à une plus intense minéralisation de N du sol,
- Soit à une meilleure utilisation de l'offre du sol en azote minéral ;
- Soit à la combinaison de ces divers processus, ces résultats sont conformes à ceux de Triboi et al. (1985)
- Disponibilité de l'eau qui stimule à la fois l'activité biologique du sol et la croissance du végétal, par conséquent, une grande efficacité d'absorption de N

De même Campbell et al. (1993) a assuré que l'humidité du sol a une grande influence sur la disponibilité de l'azote, son mouvement dans le sol et son absorption par les plantes.

Dans leurs travaux, Wang et al. (2019) ont constaté que l'augmentation des doses d'azote augmentait l'absorption d'azote par le blé, mais cette augmentation était plus prononcée dans les conditions de sol humide que dans les conditions de sol sec.

AFSSA (2003) a indiqué que pour l'absorption des éléments nutritifs par les racines et le métabolisme de la plante, la pluviométrie ou l'irrigation est essentielle pour la fertilisation azotée.

Ainsi Meynard et al., (1981) affirment que les conditions d'implantation du système racinaire peuvent rendre compte de variations importantes dans les quantités d'azote absorbé pour un même niveau de production.

Par contre, Moll et al. (1987) ont confirmé que la capacité de l'absorption de l'azote est liée directement aux variétés.

De même, Anderson et al. (1984a) ont montré que les génotypes les plus prolifiques ont la capacité d'accumuler plus d'azote et de remobiliser des quantités importantes de cet élément vers le grain. Ainsi, Ains, Alagarwamy et Seetharma (1983) suggèrent que la sélection de variétés de sorgho axée sur la production de matière sèche et un indice de récolte élevé peut

permettre une meilleure absorption et une utilisation plus efficace de l'azote par la culture, en particulier pour la formation de grains. Cela peut conduire à de meilleurs rendements en grains de sorgho.

Généralement les quantités prélevées d'azote sont supérieures aux quantités apportées quelque soit la richesse initiale du sol en cet élément. La différence entre les apports et les exportations correspond à la contribution du sol. Néanmoins, les quantités fournies par le sol sont réduites sous les conditions d'apport de la forte dose de N.

Pour mieux comprendre la relation qui existe entre l'azote assimilé par le végétal et l'azote minéral en fonction des doses d'azote appliquées fractionnées en trois apports à différents stades de développement du blé, nous avons tracé des courbes représentées dans les figures 21, 22 et 23 (région de Constantine) et 24, 25 et 26 (région de Sétif), successivement pour la 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} année d'étude.

En ce qui concerne l'azote assimilé par le végétal, nous avons observé :

- Pour la dose T, une augmentation de l'azote absorbé par les tissus des feuilles du blé jusqu'au stade de la montaison puis diminue au stade de la floraison peut s'expliquer par la réponse spécifique du blé à la disponibilité en azote et à la dose appliquée. Pendant le stade de floraison, le blé a une capacité limitée à absorber l'azote, ce qui peut être dû à une régulation de la croissance et de l'allocation des ressources pendant cette phase critique de reproduction.
- Pour les doses croissantes d'azote (100 kg d'engrais/ha, 150 kg d'engrais/ha et 200 kg d'engrais/ha), une augmentation de l'azote absorbé par les tissus des feuilles du blé à tous les stades de développement, y compris au stade de floraison. Cela suggère que des niveaux plus élevés d'azote disponible dans le sol favorisent une meilleure absorption et utilisation de l'azote par le blé, même au stade de floraison. Des doses plus élevées d'azote peuvent fournir un approvisionnement suffisant en nutriments pour soutenir la croissance des feuilles et favoriser une assimilation plus élevée de l'azote à mesure que la plante se développe et produit des épis.

En ce qui concerne l'azote minéral dans le sol, nous avons observé :

- Une diminution de l'azote minéral avec les stades de croissance du blé qui peut s'expliquer par plusieurs facteurs :
 1. Absorption accrue de l'azote : Au fur et à mesure que le blé se développe, ses racines sont capables d'absorber davantage d'azote minéral du sol. Par conséquent, une partie de l'azote minéral disponible est utilisée par le blé pour sa croissance et son développement, ce qui réduit sa concentration dans le sol.

2. Conversion de l'azote minéral en composés organiques : Le blé utilise l'azote minéral absorbé pour synthétiser des composés organiques tels que les protéines, les acides aminés et les enzymes. Ces composés organiques sont essentiels pour la croissance et le fonctionnement des tissus végétaux. Ainsi, une partie de l'azote minéral disponible est convertie en azote organique, ce qui réduit la concentration d'azote minéral dans le sol.
- Translocation de l'azote vers les parties aériennes : À mesure que le blé se développe, une partie de l'azote absorbé est transloqué vers les parties aériennes de la plante, notamment les feuilles, les tiges et les épis. Cette translocation de l'azote contribue à l'accumulation de biomasse végétale et à la croissance des organes reproducteurs. Ainsi, une partie de l'azote minéral disponible est redistribuée dans la plante, ce qui réduit sa concentration dans le sol.
- Une augmentation de l'azote minéral au stade de floraison pour la dose 150 kg d'engrais/ha durant la 3^{ème} année de culture, dans la région de Constantine, peut indiquer une utilisation plus efficace de l'azote disponible par le blé à mesure que les stades de développement progressent.

Concernant les ratios d'azote sol/azote absorbé et d'azote végétal/biomasse.

Les ratios N-sol/N-absorbé et N-végétal/biomasse restent constants avec le développement des stades de la culture du blé, cela peut indiquer une certaine stabilité dans l'utilisation de l'azote par la plante tout au long de son cycle de croissance. Cela pourrait être le résultat d'une bonne efficacité d'utilisation de l'azote et d'une régulation adéquate des processus d'absorption, d'assimilation et d'allocation de l'azote dans la plante (figure 24, 25, 26, 27,28 et 29).

Plusieurs facteurs peuvent contribuer à cette stabilité des ratios :

1. Capacité d'absorption d'azote : Le système racinaire du blé a une capacité relativement constante d'absorber l'azote du sol tout au long de son cycle de croissance. Cette capacité est généralement suffisante pour répondre aux besoins en azote de la plante, ce qui maintient les ratios stables.
2. Mécanismes de régulation interne : Les plantes ont des mécanismes internes de régulation de l'absorption, de l'assimilation et de l'allocation de l'azote. Ces mécanismes permettent à la plante de maintenir une certaine stabilité dans l'utilisation de l'azote, en ajustant les taux d'absorption et d'allocation en fonction des besoins de croissance et des conditions environnementales.

3. Interaction avec d'autres nutriments : Les ratios N-sol/N-absorbé et N-végétal/biomasse peuvent également être influencés par les interactions avec d'autres éléments nutritifs essentiels, tels que le phosphore, le potassium et les micronutriments. Si ces interactions sont équilibrées et stables, cela peut contribuer à maintenir les ratios constants.

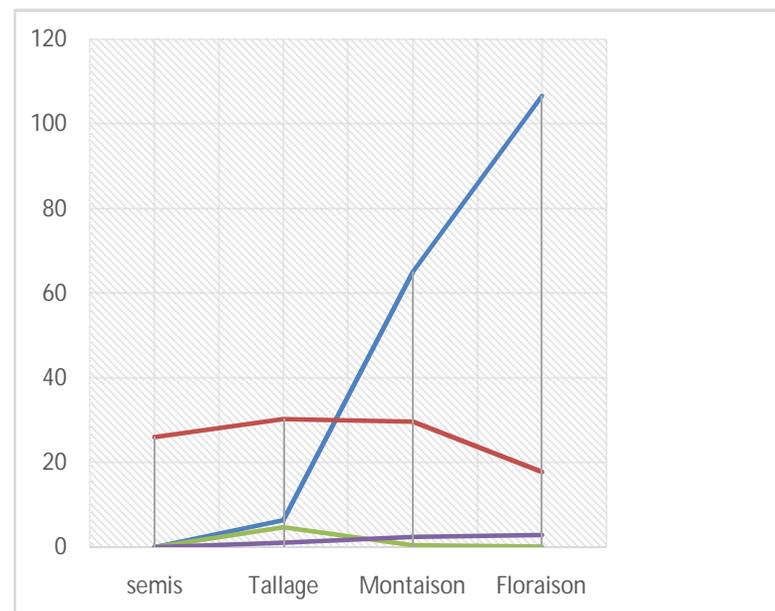
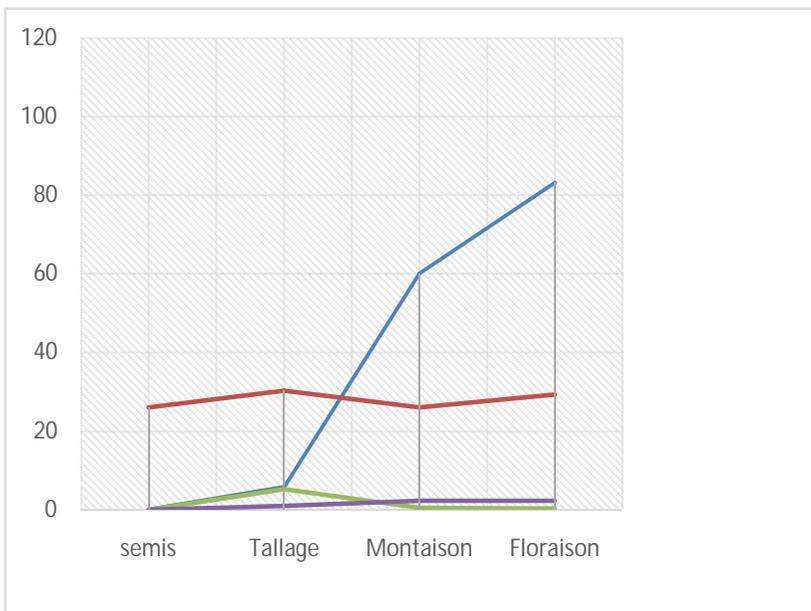
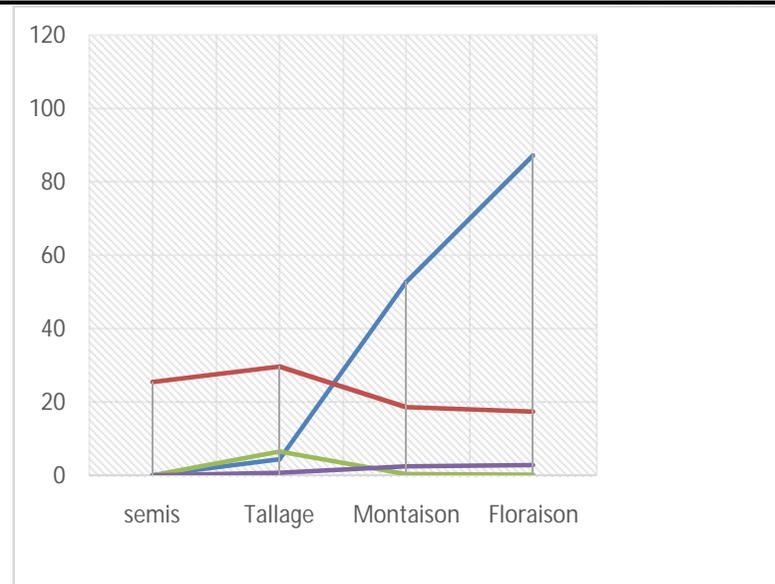
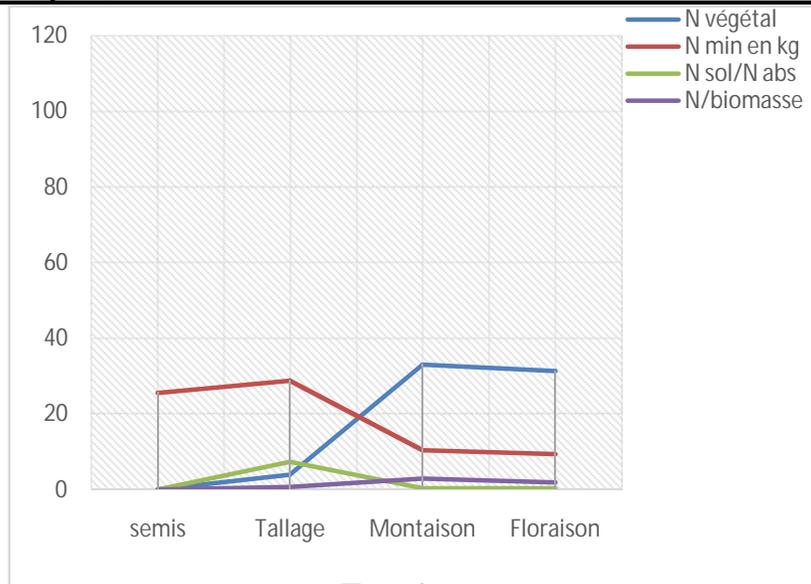


Figure 24. L'azote dans le végétal et le sol pour les différents traitements, dans la région de Constantine (1^{ère} année)

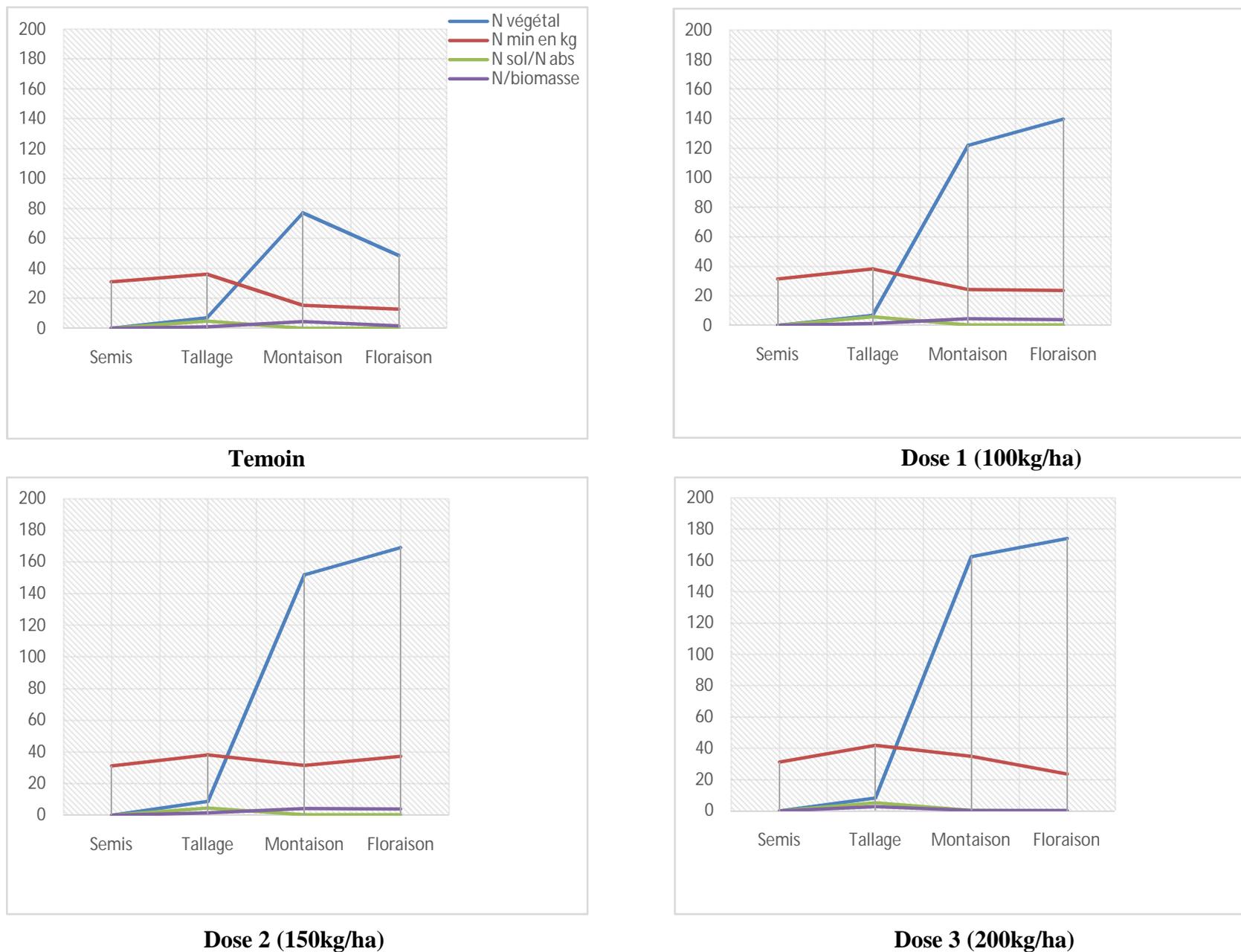
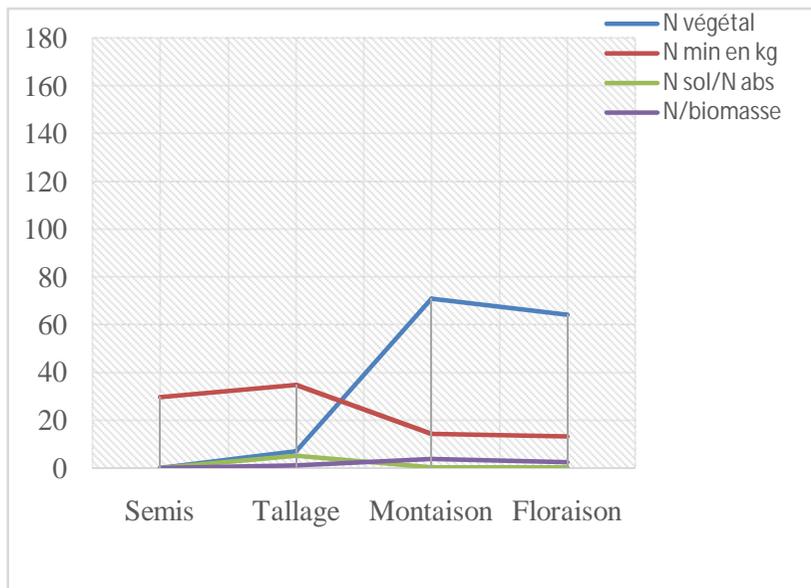
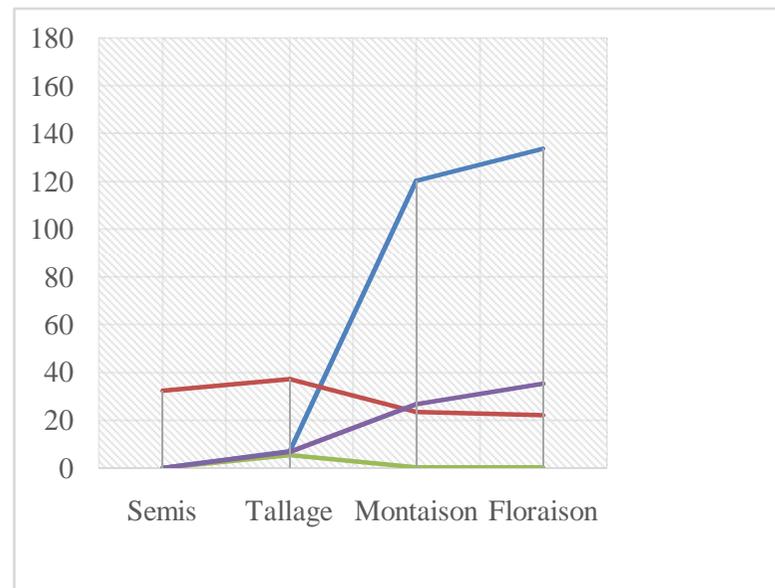


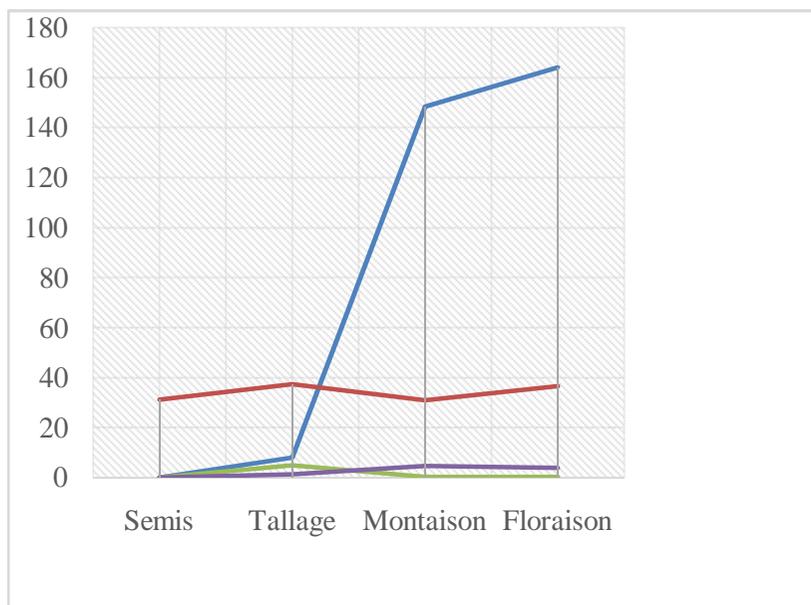
Figure 25. L'azote dans le végétal et le sol pour les différents traitements, dans la région de Constantine (2^{ème} année)



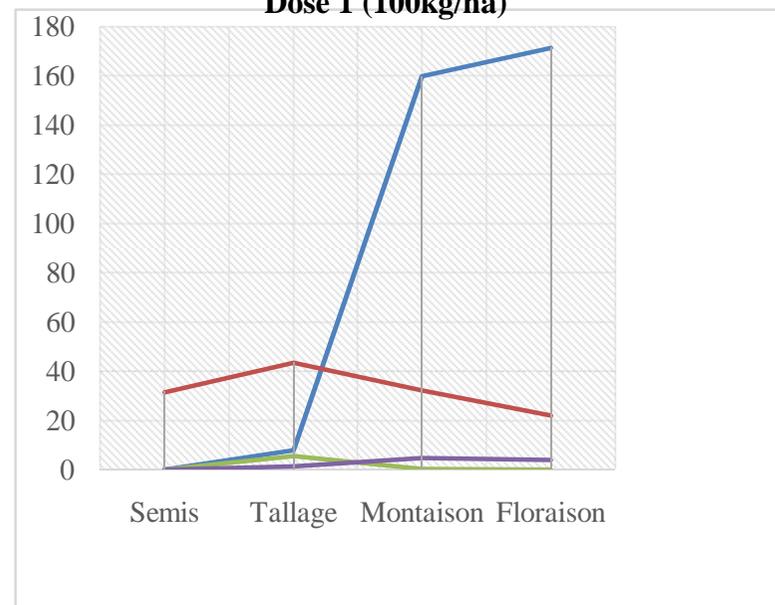
Temoin



Dose 1 (100kg/ha)



Dose 2 (150kg/ha)

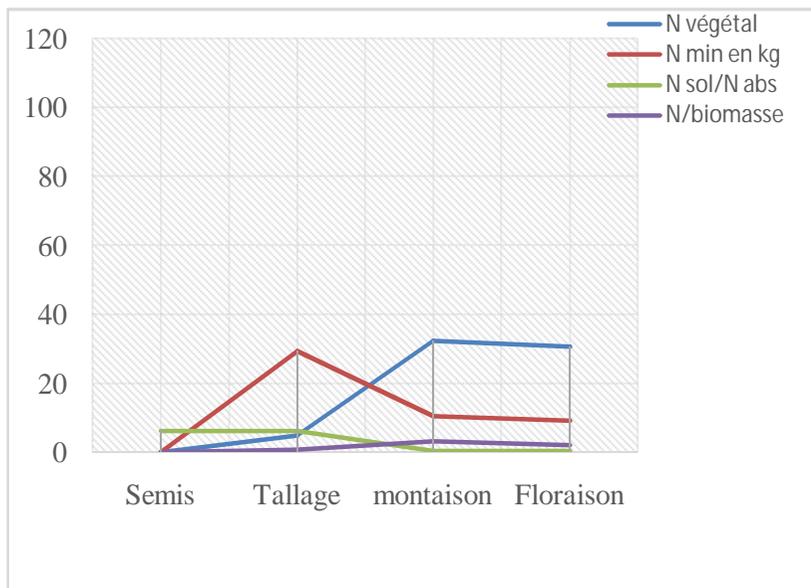


Dose 3 (200kg/ha)

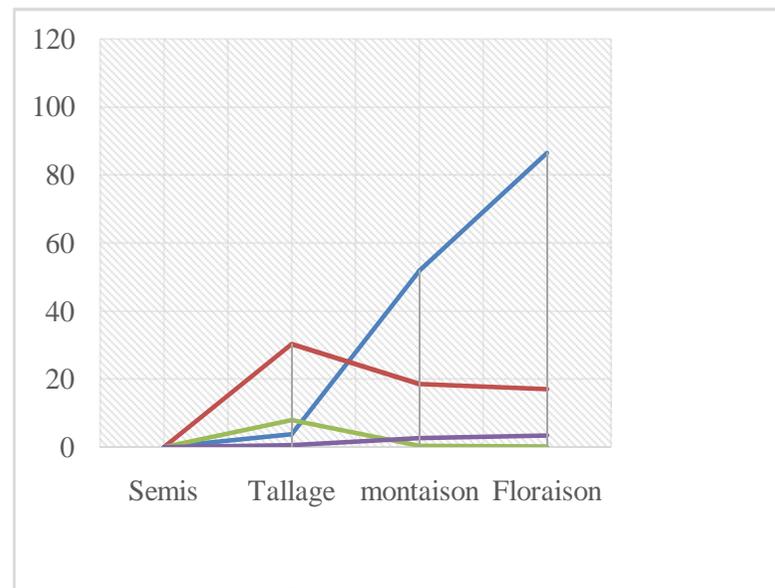
Figure 26. L'azote dans le végétal et le sol pour les différents traitements, dans la région de Constantine (3^{ème} année)

À partir du stade montaison, nous avons observé aussi une augmentation du ratio azote végétal/biomasse pour la dose T, 2^{ème} année. Il représente la quantité d'azote accumulée dans la biomasse végétale par rapport à la biomasse totale de la plante. Ce ratio élevé indique une concentration relativement élevée d'azote dans la plante par rapport à sa biomasse, ce qui peut être le signe d'une bonne nutrition en azote et d'une efficacité dans l'utilisation de cet élément.

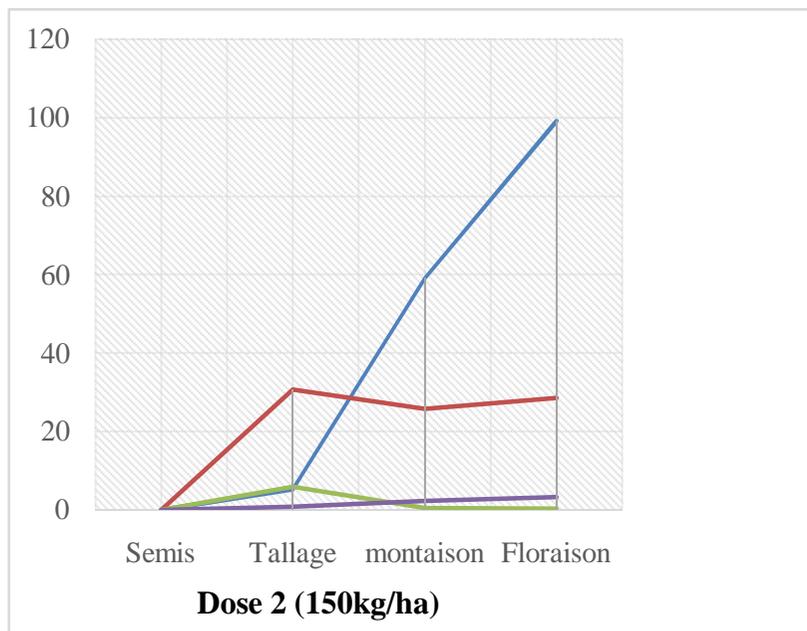
Il est important de noter que la relation entre l'assimilation de l'azote par les feuilles et les stades de développement du blé ainsi que la minéralisation de l'azote peuvent être influencée par plusieurs facteurs, tels que les conditions environnementales, la disponibilité d'eau et de nutriments et cela, ça se voit nettement dans la 1^{ère} année et celles humides (2^{ème} et 3^{ème} année) pour les deux régions Constantine et Sétif.



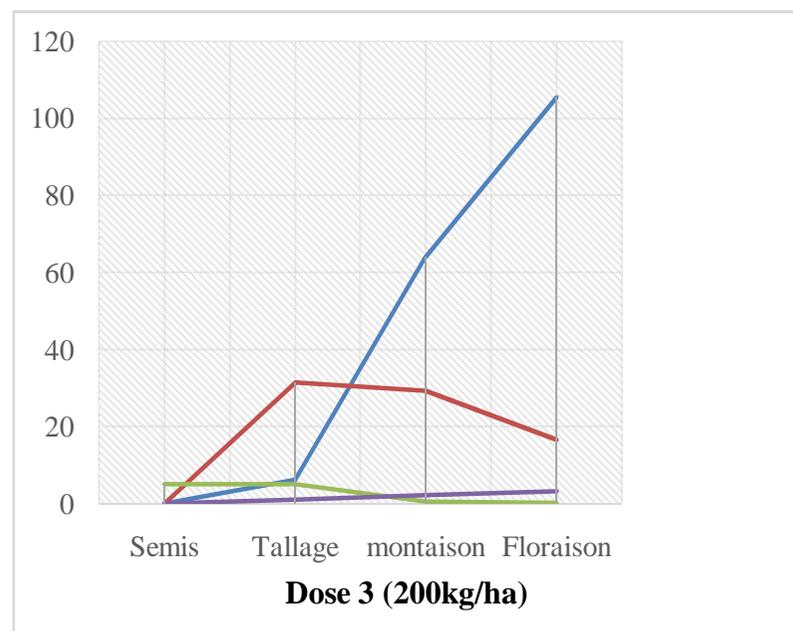
Temoin



Dose 1 (100kg/ha)



Dose 2 (150kg/ha)



Dose 3 (200kg/ha)

Figure 26. L'azote dans le végétal et le sol pour les différents traitements, dans la région de Sétif (1^{ère} année)

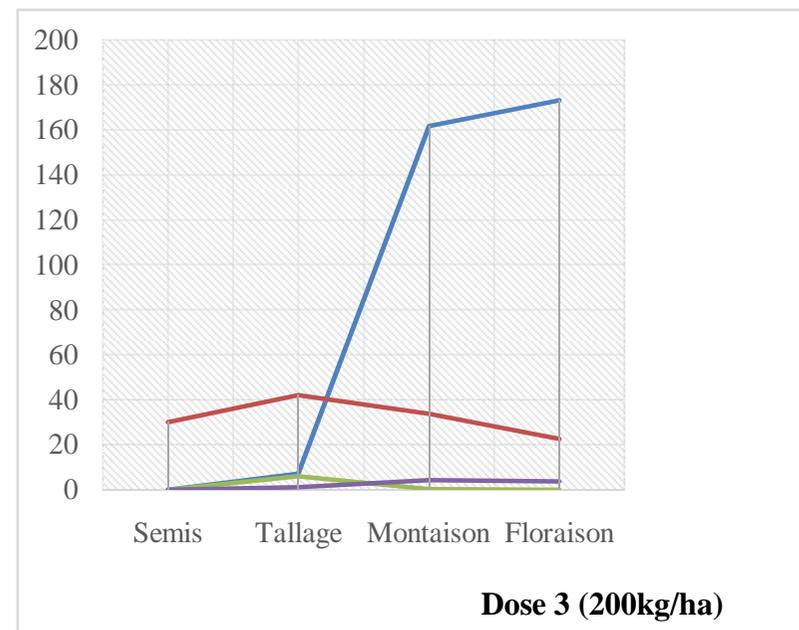
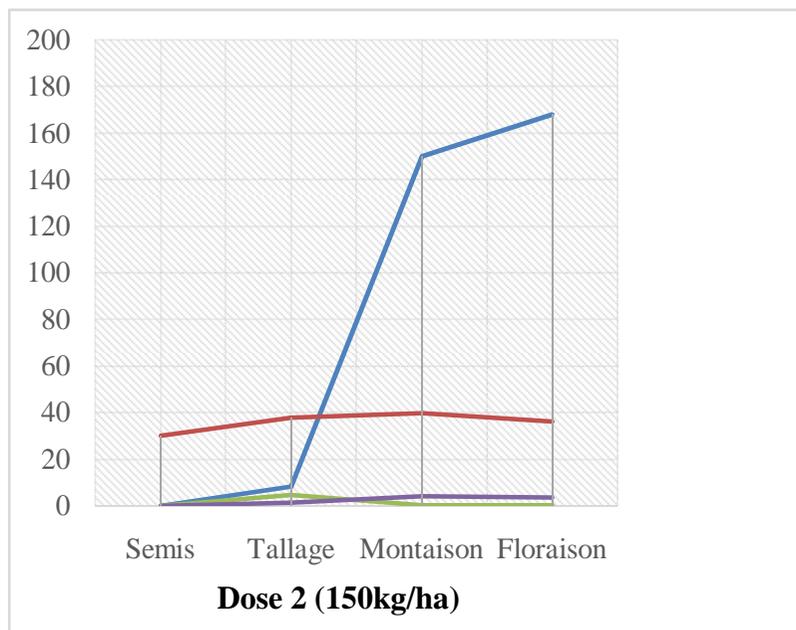
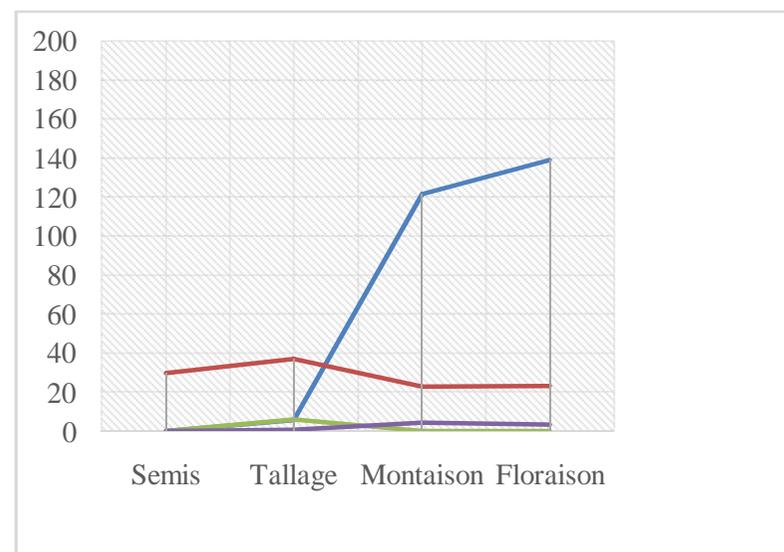
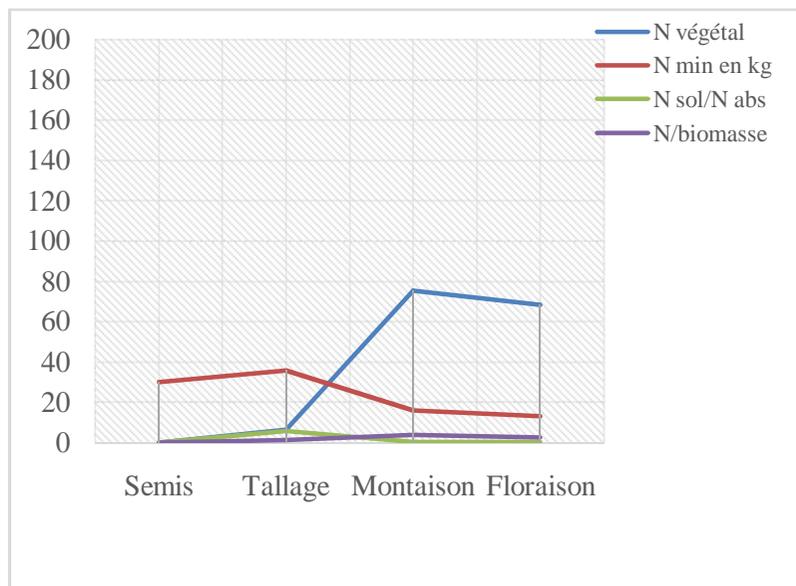


Figure 27. L'azote dans le végétal et le sol pour les différents traitements, dans la région de Sétif (2^{ème} année)

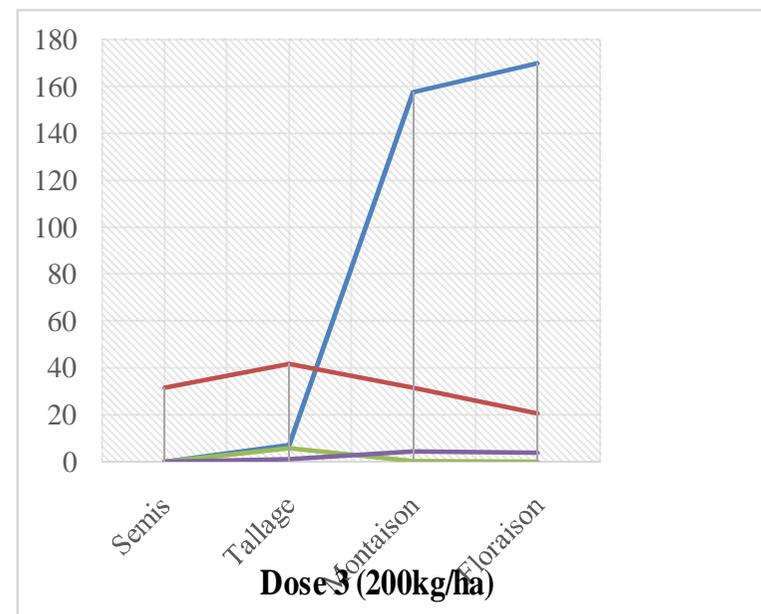
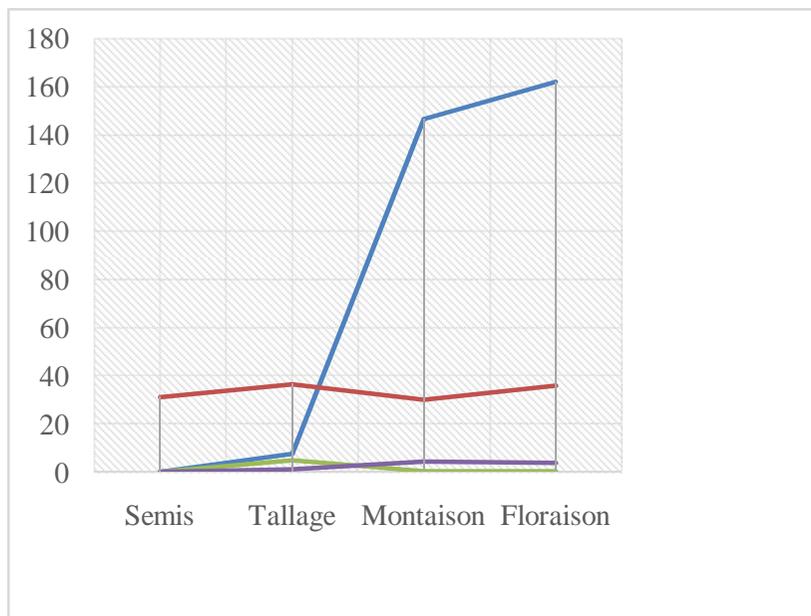
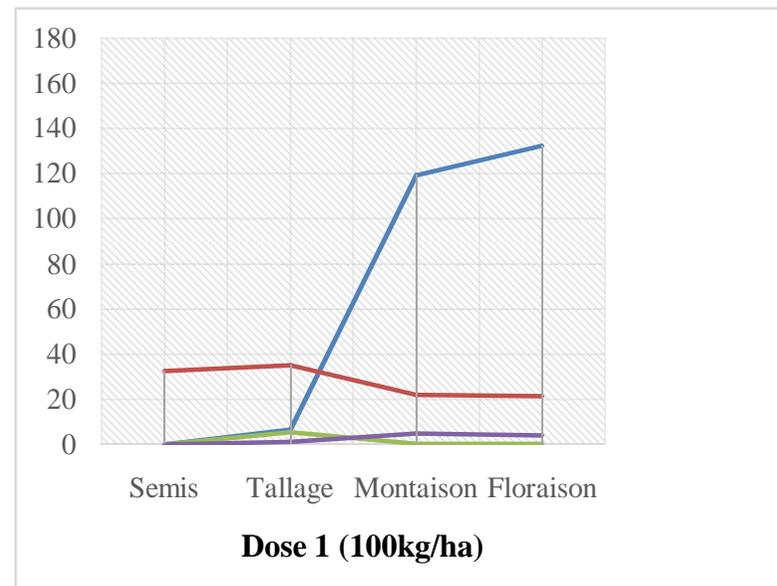
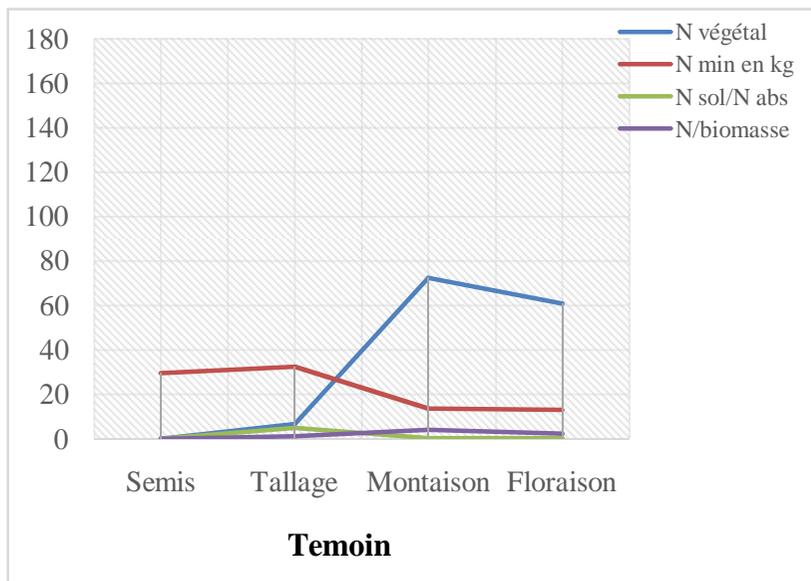


Figure 28. L'azote dans le végétal et le sol pour les différents traitements, dans la région de Sétif (3^{ème} année)

Conclusion partielle.

L'évolution de la matière sèche chez le blé reflète la croissance, le développement et l'accumulation de nutriments dans la plante. C'est un indicateur clé du rendement et de la qualité du blé. La production de MS est liée étroitement avec l'approvisionnement adéquat en azote.

L'évolution de l'azote absorbé par le blé varie en fonction des stades de développement de la plante. Le blé passe par différents stades de croissance, depuis la germination jusqu'à la maturation des grains, et chacun de ces stades a des besoins spécifiques en azote.

Pendant la phase de tallage et de développement des feuilles, le blé a absorbé une proportion de 15% de N. cela peut être expliqué par l'augmentation significative de la surface foliaire, ce qui entraîne une augmentation de la demande en azote. À ce stade, la plante absorbe activement l'azote du sol pour soutenir la croissance foliaire et la photosynthèse.

Au stade montaison et mi-montaison, la plante absorbe un pourcentage de 49.5 et 82% de N. dans ces stades, la demande en azote augmente encore davantage. L'azote est essentiel pour la formation des grains, la synthèse des protéines et la production de biomasse. À ce stade, l'absorption d'azote est maximale, car la plante mobilise activement les réserves d'azote du sol pour soutenir la croissance de l'épi et des grains.

Pendant le stade floraison Environ 60 à 70 % de l'azote total est absorbé.

Pendant la maturité environ 80% de l'azote total est absorbé lorsque les grains sont en train de se remplir, l'azote est translocaté des parties végétatives vers les grains en développement. C'est à ce stade que la plante concentre ses efforts sur la conversion de l'azote en protéines et en composés de stockage dans les grains. L'absorption d'azote diminue progressivement, car la plante canalise ses ressources vers la maturation des grains.

3.4.2. Coefficient d'utilisation d'azote (CAU).**3.4.2.1. Région de Constantine.****3.4.2.1.1. Effet du facteur traitement sur le Coefficient d'utilisation d'azote (CAU).**

Nos résultats présentés dans la figure 30 sont confirmés par des analyses statistiques (tableau 9 en annexes) montrent que la différence entre les traitements a été significative, un total de 3 groupes homogènes ont pu être différenciés A, B et C (test de Newman et Keuls). Le groupe A correspond à un CAU de 61.02 % (D2) qui est la valeur la plus élevée, le groupe B présente la valeur moyenne de CAU 44.97% (T) par rapport au groupe C présenté

par la faible dose D1 et D3 avec des valeurs respectives de 37.99 % et 35.90 %) qui correspond à la valeur de CAU la plus basse.

La dose D2 a exprimé une valeur de CAU% la plus importante avec respectivement 90.04 % et 83.36 %, pour la 2^{ème} et la 3^{ème} année. Par contre la 1^{ère} année, le plus important CAU% a été extériorisé par la dose T (44.97 %) et le moins important a été exprimé par la dose D3 (9.36 %) (figure 30).

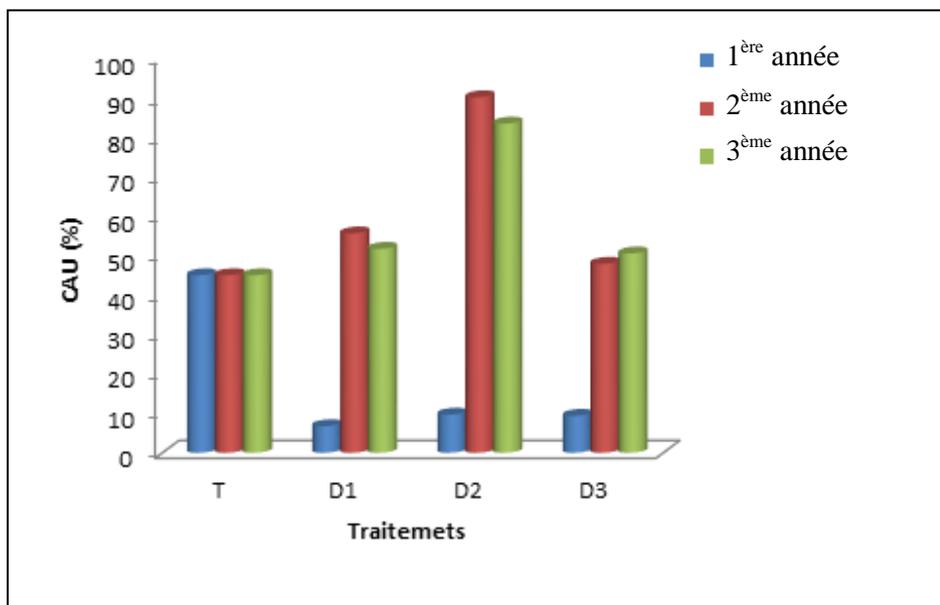


Figure 29. Effet des doses d'azote sur le coefficient d'utilisation azotée pour les différents traitements et les trois années, dans la région de Constantine.

3.4.2.1.2. Effet du facteur année sur le Coefficient d'utilisation d'azote (CAU).

Nos résultats soutenus par des analyses statistiques montrent qu'il y a une différence hautement significative et le test de Newman et Keuls à 5 % (tableau 9 en annexes) fait ressortir deux groupes homogènes, groupe A présentés par des valeurs élevées de 59.61 % et 57.62 % de CAU et qui correspondent respectivement aux années humides 2017/2018 et 2018/2019 contre une valeur très basse de l'ordre de 17.68 % (groupe B) qui correspond à 1^{ère} année sèche.

3.4.2.2. Région de Sétif.

3.4.2.2.1. Effet du facteur traitement sur le Coefficient d'utilisation d'azote (CAU).

Nos résultats présentés dans la figure 31 et appuyés par des analyses statistiques (tableau 10 en annexes) révèlent qu'il existe une différence THS entre les traitements avec un total de 4 groupes homogènes (test de Newman et Keuls) avec des valeurs de CAU de l'ordre

de 59.57 % (a), 44.88 % (b), 38.43 % (c) et 36.65 % (d) respectivement avec les doses D2, T, D1 et D3.

La valeur de CAU la plus intéressante a été donnée par la dose D1 (29.64 % et 29.64 %) pour les années humides (2^{ème} et 3^{ème} année), respectivement, contrairement à la dose D3 qui a exprimé une valeur de CAU la plus faible avec des valeurs de 24.63 % et 23.78 %. En contrepartie l'année sèche 16/17, la valeur de CAU% la plus importante a été exprimée par la dose D2 (43.48 %).

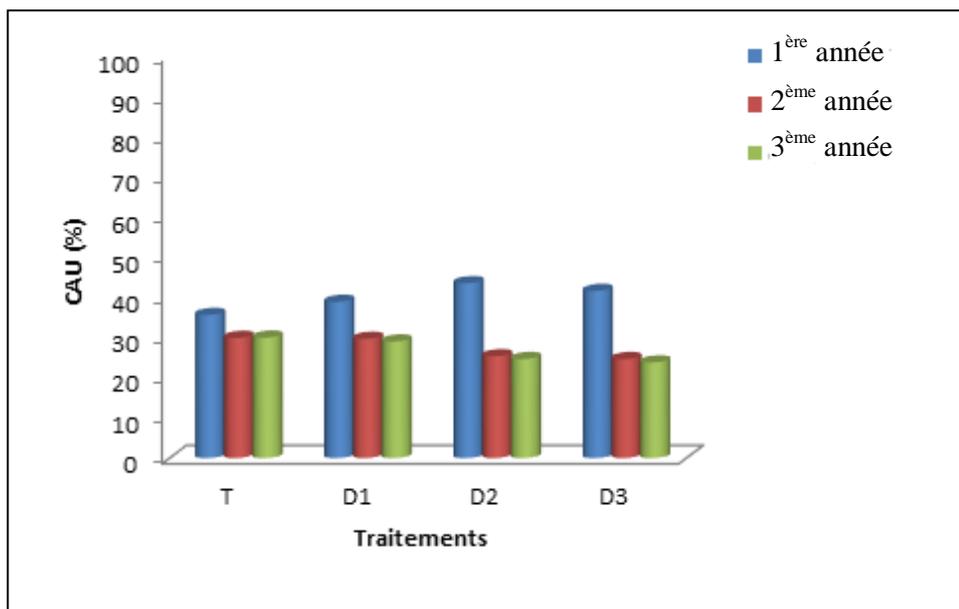


Figure 30. Effet des doses d'azote sur le coefficient d'utilisation azotée pour les différents traitements, ans la région de Sétif.

3.4.2.2.2. Effet du facteur année sur le Coefficient d'utilisation d'azote (CAU).

Nos résultats soutenus par des analyses statistiques montrent qu'il y a une différence hautement significative et le test de Newman et Keuls à 5 % (tableau 10 en annexes) fait ressortir 3 groupes homogènes, présentés par, des valeurs de CAU de 59,20 % (a) 57,69 % (b) et 17,75 % (c) qui correspondent respectivement aux années 2017/2018 et 2018/2019 et 2018/2019 (figure 31).

Discussion.

Le Coefficient d'Utilisation de l'Azote est un indicateur qui mesure l'efficacité d'utilisation de l'azote par une plante ou une culture. Plus le CAU est élevé, plus la plante est considérée comme efficace dans son utilisation de l'azote. IL est utilisé comme indicateur pour évaluer l'efficacité des pratiques agricoles en matière de gestion de l'azote et pour

améliorer la productivité agricole tout en réduisant les impacts environnementaux associés à l'utilisation de l'azote.

Pour les deux régions, le CAU est inversement proportionnel avec les doses croissantes de N apporter où les doses D2 et D1 ont exprimé une valeur de CAU% la plus importante pour les années humides et la dose T et D2 pour l'année sèche. Nos résultats s'accordent avec ceux de Broadbent et Carrlton (1978), Dans leurs expérimentations, ils n'ont pas observé de variation significative du CAU lorsque les doses d'azote étudiées se situaient dans une certaine plage, allant de 50 kg/ha à 250 kg/ha. Au-delà de cette plage, le CAU a commencé à baisser.

Les résultats de très nombreuses expérimentations menées sur ce thème convergent vers la même conclusion, le coefficient d'utilisation de l'engrais augmente avec la date d'apport. Les deux explications généralement avancées sont d'une part, une augmentation de la capacité d'absorption de la plante et d'autre part une augmentation des besoins instantanés.

Meynard (1985) a relié ces résultats avec le fractionnement d'azote d'où la réalisation d'un premier apport qui correspond à une dose faible (besoins instantanés et capacité d'absorption limitée) 1/3 de la dose totale ou moins, selon l'état de croissance recherchée au 2e apport. Alors que le deuxième apport plus important correspondant à la période de besoins maximum et un troisième apport éventuel, tardif pour enrichir la céréale en protéine.

Dans leurs travaux, concernant l'étude de l'assimilation de différentes formes d'engrais, Recous (1988) a constaté une augmentation systématique du CAU de la forme nitrate par rapport à la forme ammonium ou urée (surtout entre le 2e apport et la floraison). Ainsi qu'une préférence marquée par les micro-organismes du sol pour organiser prioritairement la forme ammonium.

Il a signalé aussi, une indépendance de la forme, en termes de quantités absorbées à la récolte, ce qui traduirait des contributions réelles différentes du sol, en fonction des formes et permettrait donc de conclure à des valeurs de CAU indépendantes de la forme.

Néanmoins, les principales causes de variation du coefficient d'utilisation de l'azote relèvent des interactions de l'azote avec d'autres éléments minéraux. Les interactions azote x potassium, en d'autres termes lorsqu'il y a réponse aux apports de potassium, la valorisation de l'azote est meilleure. De même Boyd (1976) a indiqué que les interactions azote x phosphore peuvent expliquer un effet sur l'accroissement de la biomasse et l'utilisation de l'azote. Des essais conduits par Plas (1992) montrent une augmentation de l'ordre de 5 % du CAU de l'azote lorsqu'il y a réponse à l'apport de phosphore.

Pour une même date de semis, la biomasse des parties aériennes au stade épi 1 cm (BA1) est fonction du peuplement. Pour un même peuplement, la BA 1 est fonction de la date de semis (Meynard et Limaux, 1987). Donc nous pouvons conclure que la capacité d'absorption du peuplement est directement liée à son état de croissance (besoins instantanés plus importants), alors les variations de date de semis et de densité de peuplement vont se répercuter sur la valeur du CAU. Cet effet est d'ailleurs confirmé par Plas (1992), qui signale des valeurs de CAU plus faibles à la suite de dates de semis tardives.

Limaux (1994) a confirmé que lorsque la capacité de contention maximale de la plante est atteinte (à partir de 150 % de la dose optimale), le CAU chute très rapidement. Broadbent et Carrlton (1978) avaient observé le même phénomène pour des doses très élevées (300 à 500 Kgha⁻¹).

Par ailleurs, les résultats acquis par Limaux (1994) suggèrent que le CAU est dépendant de la biomasse élaborée au moment des apports d'azote, donc des capacités d'absorption du peuplement.

D'autre part, le CAU est influencé par le temps de présence de l'azote dans le sol. Logiquement, la compétition dans le sol se situe principalement entre l'absorption racinaire et l'organisation microbienne, autrement dit. Lorsque les apports d'azote sont réalisés à une époque ne correspondant pas à une utilisation importante par la plante, la compétition tourne à l'avantage de la microflore du sol (Remy, 1984) et ainsi, l'engrais azoté reste plus longtemps dans le sol avant d'être utilisé. Plus le temps de séjour de l'azote dans le sol est long, plus forte est la probabilité de sa réorganisation dans le sol, et donc plus le coefficient d'utilisation risque de diminuer (Limaux, 1994).

Les CAU des deux années humides (2^{ème} et 3^{ème} année) sont supérieurs à ceux de l'année sèche (1^{ère} année). Ce constat suggère de tenter d'expliquer les différences de CAU observées plutôt à partir de données sujettes à des variations annuelles importantes, par exemple les conditions climatiques. Les valeurs de température moyenne régissant pour les 3 années sont presque équivalentes (comparaison mensuelle de chaque année) (tableau 3). Par contre, la pluviométrie mensuelle est très différente, en comparant les deux années humides avec celle sèche, en particulier en mars, avril et, mai (ces trois mois correspondent, et compte tenu des dates de semis pratiquées, à la période tallage montaison et floraison, pour les deux régions). Ces stades correspondent à une croissance importante du peuplement qui va exprimer sans doute une capacité d'absorption d'azote plus intense (besoins instantanés plus importants). Malheureusement, ces derniers ont été coïncider avec un fort déficit (1^{ère} année) qui va se répercuter sur la minéralisation d'azote et donc sur son assimilation par le végétal.

Les travaux réalisés par l'INRA et Arvalis Infos (2018) ont expliqué que la quantité d'azote à apporter doit revue à la baisse puisqu'elle dépend du rendement objectif (lui-même déterminé par la pluie et l'irrigation), du besoin cultural, de l'azote déjà présent dans le sol et du coefficient d'utilisation de l'azote

Oenema et al. (2015) ont estimé la plage de données du CAU se situant entre 50 % et 90 %. Ils ont préconisé que les valeurs faibles à cet intervalle provoquent des pollutions de sol et des eaux par l'azote. Tandis que les valeurs élevées épuisent les stocks du sol en azote.

En Afrique, la valeur moyenne de CAU est près de 63 % (± 3 %) pour les céréales avec une moyenne mondiale de 55 % (± 1 %) plus spécifiquement 57 % (± 2 %) pour la culture de blé (Ladha et al., 2005).

Limaux (1994) a conclu dans son expérimentation que pour atteindre des niveaux de CAU élevés (80 % et plus) l'engrais doit séjourner dans le sol le moins longtemps possible, et donc être apporté à une époque où le peuplement a des capacités d'absorption suffisamment importantes, pour être utilisé rapidement.

De même, cet auteur a montré l'importance de la biomasse présente au moment des apports d'azote, sur le coefficient d'utilisation chez le blé.

Les CAU maximum ne seraient observés que si les biomasses existantes au moment de l'apport de N présentent une valeur minimale, de l'ordre de 40 gN.m^2 pour le 1^{er} apport et 120 gN.m^2 pour le 2^e apport, correspondant à des capacités d'absorption suffisamment importantes (Limaux, 1994).

En conclusion, nous pouvons souligner l'importance de considérer le CAU comme une métrique clé pour améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote dans les cultures céréalières.

3.4.3. Indice de récolte azoté (NHI)

L'indice de récolte azoté (NHI) est une mesure de l'efficacité de l'utilisation de l'azote par une culture. Il permet d'évaluer la capacité de la culture à transformer l'azote en biomasse et en grain, et donc de déterminer si l'application d'engrais azotée a été efficace ou non. Le NHI est souvent utilisé comme un indicateur de la gestion de l'azote en agriculture et peut être utilisé pour ajuster les pratiques de fertilisation afin d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote par LNHI faible peut indiquer une inefficacité de l'utilisation de l'azote et une perte potentielle d'azote dans l'environnement.

3.4.3.1. Région de Constantine.

3.4.3.1.1. Effet du facteur traitement sur l'indice de récolte azoté (NHI).

La dose d'azote apportée agit sur l'indice de récolte de l'azote. La comparaison des moyennes indique que ce sont les traitements ayant reçu les apports les plus importants d'azote (apports supérieurs à 100 kg d'engrais/ha) qui présentent les indices de récolte les plus faibles, il s'agit de la dose D3 avec un NHI de 30,34 % et la dose D2 avec un NHI de 31.33 %. La dose D1 avec un apport de 100 kg d'engrais/ha a enregistré la meilleure valeur du NHI avec 32.92 % suivit par la dose T (témoin) avec une valeur de 32.42 % (tableau 9 en annexes).

La figure 32 laisse apparaitre que le T et la dose D1 ont montré les meilleurs NHI avec des valeurs de 30.58 % et 30.27 % pour T et 30.16 % et 29.48 % pour la dose D1, successivement pour la 2^{ème} et la 3^{ème} année. Par contre la dose D3 a exprimé des NHI plus faibles avec 24.77 % pour l'année 17/18 et 24.19 % pour la 2^{ème} année.

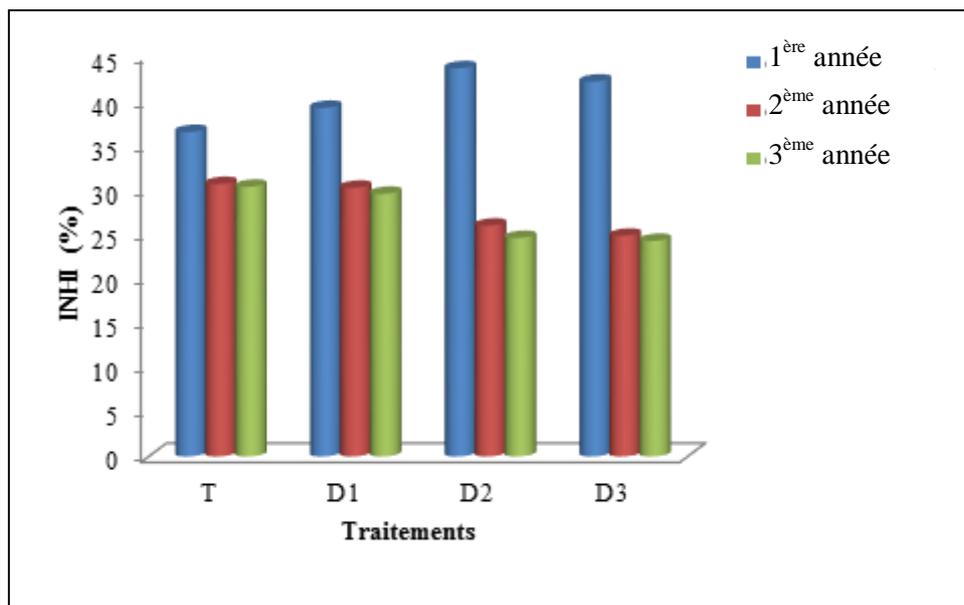


Figure 31. Effet des doses de l'azote sur l'indice de récolte azoté chez le blé pour les trois années, dans la région de Constantine.

3.4.3.1.2. Effet du facteur année sur l'indice de récolte azoté (NHI).

Les résultats statistiques montrent qu'il y a une différence très hautement significative et le test de Newman et Keuls à 5 % fait ressortir trois groupes homogènes A, B et C. Le groupe A représente le NHI le plus important assuré par la 1^{ère} année avec 40,29 % puis le

groupe B avec un NHI de l'ordre de 27.85 % pour la 2^{ème} année, contre une valeur plus faible de NHI 27.12 % assurée par la 3^{ème} année (tableau 9 en annexes).

3.4.3.2. Région de Sétif.

3.4.3.2.1. Effet du facteur traitement sur l'indice de récolte azoté (NHI).

La dose D1 présente le meilleur NHI 32,49 %, alors que la dose D3 présente le plus faible NHI avec 29.99% (tableau 10 en annexes).

La figure 33 montre que le traitement T exprime le meilleur NHI pour les deux années humides (2^{ème} et 3^{ème} année) suivis par la dose D1. La dose D1 a exprimé le meilleur NHI, pour la 1^{ère} année sèche. Par contre la dose D3 a exprimé des NHI plus faibles pour la 2^{ème} et la 3^{ème}.

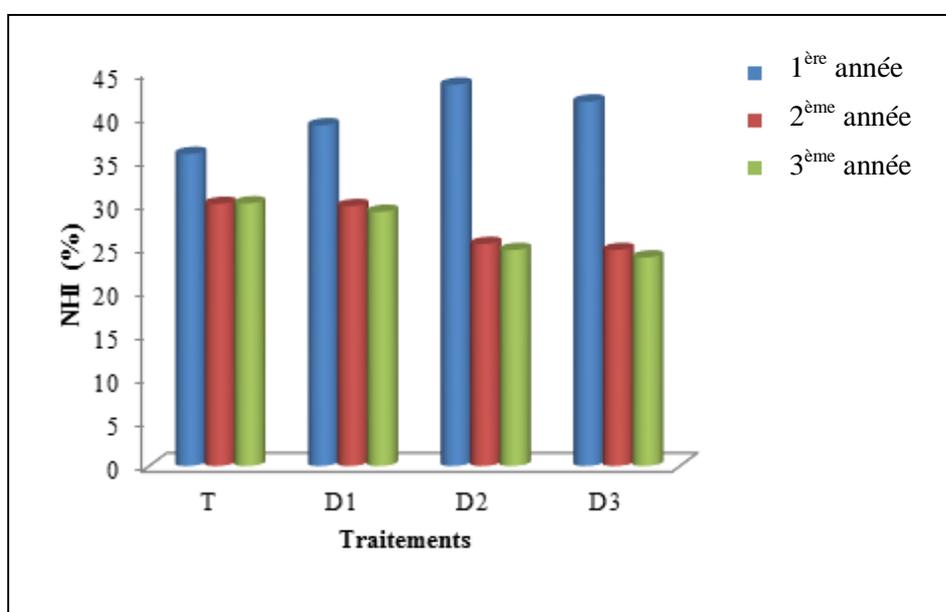


Figure 32. Effet des doses de l'azote sur l'indice de récolte azoté chez le blé pour les trois années, dans la région de Sétif.

3.4.3.2.2. Effet du facteur année sur l'indice de récolte azoté (NHI).

Les résultats statistiques montrent qu'il y a une différence très hautement significative ($P < 0.0001$) et le test de Newman et Keuls à 5 % (tableau 10 en annexes) fait ressortir trois groupes homogènes A, B et C. Le groupe A représente le NHI le plus important assuré par la 1^{ère} année puis le groupe B (2^{ème} année) présentant une valeur moins importante que la première contre une valeur plus faible de NHI présentée par la 3^{ème} année.

Discussion.

Pour les deux régions d'étude et en général, le NHI était inversement proportionnel avec l'accroissement des doses d'azote, où nous avons remarqué que dans les traitements où

l'apport d'azote était supérieur à 100kgde d'engrais/ha (D3 et D2) le NHI baisse cela peut être expliqué par l'accumulation plus importante de l'azote dans le feuillage. Les traitements fortement fertilisés ont développé un système végétatif qui a favorisé l'absorption de l'azote.

Cependant le traitement D1 a exprimé une efficacité de l'incorporation de l'azote dans la biomasse végétale et une efficacité de remobilisation de l'azote vers les grains.

Ainsi, Belete et al. (2018) ont montré qu'un NHI élevé indique une utilisation efficace de l'azote.

De même, Fageria (2009) a souligné qu'un NHI supérieur dans les génotypes est souhaitable, car il est lié positivement avec le rendement en grains.

Il est important de déterminer le NHI car il contribue avec 71 % dans la variation de rendement en grains. Il est généralement élevé pour les légumineuses plus que les céréales. Pour le blé dur, les valeurs se situent dans une fourchette de 0.57 à 0.83 (Desai et Bhatia, 1978 ; Fageria, 2009).

3.3.4. Efficacité de l'utilisation de l'azote absorbé (EUA).

Le grand défi en agriculture est d'arriver à accroître la production céréalière et assurer l'autosuffisance tout en diminuant l'utilisation d'azote et ses impacts sur l'environnement.

L'azote est l'un des principaux facteurs limitant la production agricole. Il entre dans les systèmes de production agricole, par le biais de la fixation symbiotique et surtout des engrais minéraux, en quantités très importantes et croissantes. Cependant, son efficacité d'utilisation par les cultures, c'est-à-dire la production obtenue par unité d'azote utilisée, est faible or, dans le domaine agricole, l'efficacité d'utilisation de l'azote est faible, de l'ordre de 50 % au niveau mondial, 36 % en Europe (Sutton et al., 2011).

Une large part de l'azote apporté est donc rejetée dans l'environnement et s'accumule dans l'air, dans l'eau et dans les sols. Les pertes azotées sont aujourd'hui devenues une des menaces environnementales les plus préoccupantes à l'échelle planétaire, c'est pourquoi l'amélioration de l'efficacité de l'azote en agriculture est l'une des voies les plus prometteuses pour parvenir à résoudre ce défi.

L'identification des solutions les plus adaptées pour y parvenir nécessite l'utilisation d'indicateurs. Cependant, l'indicateur d'efficacité existant, dénommé Nitrogen Use Efficiency (NUE), présente différents biais et insuffisances limitant son utilisation à des fins opérationnelles.

Tableau 8. Effet des différents traitements azotés sur l'efficacité de l'utilisation de l'azote absorbé (EUA) pour les trois années et dans les deux régions d'étude.

Année dose d'engrais		1 ^{re} année	2 ^e année	3 ^e année	Moyenne (1, 2 et 3 ^e)	Moyenne (2 ^e et 3 ^e)
Kg d'engrais ha ⁻¹		-----kg de N/100kg grains-----				
100	Constantine	5.15	2.1	2.87	3.37	2.49
	Sétif	5.02	2.48	2.80	3.43	2.64
150	Constantine	5.68	1.9	4.04	3.87	2.97
	Sétif	6.53	2.72	3.07	4.11	2.90
200	Constantine	5.81	1.96	3.38	3.72	2.67
	Sétif	5.54	2.80	2.92	3.75	2.86

Le tableau 8 fait ressortir l'effet de la sécheresse sur l'efficacité d'utilisation de N. En effet, la première année de culture ou un déficit pluviométrique est constaté, les valeurs de l'efficacité d'utilisation de N (EUA) oscillent entre 5 et 6.5 kg de N/quintal de blé et ceux quelque soit la dose d'engrais ou la région. Nous avons constaté que la production de paille pour cette année était de même ordre de grandeur que les années suivantes, cependant, les rendements en grains étaient nettement en deçà des deux années suivantes. En revanche, les années humides (2^{ème} et 3^{ème} années) présentent des valeurs moyennes de EUA de 2.7 kg de N/quintal de blé toutes doses confondues pour les deux régions.

Les plus faibles valeurs de EUA sont observées pendant la 2^{ème} année de culture toutes doses confondues et régions. Il est cependant utile de signaler que **les plus faibles valeurs de EUA pour les doses D2 et D3 pendant la 2^{ème} année de culture** (tableau 8). En général, les **valeurs moyennes de EUA sont de 2,8 toutes doses confondues pour la zone de Sétif et 2,71 pour la zone de Constantine. À noter que les faibles valeurs de EUA sont obtenues avec la dose D1.**

La 3^{ème} année a exteriorisé des valeurs de EUA plus importantes que la 2^{ème} année s'étallant de 2.8 à 4.04 kg de N/quintal de blé et ceux quelque soit la dose d'engrais ou la région. Les moyenne des valeurs de EUA des trois années sont de l'ordre de 3.6 et 3.7 kg de N/quintal de blé, respectivement pour la région de Constantine et Sétif.

3.3.4.1. Région de Constantine.

3.3.4.1.1. Effet du facteur traitement sur l'efficacité de l'utilisation de l'azote absorbé (EUA).

La figure 34 montre que la dose D3 présente des valeurs de EUA les moins intéressantes pour les années la 1^{ère}, la 2^{ème} et la 3^{ème} année qui sont respectivement de l'ordre de 17.2 kg de grains/kg d'azote, 50.8 kg de grains/kg d'azote et 24.7 kg de grains/kg d'azote, tandis que la dose D1 donne des valeurs de EUA les plus élevées avec 19.4 kg de grains/kg d'azote, 47.5 kg de grains/kg d'azote et 34.8 kg de grains/kg d'azote. En se basant sur le fait que 3kg produisent 100 kg de grains (Gate 1995), les doses D2 et D3 n'ont pas données les rendements escomptés. En effet, les 104 unités de N (D3 : 200 kg urée+100kg de MAP) devraient produire 34,66 q/ha, en réalité cette dose n'a produit que 24.05q/ha la 1^{ère} année de culture, des valeurs de EUA très intéressantes de l'ordre de 49.76 et 50.46q/ha, respectivement pour la 2^{ème} et la 3^{ème} année.

Les 81 unités de N (D2 : 150 kg urée+100kg de MAP) devraient produire 27q/ha, en réalité cette dose n'a produit que 22.61 q/ha la 1^{ère} année de culture. Par contre, la 2^{ème} et la 3^{ème} année ont enregistré des rendements plus intéressants de 49.07q/ha et 49.33q/ha, par ordre respectif.

Les 58 unités de N (D1 : 100 kg urée+100kg de MAP) devraient produire 19.33q/ha, en réalité cette dose a produit des rendements plus intéressants de 21.53q/ha, 46.01q/ha et 47.49q/ha, successivement pour la 1^{ère}, la 2^{ème} et la 3^{ème} année.

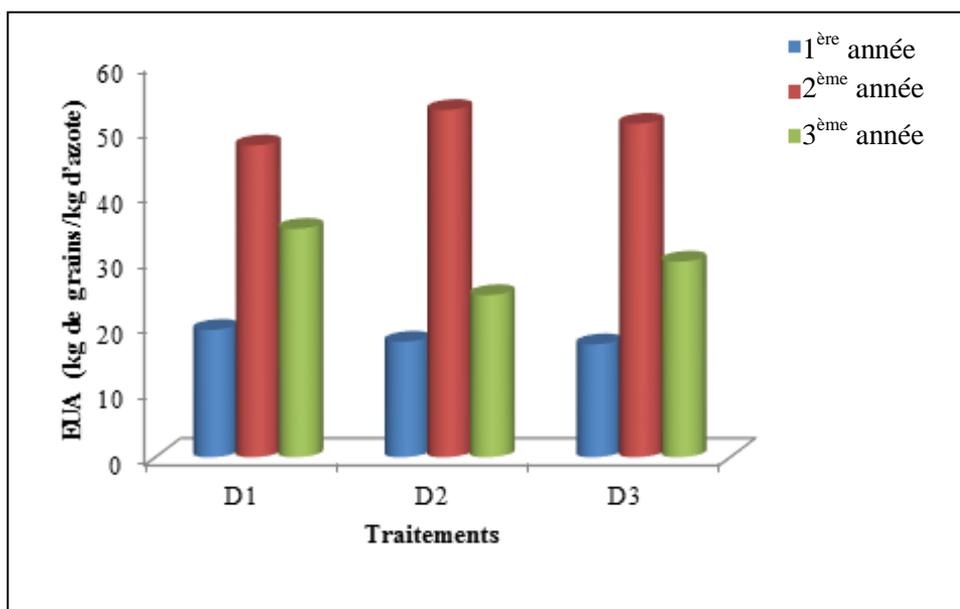


Figure 33. Effet des différents traitements sur l'efficacité de l'utilisation de l'azote pour les trois années, dans la région de Constantine.

3.3.4.1.2. Effet du facteur année sur l'efficacité de l'utilisation de l'azote absorbé (EUA).

Le test de Newman et Keuls 5 % fait ressortir trois groupes homogènes, soit 46kg de grains/kg d'azote (a), pour la 1^{ère} année, 30.5 kg de grains/kg d'azote (b), pour la 2^{ème} année et 21.7 kg de grains/kg d'azote (c), pour la 3^{ème} année ($P < 0.0001$. Tableau 9 en annexes).

3.3.4.2. Région de Sétif.

3.3.4.2.1. Effet du facteur traitement sur l'efficacité de l'utilisation de l'azote absorbé (EUA).

La figure 35 montre que la dose D1 exprime des EUA intéressants de l'ordre de 19.9 kg de grains/kgN, 40.3 kg de grains/kgN et 35.6 kg de grains/kgN pour la 1^{ère}, la 2^{ème} et la 3^{ème} année de culture. Suivi par ceux de la dose D2 (15.3, 36.7 et 32.5 kg de grains/kg d'azote). Cependant, les plus faibles valeurs sont obtenues par la dose D3 (18, 35.7 et 34.2 kg de grains/kg d'azote). En se basant sur le fait que 3kg produisent 100 kg de grains (Gate 1995), les doses D2 et D3 n'ont pas données les rendements escomptés. En effet, les 104 unités de N (D3 : 200 kg urée+100kg de MAP) devraient produire 34,66 q/ha, en réalité cette dose n'a produit que 28.52 q/ha la 1^{ère} année de culture, 34.39 q/ha, pour la 3^{ème} année, par contre la 2^{ème} année a donné des rendements importants de l'ordre de 36.38 q/ha

Les 81 unités de N (D2 : 150 kg urée+100kg de MAP) devraient produire 27q/ha, en réalité cette dose n'a produit que 25.7 q/ha la 1^{ère} année de culture. En revanche, la 2^{ème} et la 3^{ème} année ont enregistré des rendements plus intéressants de 34.86q/ha et 32.25q/ha, par ordre respectif.

Les 58 unités de N (D1 : 100 kg urée+100kg de MAP) devraient produire 19.33q/ha, en réalité cette dose a produit des rendements plus intéressants de 20.32q/ha, 32.09q/ha et 24.43q/ha, successivement pour la 1^{ère}, la 2^{ème} et la 3^{ème} année.

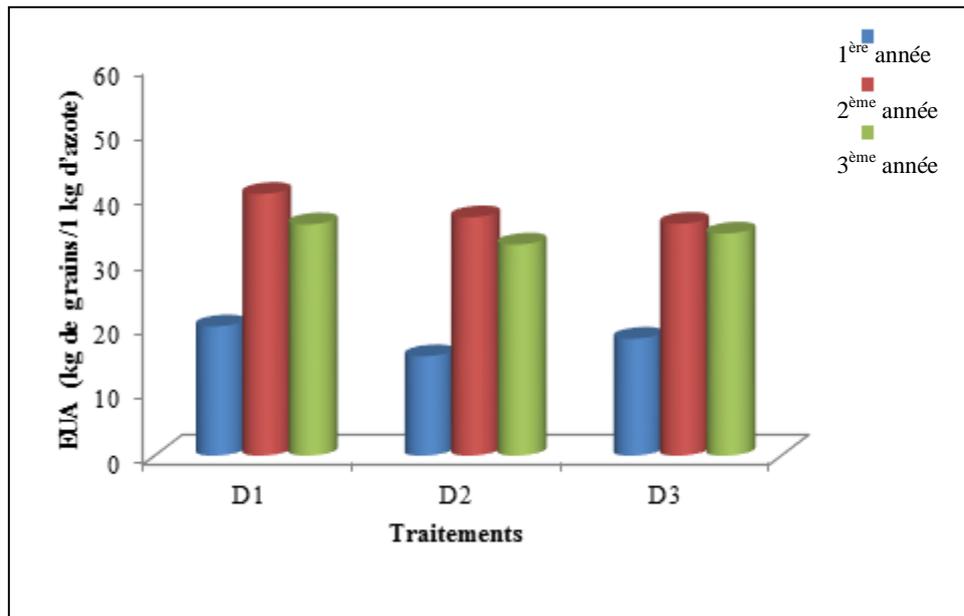


Figure 34. Effet des différents traitements sur l'efficacité de l'utilisation de l'azote pour les trois années, dans la région de Sétif

3.3.4.2.2. Effet du facteur année sur l'efficacité de l'utilisation de l'azote absorbé (EUA).

Les résultats statistiques montrent qu'il y a une différence très hautement significative et le test de Newman et Keuls 5 % (tableau 10 en annexes) fait ressortir trois groupes homogènes, soit 35,6 kg de grains/kg d'azote (a), pour la 2^{ème} année, 33 kg de grains/kg d'azote (b), pour la 3^{ème} année et 20,8 kg de grains/kg d'azote (c), pour la 1^{ère} année.

Discussion.

L'efficacité de l'utilisation de l'azote est un aspect crucial de la gestion de la nutrition des plantes en agriculture. Cependant, l'azote est souvent limité dans les sols agricoles et son utilisation efficace est d'une importance capitale pour maximiser les rendements des cultures tout en minimisant les pertes et les impacts environnementaux. L'efficacité de l'utilisation de l'azote peut être définie comme la capacité des plantes à absorber, assimiler et utiliser efficacement l'azote disponible dans le sol ou provenant de sources fertilisantes.

Nos résultats reflètent clairement l'impact négatif de la sécheresse sur l'efficacité d'utilisation de l'azote dans les cultures de blé dur. L'année sèche a conduit à une utilisation moins efficace de l'azote par les plantes, tandis que des conditions plus humides ont favorisé une meilleure utilisation de cet élément. La sécheresse, en particulier pendant la première année de culture, a eu un impact significatif sur les rendements en grains. Les faibles précipitations ont entraîné un manque d'humidité dans le sol, ce qui a limité la disponibilité de

l'azote pour les plantes. En conséquence, malgré l'apport d'engrais azotés, les plantes ont eu du mal à absorber efficacement l'azote du sol, ce qui a entraîné des valeurs élevées d'EUA. Les plantes ont peut-être utilisé l'azote disponible de manière inefficace en raison de conditions stressantes. Il est à noter que le blé dur est sensible au stress hydrique, ce qui peut réduire leur capacité à absorber et à utiliser efficacement l'azote. Les années sèches, comme la première année de culture, ont probablement entraîné un stress hydrique sévère, ce qui a nui à la croissance des plantes et à leur capacité à convertir l'azote en rendements en grains.

Dans les deux régions d'étude, le supplément d'azote n'a pas été utilisé de manière efficace et n'a pas généré une amélioration convenable du rendement grains, pour les deux doses d'azote 200 kg d'engrais/ha et 150 kg d'engrais/ha (1^{ère} année), si nous référons à la quantité d'azote nécessaire pour produire 1 quintal de grain qui est de 3 kg d'azote/q de grain (Gate 1995). La relation production et quantité d'azote appliquée indique que l'azote n'a pas été valorisé convenablement pour produire autant de grains.

En d'autres termes, l'EUA diminue à mesure que la dose d'azote appliquée augmente. Ceci est souvent attribué à un phénomène appelé "saturation de l'azote", où la plante atteint un point où elle ne peut plus utiliser efficacement l'azote supplémentaire apporté et où l'excès d'azote peut causer des problèmes environnementaux tels que la pollution de l'eau et de l'air.

Une autre explication possible est que l'apport excessif d'azote peut perturber l'équilibre des nutriments dans le sol, entraînant une diminution de l'absorption et de l'utilisation d'autres éléments nutritifs, tels que le phosphore et le potassium, qui sont également nécessaires pour la croissance de la plante.

Angus (1995) a expliqué cette relation par une pente de la courbe qui met en relation la production et la quantité d'azote appliquée, elle indique l'efficacité d'utilisation de l'azote appliqué (efficacité agronomique).

Cette utilisation non efficace de l'azote peut être attribuée,

- D'une part, à la dose d'azote appliquée, plus la dose d'azote apportée est élevée moins est l'efficacité de l'utilisation d'azote. Nos résultats sont en accord commun avec ceux d'Angus (1995) qui a démontré que lorsque la fourniture en azote est faible, l'efficacité est bonne. Elle diminue quand l'apport d'azote augmente.
- D'autre part, à la variété qui peut probablement avoir une EUA faible. Autant, Ayadi et al. (2016) ont montré que pour une même dose d'azote, les variétés améliorées ont une EUA plus élevée que les variétés anciennes qui est généralement dû à l'amélioration de l'indice de récolte qu'à l'efficacité

photosynthétique, Sassi (2008) a ajouté que certaines variétés absorbent et remobilisent l'azote d'une manière plus efficace que d'autres variétés lorsque sa quantité disponible dans le milieu est faible et ont une variabilité de l'aptitude d'absorption d'azote.

De même, Ayadi et al. (2016) ont indiqué que la dose et la période d'application influent sur la formation des composants génétiques.

Li et al. (2017) ont avancé plusieurs hypothèses pour expliquer la diminution de l'efficacité d'utilisation de l'azote avec l'augmentation de la dose d'engrais azoté appliquée. Ils ont proposé que cela pourrait être dû à une réduction de la capacité de la plante à absorber et à transporter l'azote, à une diminution de la photosynthèse en raison d'une compétition accrue pour les ressources entre la croissance de la plante et l'utilisation de l'azote, à une réduction de la superficie foliaire, ou encore à une augmentation de la respiration des racines.

Raun et al. (2002) a indiqué que l'efficacité de l'utilisation de l'azote représente seulement 33 % pour les céréales au niveau mondial.

Généralement le l'EUA est faible pour les céréales, l'EUA diminue avec l'augmentation d'azote appliqué, et avec la variation génotypique (Ayadi et al., 2016 ; Belete et al., 2018 et Fageria, 2009).

Hirel et al. (2007) ont affirmé que l'efficacité de valorisation d'azote est influencée aussi bien par les composantes génétiques et physiologiques des cultures, mais également par le niveau de fertilisation (Cox et al., 1986 ; Papakosta et Garianas, 1991) et les interactions génotype \times environnement (Przulj et Momcilovic, 2001).

Des EUA plus intéressants dans les conditions climatiques très favorables des deux années 17/18 et 18/19 par rapport à l'année sèche 16/17 avec des EUA plus faibles, pour les deux régions d'étude, cela est dû à l'apport d'azote réalisé en période de sécheresse.

Cette situation est confirmée par des analyses effectuées par l'AFOM (2016) tout en justifiant l'effet de la hausse des températures qui est propice à la minéralisation de l'azote du sol en automne, sous réserve de disponibilité en eau à cette période. D'autre part, un déficit hydrique en cours de montaison peut avoir des impacts variés sur l'efficacité des apports d'engrais : accroissement de l'efficacité si la période de sécheresse conduit à retarder l'apport jusqu'au retour des pluies, réduction de l'efficacité si l'apport est réalisé en période de sécheresse.

De même Angus (1995) a indiqué que l'efficacité est par ailleurs très dépendante des facteurs climatiques et s'avère généralement assez mauvaise en zones tropicales et arides en raison des pertes importantes.

Benjamin et al. (1997) ont signalé qu'une humidité adéquate du sol pendant la croissance et le développement des cultures est fondamentale pour aboutir à des EUA élevés. Le déficit en eau pendant la croissance des cultures peut limiter le mouvement de l'azote dans le sol et peut réduire son absorption par la culture. À l'inverse, une humidité excessive peut entraîner une lixiviation et une dénitrification et, par conséquent, une diminution des EUA (Torbert et al., 1992 ; Lehrsch et al., 2001). Aussi, les processus microbiens dans les sols sont affectés négativement par les teneurs élevées et basses en eau dans le sol (Drury et al., 2003).

Il est également important de se rappeler qu'il existe des limites biologiques pour atteindre une EUA très élevée. L'azote est très dynamique et passe par de nombreux processus biochimiques, ce qui limite notre capacité à réduire ou à éliminer complètement les pertes. Les conditions climatiques et agronomiques qui ne sont pas optimales pour la production végétale sont également responsables des faibles EUA.

Tadesse et al. (2019), en étudiant les effets de la fertilisation azotée et de l'humidité du sol sur la productivité du blé et l'efficacité de l'utilisation de l'azote dans différents contextes climatiques, avec différentes doses d'azote et des niveaux d'humidité du sol, ont montré que l'augmentation de la fertilisation azotée a conduit à une augmentation de la productivité du blé, mais a également entraîné une diminution de l'efficacité de l'utilisation de l'azote. De plus, une augmentation de l'humidité du sol a également amélioré la productivité du blé, mais a eu un impact limité sur l'efficacité de l'utilisation de l'azote.

Les mêmes résultats ont été rejoints par Gao et al. (2016) qui ont étudié l'impact de la gestion de l'eau et de l'azote sur le rendement en grains et l'efficacité d'utilisation de l'azote chez le blé d'hiver en conditions de sécheresse. Ces résultats ont montré que la quantité d'eau disponible dans le sol avait un impact significatif sur le rendement des cultures, avec des rendements plus élevés en présence d'un niveau adéquat d'eau dans le sol. L'ajout d'engrais azoté a également amélioré le rendement, mais l'effet était moins important que celui de l'eau.

De même Souissi et al. (2018) ont démontré que la zone bioclimatique, l'irrigation, le système de culture présentent un effet sur l'EUA.

Le travail de Garabet et al. (1998) illustre parfaitement la relation eau-EUA puisqu'ils ont montré que sans apport d'eau provenant de l'irrigation en conditions pluviales, le rendement maximal du blé est obtenu avec une dose d'engrais azotée de 50 kg N.ha⁻¹, tandis qu'avec une irrigation supplémentaire le rendement maximal est obtenu avec une dose d'engrais azotée de 150 kg N.ha⁻¹.

3.3.4.3. Corrélations entre assimilations de l'azote par le blé et EUA, CAU et IRA.

Les coefficients de corrélation des deux régions d'étude (figure 1 et 2 en annexes) indiquent :

- La force et la direction de la relation linéaire entre l'assimilation de l'azote par le blé et le coefficient d'utilisation de l'azote à différents stades de développement.

Ces coefficients de corrélation montrent la force de la relation entre l'assimilation de l'azote par le blé à chaque stade de développement et le coefficient d'utilisation de l'azote (CAU). La corrélation positive indique qu'il y a une tendance à l'augmentation de l'assimilation de l'azote par le blé à mesure que le coefficient d'utilisation de l'azote augmente à chaque stade de développement. Cela suggère qu'il y a une relation positive entre l'assimilation de l'azote et l'efficacité d'utilisation de l'azote par le blé à ces différents stades.

- Une corrélation négative entre l'assimilation de l'azote par le blé aux différents stades de développement et l'indice de récolte azoté. Cela signifie que, dans ce cas, à mesure que l'assimilation de l'azote par le blé augmente, l'indice de récolte azoté diminue. En d'autres termes, une augmentation de l'assimilation de l'azote n'est pas directement associée à une amélioration de l'indice de récolte azoté au stade de tallage du blé.
- Une corrélation de (-0,75 et -0,57), respectivement dans la région de Constantine et de Sétif, entre l'indice de récolte azoté et le coefficient d'utilisation de l'azote (CAU) indique une corrélation négative modérée entre ces deux variables. Cela signifie que, dans ce cas, à mesure que l'indice de récolte azoté augmente, le coefficient d'utilisation de l'azote diminue. En d'autres termes, une amélioration de l'indice de récolte azoté n'est pas directement associée à une augmentation du coefficient d'utilisation de l'azote.
- Une corrélation de ($r=0,67$ et $r=0,87$) respectivement dans les régions de Constantine et Sétif entre l'efficacité d'utilisation de l'azote (EUA) et le coefficient d'utilisation de l'azote (CAU) indique une corrélation positive modérée entre ces deux variables. Cela signifie que, dans ce cas, à mesure que l'efficacité d'utilisation de l'azote augmente, le coefficient d'utilisation de l'azote a tendance à augmenter également. En d'autres termes, une amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'azote est généralement associée à une augmentation du coefficient d'utilisation de l'azote. Sachant que l'EUA mesure la capacité de la plante à convertir l'azote absorbé en rendement. Une EUA élevée indique une utilisation plus efficace de l'azote, ce qui est souhaitable d'un point de vue agronomique et environnemental. Cela peut être attribué à des facteurs tels

qu'une meilleure assimilation de l'azote, une réduction des pertes d'azote par volatilisation ou lessivage, ou une allocation plus efficace des ressources de la plante.

- Une corrélation de ($r = -0,56$ et $r = -0,75$), respectivement dans les régions de Constantine et Sétif, entre l'efficacité d'utilisation de l'azote (EUA) et l'indice de récolte azoté (IRN) indique une corrélation négative modérée entre ces deux variables. Cela signifie que, dans ce cas, à mesure que l'efficacité d'utilisation de l'azote augmente, l'indice de récolte azoté a tendance à diminuer. En d'autres termes, une amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'azote est généralement associée à une réduction de l'indice de récolte azoté.

La corrélation négative entre ces deux variables suggère qu'il existe une relation inverse entre l'efficacité d'utilisation de l'azote et l'accumulation d'azote dans la partie récoltable de la plante par unité de rendement. Cela peut être dû à différents facteurs, tels qu'une allocation inefficace des ressources par la plante, une assimilation inefficace de l'azote ou une perte d'azote due à des processus tels que la volatilisation ou le lessivage.

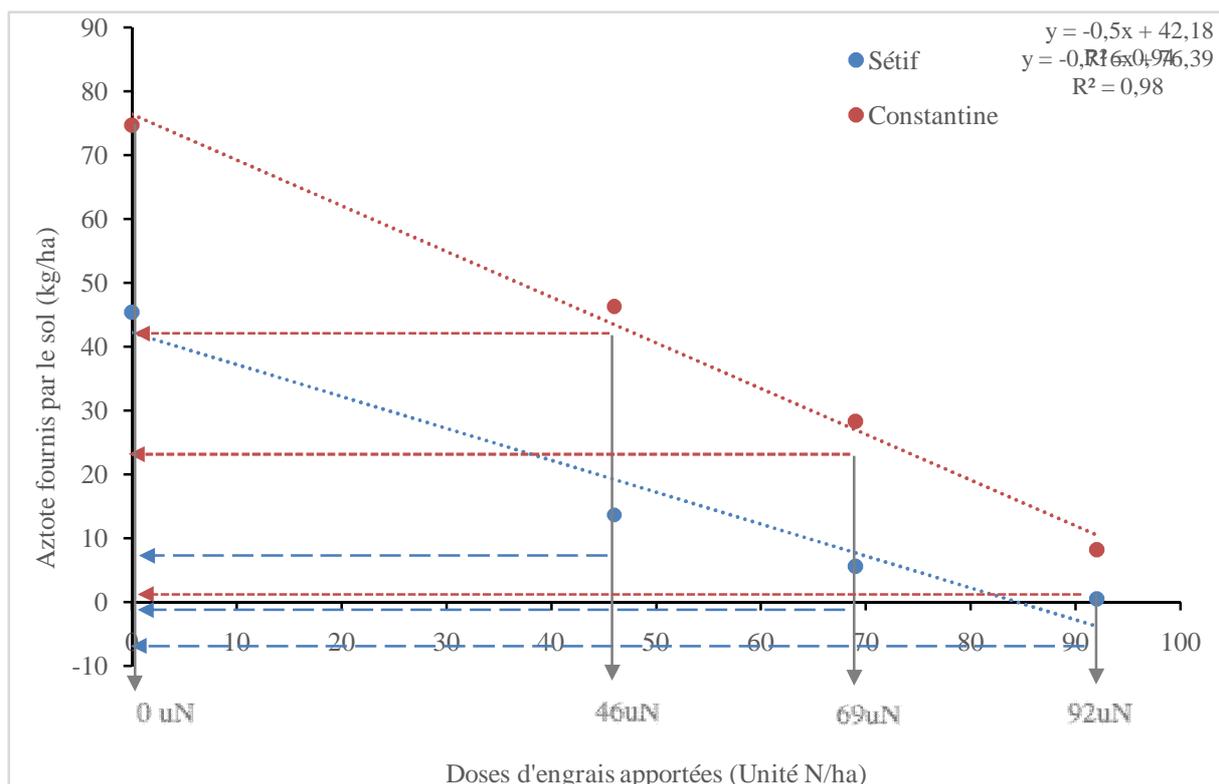


Figure 35. Effet des doses d'engrais apportées sur la fourniture du sol en azote.

En considérant nos valeurs (tableau 8) qui sont relativement proches (2.7 et 2.8 respectivement pour Constantine et Sétif) de ce que Gate (1995) avait rapporté (3 kg de N produisent 100 kg de grain), il en résulte que le sol témoin T a fournis 75 et 45 kg N ha⁻¹ (moyenne) respectivement pour Constantine et Sétif (Figure 36). Ainsi pour la région de

Constantine les doses de N apporter soit 46, 69 et 92 unités N (sans l'apport du MAP), produisent respectivement 34, 36 et 37 qha⁻¹ avec des exportations de N respectives 95, 100 et 104 kg N ha⁻¹. Si on considère que la fourniture du sol est équivalente pour les 3 doses d'engrais apportées, on s'aperçoit que finalement que la contribution réelle des différents niveaux de l'engrais apporté n'a contribué que de 24 %, 30 % et 34 % respectivement pour les doses de 100, 150 et 200 kg urée ha⁻¹. Le même constat est observé dans la zone de Sétif, à savoir les doses ci-haut mentionnées ont contribué respectivement de 31.64 et 77 %. Il est à noter que la contribution des engrais au niveau de la région de Sétif enregistre des valeurs assez importantes par rapport à la région de Constantine, ceci est dû au fait que l'apport du sol de cette dernière est plus important à la région de Sétif. À noté aussi que pour la dose 200 kg urée ha⁻¹, la fourniture du sol est nulle pour la région de Sétif. En réalité ces valeurs représentent une simple estimation, pour évaluer les apports réels du sol, un marquage isotopique de l'azote est indispensable. Toutefois, cette tendance qui montre que l'apport en N du sol est inversement proportionnel par rapport à l'engrais apporté. Ceci se résume par le fait que plus la dose d'engrais apportée est importante moins le sol fournis de N. Cette déduction se réfère sur le fait que les parcelles témoins de la station de Constantine (sans MAP) ont fourni 33, 103 et 93 kg Nha⁻¹ respectivement la 1^{ère}, la 2^{ème} et la 3^{ème} année de culture. Les parcelles de la région de Sétif ont fourni respectivement 28, 59 et 51 kg Nha⁻¹.

On soustrait la production moyenne de grains des 3 années de culture des rendements ci-haut mentionnés on peut déduire la fourniture du sol en N. La figure 36 montre que plus la dose d'engrais apportée est importante moins le sol fournis de N.

Au cours de cette étude, les composantes de rendement sont étudiées afin de déceler la relation efficience d'utilisation de l'azote et le rendement avec ses composantes.

3.5. Analyse de l'élaboration du rendement.

3.5.1. Rendement grains et paille. D'après Madic et al. (2016), le rendement en grains du blé est un trait complexe d'une importance économique considérable qui résulte de l'effet du génotype et de l'environnement pendant tout le cycle de vie de la plante. Il est déterminé par trois composantes principales, à savoir le nombre d'épis, de grains par épi et le poids de 1000 grains.

3.5.1.1. Région de Constantine.

3.5.1.1.1 Effet du facteur traitement sur le rendement (grains et paille).

Le rendement (grains et paille) est proportionnel à la croissance des doses d'azote apportée, la meilleure valeur du rendement grains et paille a été observé respectivement avec la dose D3 41.42 q/ha (a) et 34.51 q/ha (a), suivi par la dose D2 avec un rendement grains de 40.34 q/ha (b) et un rendement paille de 33.48 q/ha (b) ensuite la dose D1 avec un rendement grains de 38.49 q/ha (c) et un rendement paille de 31.86 q/ha (c). Le faible rendement grains et paille est enregistré chez la dose T (témoin) avec des valeurs respectives de 32q/ha (d) et 30.75 q/ha (d) (tableau9). Un effet très hautement significatif du facteur traitement sur le rendement total (grains et paille) ($P < 0.0001$) (tableau 11 en annexes).

Le tableau 9 indique que le rendement total moyen de la 1^{ère}, la 2^{ème} et la 3^{ème} année sont meilleurs pour la dose D3 et qui sont par ordre respectif de 55.39q/ha avec un rendement grains de 24.05q/ha et paille 31.34q/ha, 85.64q/ha avec un rendement grains de 49.76q/ha et paille 35.88q/ha et 86.78 q/ha avec un rendement grains de 50.46q/ha et paille 36.31q/ha. Provient la dose D2 en deuxième position avec un rendement moyen total de 52.72 q/ha avec (22.61 q/ha grains, 30.1 q/ha paille), 84.31 q/ha avec (49.07 q/ha grains 35.23 q/ha paille) et 84.43 q/ha avec (49.33q/ha grains 35.1q/ha paille). Par la suite la dose D1 qui a donné des rendements totaux de 50.2 soit (21.53q/ha grains 28.67q/ha paille), 79.24 soit (46.01q/ha grains 33.23q/ha paille) et 81.61 soit (47.94q/ha grains 33.67q/ha paille). En dernier lieu la dose T avec un rendement moyen total de 45.96q/ha avec (18.13q/ha grains, 27.83q/ha paille), 70.66q/ha avec (38.65q/ha grains 32.01q/ha paille) et 71.65q/ha avec (39.24q/ha grains 32.41q/ha paille).

Il n'y a pas de réponse convenable du blé à la fertilisation azotée au-delà de 100 kg d'engrais/ha, ce qui signifie que pour ces traitements l'azote a été utilisé de manière moins efficiente.

3.5.1.1.2. Effet du facteur année sur le rendement (grains et paille).

Les résultats traduisent une variabilité très hautement significative de l'effet année sur le rendement grains et paille. Au cours des trois années, la réponse de la variété Waha aux conditions pluviales de l'expérimentation est significativement différente pour ces deux variables mesurées (grains et paille).

L'année 2018/2019 semble la plus importante du point de vue rendement en grains et paille, soit des valeurs respectives de l'ordre de 46.74 (a) qha⁻¹ et 34.37 qha⁻¹ (a) contre des valeurs de 45.87qha⁻¹ (b) et 34.09 qha⁻¹ (b) enregistrées lors de l'année 2017/2018. Tandis que

la 1^{ère} année présente un rendement en grains et en paille plus faible (21.58 qha⁻¹(c) et 29.48 qha⁻¹(c) par rapport aux deux années étudiées (Tableau 11 en annexes).

Tableau 9. Effet des traitements d’azote sur le rendement total moyen (grains et paille) pour les différentes années dans les deux régions d’étude.

	T	D1 (100kg/ha)	D2 (150kg/ha)	D3 (200kg/ha)		T	D1 (100kg/ha)	D2 (150kg/ha)	D3 (200kg/ha)
Constantine					Sétif				
Quintaux/ha									
1^{ère} année									
Rendement grain	18.13	21.53	22.62	24.05		15.24	20.32	25.76	28.52
Paille	27.83	28.67	30.1	31.34		28.18	31.14	32.13	34.05
Total	45.96	50.2	52.72	55.39		43.42	51.46	57.89	62.57
2^e année									
Rendement grain	38.65	46.01	49.07	49.76		24.45	32.09	34.86	36.38
Paille	32.01	33.23	35.23	35.88		29.91	31.71	32.62	31.16
Total	70.66	79.24	84.3	85.64		54.36	63.8	67.48	70.54
3^e année									
Rendement grain	39.24	47.94	49.33	50.46		21.91	24.43	32.25	34.39
Paille	32.41	33.76	35.1	36.31		29.2	29.93	31.68	32.32
Total	71.65	81.7	84.43	86.77		51.11	54.36	63.93	66.71
Moyenne									
Rendement grain	32.01	38.49	40.34	41.42		25.53	25.61	30.96	33.10
Paille	30.75	31.89	33.48	34.51		29.10	30.93	32.14	33.51
Total	62.76	70.38	73.82	75.93		49.63	56.54	63.10	66.61

3.5.1.2. Région de Sétif.

3.5.1.2.1. Effet du facteur traitement sur le rendement (grains et paille).

La dose D3 enregistre un meilleur rendement total moyen de 66.60q/ha (a), suivi par la dose D2 avec rendement total moyen de 63.10 q/ha (b), ensuite la dose D1 avec 56.55 q/ha (c) et en fin la dose T avec 49.64 q/ha (d) (P<0.0001) (tableau 12 en annexes).

Selon le tableau 9, la dose D3 extériorise le meilleur rendement total moyen suivi par la dose D2 puis D1 et en fin T pour les trois années :

Pour la 1^{ère} année, les doses D3, D2, D1 et T ont produit successivement un rendement total de 62.57q/ha soit (28.52q/ha grains et 34.05q/ha paille), 57.89q/ha soit (25.76q/ha grains

et 32.13q/ha paille), 51.47q/ha soit (20.32q/ha grains et 31.14q/ha paille) et 43.42q/ha soit (15.24q/ha grains et 28.18q/ha paille)

Pour la 2^{ème} année, D3 a exprimé un rendement total de 70.54q/ha soit un rendement grains de 36.38q/ha et un rendement paille 34.16q/ha, D2 a donné 67.48q/ha avec (34.86q/ha grains, 32.62q/ha, D1 avec un rendement total de 63.81q/ha soit (32.09q/ha grains et 31.71/ha) et en fin T avec 54.36q/ha soit (24.45q/ha grains et 29.91q/ha paille).

Pour la 3^{ème} année, le rendement total produit par D3 est de 66.71q/ha (34.39q/ha grains et 32.32q/ha paille), D2 est de 63.93q/ha (32.25q/ha grains et 31.68q/ha paille), D1 est de 54.37q/ha (24.43q/ha grains et 29.93q/ha paille) et T est de 51.14q/ha (21.94q/ha grains et 29.2q/ha paille).

3.5.2. Efficacité des engrais sur le rendement du blé (rendement moyen des trois années de culture sur les deux sites).

Nous avons voulu examiner l'efficacité des différentes doses d'engrais azotées et leurs effets sur les rendements. En considérant que le rendement obtenu par le témoin T est le même pour tous les différents traitements plus les rendements dus à l'apport de l'engrais : c'est le rendement potentiel (RP). En faisant la différence entre RP et le rendement réel (RR) nous trouvons le déficit de production de grain. La figure 37 montre que plus la dose d'engrais ajoutée est importante le déficit entre RR et RP est conséquent. Alors que le RR pour cette dose est de 41.4q/ha ce qui nous donne un déficit de rendement (DR) de 29q/ha. Pour la dose 100kg urée/ha ou le RR est de 34q/ha, qui est de 3q/ha moins par rapport au RR de la dose 200kg urée/ha, le DR est de 15q/ha. La dose 150kg urée/ha enregistre un DR de 22q/ha pour une différence de RR entre D2 et D1 de 2q/ha. Ceci montre bien que la dose 100 kg urée/ha est la plus efficace du point de vue de rendement. En déterminant la proportion du déficit par rapport au RP, en le déduisant du 100 % du RP, il en ressort que le rendement obtenu du traitement 100kg urée/ha représente 70 % du RP, alors que le rendement obtenu du traitement 200kg urée/ha représente 56 % du RP. Le traitement 150kg urée/ha obtient une valeur 62 % du RP. Pour le site de Sétif, les valeurs obtenues sont respectivement 58 ; 54 et 59 % du RP. Cette différence entre l'efficacité des différentes doses d'engrais peut être attribuée au premier apport effectué sous la forme de 12 unités de MAP au semis qui est insuffisant pour soutenir une croissance vigoureuse des plantes, cela peut entraîner une réduction initiale du rendement potentiel. Même si les doses ultérieures d'azote (au tallage et au début de la montaison) sont adéquates, le rendement final peut être limité par le démarrage lent des plantes.

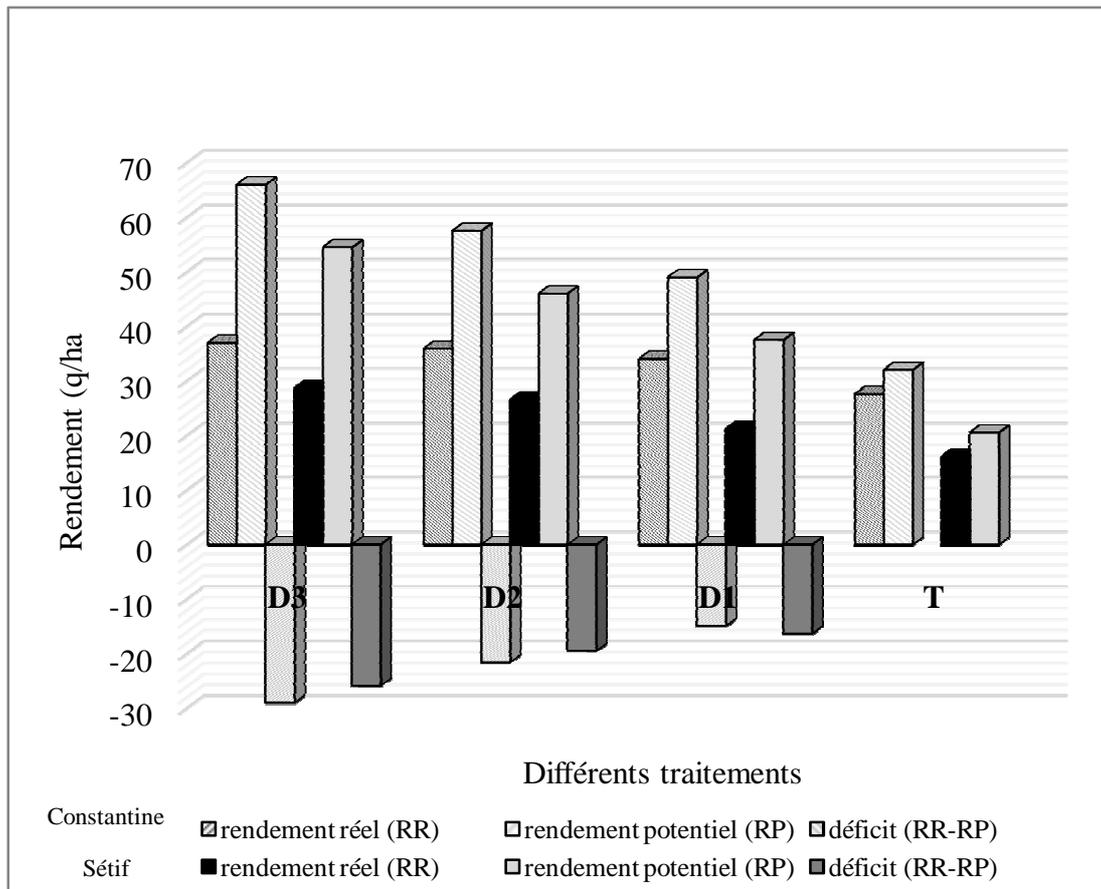


Figure 36. Efficacité des engrais sur le rendement du blé (rendement moyen des trois années de culture sur les deux sites).

Ainsi, les doses d'azote appliquées aux stades ultérieurs peuvent être plus efficaces, mais l'efficacité globale de la fertilisation peut varier d'une année à l'autre en fonction des conditions météorologiques et de la réponse des cultures aux différentes doses.

Pour améliorer l'efficacité globale, il peut être bénéfique d'augmenter légèrement la quantité d'azote appliquée au semis pour mieux répondre aux besoins initiaux des plantes tout en continuant le fractionnement aux stades du tallage et de la montaison. Cela peut contribuer à optimiser le rendement de la culture.

En examinant l'efficacité des engrais sur le rendement moyen du blé au cours des trois années d'étude (fig. 37) pour chaque année de culture sur les deux sites, nous pouvons observer que :

- 1^{ère} année.

Pendant la première année de l'étude, les résultats de la figure 38 révèlent que la dose T a produit des RR de 28.5 et 24 q/ha, entraînant un déficit de rendement (DR) de 26 et 35.6 q/ha dans les régions de Sétif et Constantine respectivement. En revanche, la dose de 100 kg d'urée/ha a généré des RR de 25.7 et 22.6q/ha (Sétif, Constantine), conduisant à un DR de 20

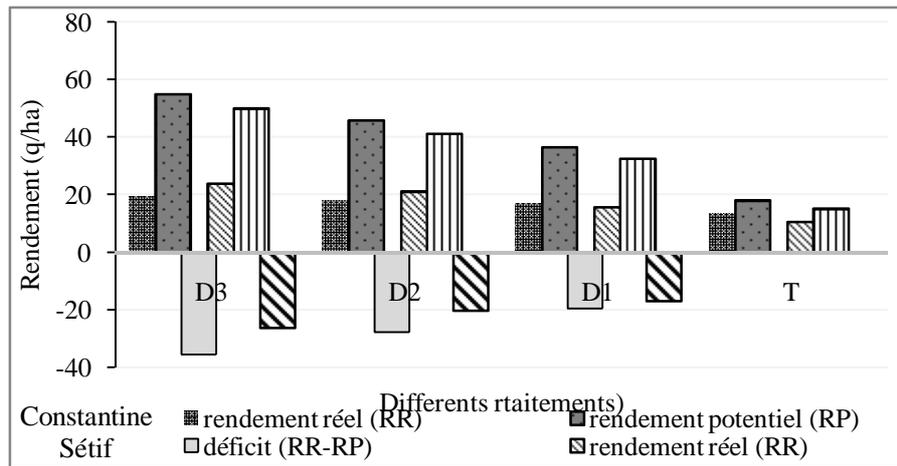
et 27.8 q/ha. La dose de 150 kg d'urée/ha a enregistré un DR de 16.8 et 20.16q/ha, avec une différence de rendement par rapport à la dose précédente de seulement 3 et 1 q/ha à Sétif et Constantine. Ces résultats soulignent clairement que la dose de 100 kg d'urée q/ha est la plus performante en termes de rendement. Elle a atteint 51 % du RP, tandis que la dose de 200 kg d'urée/ha a représenté 70 % du RP. La dose de 150 kg d'urée/ha a obtenu 48 % du RP. Pour le site de Constantine, les rendements étaient de 39 %, 46 % et 73 % du RP respectivement pour les doses de 100 kg, 150 kg et 200 kg d'urée/ha.

- **2ème année.**

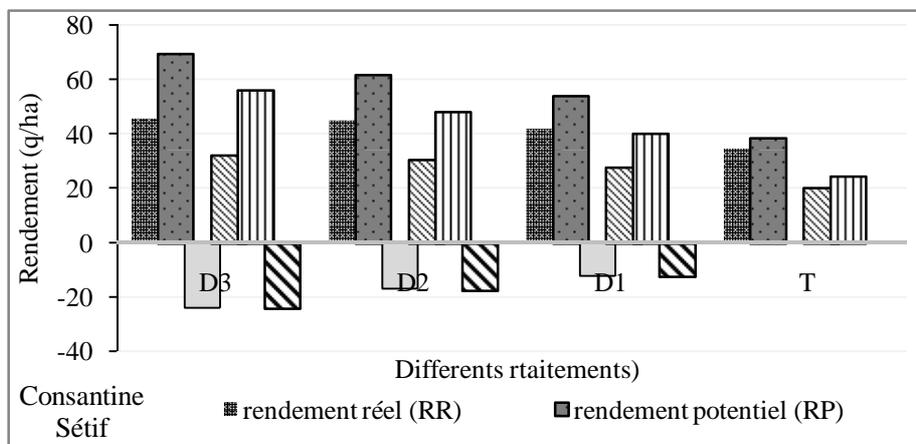
La dose T a conduit à des RR de 36.3 et 49.7q/ha, entraînant un déficit de rendement (DR) de 23.9 et 24 q/ha respectivement dans les régions de Sétif et Constantine. En contraste, la dose de 100 kg d'urée/ha a produit des rendements de 34.8 et 49q/ha, entraînant un DR de 17.5 et 16.9 q/ha dans ces mêmes régions. La quantité de 150 kg d'urée/ha a affiché un DR de 12.3 et 12.2 q/ha, avec seulement une différence de 3 quintaux par hectare par rapport à la dose précédente, pour les deux sites. Ces résultats mettent clairement en évidence que la dose de 100 kg d'urée/ha est la plus performante en termes de rendement. Elle a atteint 64 % du RP, tandis que la dose de 200 kg d'urée/ha a représenté 83 % du RP. La dose de 150 kg d'urée/ha a obtenu 69 % du RP. Pour le site de Constantine, les rendements étaient respectivement de 73 %, 77 % et 90 % du RP pour les doses de 100 kg, 150 kg et 200 kg d'urée/ha.

- **3ème année.**

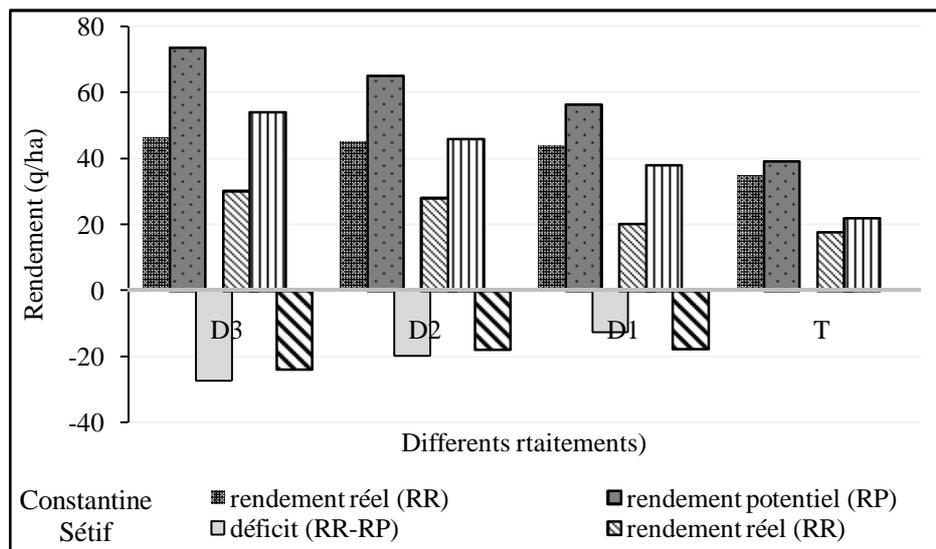
Les résultats de la troisième année de notre étude mettent en lumière des variations significatives des rendements de blé dur en fonction des doses d'urée appliquées. La dose T a produit des rendements de 34.3 et 50.4 q/ha, entraînant un déficit de rendement (DR) de 23.8 et 27.4 q/ha dans les régions de Sétif et Constantine respectivement. Par contre, la dose de 100 kg d'urée/ha a généré des rendements de 32.2 et 49.3 q/ha, résultant en un DR de 17.9 et 19.9 q/ha dans les mêmes régions. La quantité de 150 kg d'urée/ha a enregistré un DR de 17.7 et 12.7 q/ha, avec une différence de rendement de seulement de 2 quintaux par hectare par rapport à la dose précédente pour le site de Constantine. Ces constatations mettent clairement en évidence l'efficacité de la dose de 100 kg d'urée/ha en termes de rendement, représentant 61 % du RP, tandis que la dose de 200 kg d'urée/ha atteint 81 % du RP. La dose de 150 kg d'urée/ha obtient 53 % du RP. À Constantine, les rendements se situent respectivement à 69 %, 77 % et 89 % du RP pour les doses de 100 kg, 150 kg et 200 kg d'urée/ha.



1^{ère} année



2^{ème} année



3^{ème} année

Figure 37. Efficacité des engrais sur le rendement du blé pour les trois années de culture sur les deux sites d'étude.

3.5.1.2.4. Relation matière sèche-rendements blé dur.

Selon la figure 39, qui montre la relation entre productions de MS et le rendement du blé dur pour le stade tallage, mi-montaison et floraison, les corrélations plus fortes ($r=0.8$ au stade de tallage et $r=0.78$ au stade mi-montaison) à ces stades indiquent une relation plus étroite. Au stade de tallage, la plante est en pleine croissance ou on assiste à un développement de la structure du végétal, ceci à une influence directe sur le rendement.

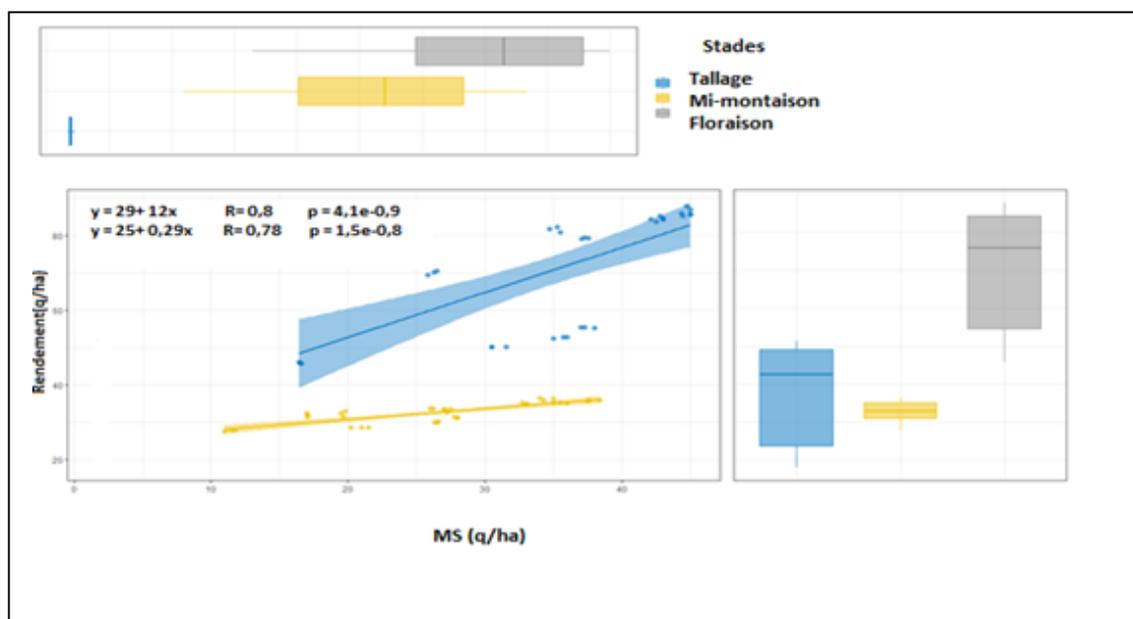


Figure 38. Relation entre l'accumulation de la matière sèche et le rendement du blé dur pour le stade tallage, mi-montaison et floraison.

Au stade de mi-montaison, la plante continue de s'approcher de la maturité et de remplir les grains, ce qui contribue également à une corrélation plus forte entre l'accumulation de matière sèche et le rendement. Ainsi nous pouvons considérer la production de MS comme un bon indicateur du rendement.

3.5.1.2.5. Relation entre l'absorption de N par les tissus de la céréale et le rendement.

La figure 40 indiquant la relation entre l'azote absorbé par les tissus du blé et le rendement à différentes parties de la céréale à savoir grains ou paille montre :

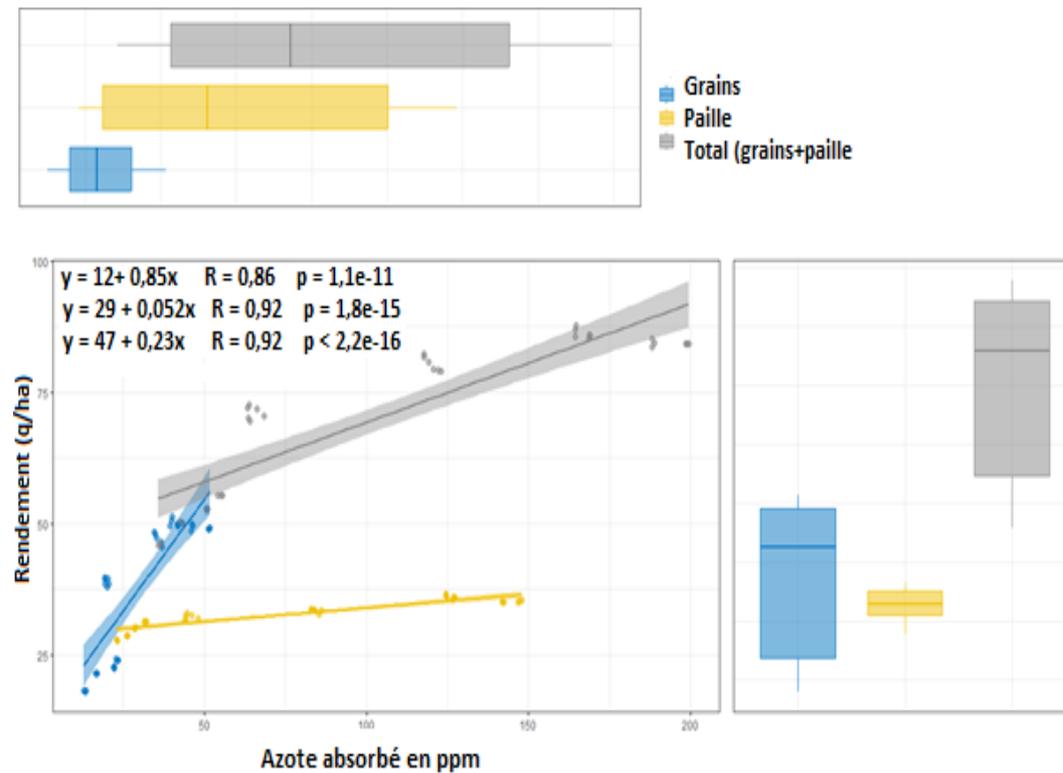


Figure 39. Relation entre l'assimilation de N par les tissus de blé et le rendement (grains, paille et total).

Pour le rendement en grains, une relation positive entre l'azote absorbé et le rendement en grains ($r=0.86$). Une augmentation de l'azote absorbé par les tissus du blé entraîne une augmentation du rendement en grains. Cela peut s'expliquer par le rôle crucial de l'azote dans la synthèse des protéines et la croissance des organes reproducteurs, tels que les grains de blé. Plus l'azote est disponible pour la plante, plus elle peut produire de la biomasse et de l'énergie nécessaire à la formation et au remplissage des grains, conduisant ainsi à un rendement plus élevé.

Pour le rendement en paille, une relation positive entre l'azote absorbé et le rendement en paille ($r=0.92$). L'azote est un élément essentiel pour la croissance végétative du blé, y compris le développement de la paille. Une absorption suffisante d'azote permet une meilleure formation et une plus grande quantité de paille, ce qui peut contribuer à un rendement en paille plus élevé.

Pour le rendement total ($r=0.92$), l'azote est nécessaire à la fois pour la production de biomasse végétative (paille) et pour le développement et le remplissage des grains. Ainsi, une

plus grande absorption d'azote favorise à la fois une augmentation du rendement en grains et du rendement en paille, conduisant à un rendement total plus élevé.

Ainsi les travaux de Juste et al (2013) confirment la relation positive entre l'absorption d'azote par les tissus de la céréale tout en assurant une importante croissance végétative et production de biomasse, ce qui contribue à des rendements plus élevés.

Discussion

Le rendement est influencé par plusieurs facteurs, tels que la variété de blé cultivée, les pratiques agronomiques, les conditions climatiques, la disponibilité en eau et en nutriments. Une combinaison optimale de ces facteurs peut entraîner une augmentation significative du rendement du blé.

D'après les résultats des deux régions nous pouvons constater que :

- Le rendement total augmente avec l'augmentation des doses croissantes d'azote apportées, cela est dû à la présence importante de l'azote minéral dans le sol suite à l'apport d'engrais azoté aux stades semis, tallage et début montaison (figure 13 et 14) favorisant une bonne nutrition azotée stimulant une croissance vigoureuse, une augmentation de la biomasse végétale et une amélioration de l'efficacité photosynthétique. Cela se traduit par une augmentation de la production de grains et, par conséquent, du rendement du blé.

En outre, les doses croissantes d'azote permettent aux plantes de maintenir un niveau adéquat de chlorophylle, qui est responsable de la capture de la lumière pour la photosynthèse. Une teneur élevée en azote favorise la synthèse de chlorophylle, ce qui améliore l'efficacité de la photosynthèse et augmente la capacité des plantes à produire des glucides, nécessaires à la formation des grains.

De plus, l'azote favorise le développement du système racinaire, ce qui permet aux plantes d'absorber davantage d'eau et de nutriments du sol, ce qui contribue à une croissance plus vigoureuse et à une meilleure utilisation des ressources. Nos résultats sont similaires avec ceux de Dordas. (2007) qui a montré que l'application d'azote à des doses appropriées peut augmenter significativement le rendement du blé. Il a affirmé que le moment d'application de l'azote a également un impact sur le rendement et la qualité du blé. L'application d'une partie de l'azote au stade de tallage et le reste au stade de montaison s'est avérée bénéfique, avec une amélioration du rendement et de la teneur en protéines du blé.

- Une différence interannuelle dans le rendement (grains et paille) a été constatée dans les deux sites expérimentaux. Cette dernière est en relation directe avec les contraintes abiotiques (Stress hydrique) survenues au cours de la 1^{ère} année de culture. En effet, au mois de Mars (période de la montaison pour la région de Constantine qui coïncide avec une pluviométrie de 0,1 mm), au mois d'avril (période de montaison pour la région de Sétif la pluviométrie était très déficitaire 5.9 mm) et au mois de mai (période de floraison pour la région de Constantine avec une pluviométrie de 6,4 mm et période de remplissage des grains pour la région de Sétif avec une pluviométrie de l'ordre de 9,20 mm), suivit par des températures élevées ce qui a influencé négativement sur le rendement. Mekhlouf et al. (2005) et Bahlouli et al. (2005) ont rapporté que les contraintes abiotiques souvent mises en cause sont les basses températures printanières (gel tardif), la sécheresse (déficit hydrique) et les hautes températures terminales.

Bouzerzour et Dekhili (1995) ont montré que les résultats de plusieurs études s'accordent sur le fait que le rendement grain est un caractère très variable, polygénique de nature, de faible héritabilité et le plus souvent soumis à de fortes interactions génotype x lieux.

Selon Sebillotte (1980), le rendement en grains résulte de la contribution de divers paramètres fixés tout au long de la mise en place des différents stades du cycle de développement dont les principales composantes sont le nombre de grains par m² et le poids moyen d'un grain.

Le remplissage du grain, processus final associé à la performance de rendement, est un déterminant crucial du rendement en grain dans les cultures céréalières. Sebillotte (1980), dans une étude sur l'orge a confirmé que la sensibilité de l'orge au déficit hydrique est particulièrement importante durant la période du remplissage des grains, parce que cette phase de maturation est très sensible au statut hydrique de la plante. Al-Ajlouni et al. (2016), ont signalé une réduction significative de la croissance de l'orge et la durée de remplissage des grains dans les génotypes sensibles à la sécheresse.

3.5.2. Indice de récolte.

Bousba (2012) a indiqué que l'indice de récolte explique clairement la liaison entre la biomasse aérienne et le rendement en grain, car il représente la part de la biomasse produite exprimée en matière sèche qui est valorisée sous forme de grain. De ce fait, l'indice de récolte est une caractéristique importante pour améliorer le rendement grain (Ullah, 2004 ; Joshi et al., 2004).

3.5.2.1. Région de Constantine.

3.5.2.1.1. Effet du facteur traitement sur l'indice de récolte.

La figure 41 qui présente l'effet des doses d'azote sur l'indice de récolte moyen du blé dur pour les trois années de culture montre que les doses D3, D2 et D1 expriment des valeurs importantes respectives de 43.42 % , 42.89 % et 42.88 % pour la année 2016/2017, 58.1 % , 58.2 % et 58.05 % pour la année 2017/2018 58.14 % , 58.42 % et 58.74 % pour la année 2018/2019 (il n ya pas vraiment une proportionnalité entre ce paramètre et les doses d'azote apportées) par rapport à T qui a donné des valeurs successives pour les années 2016/2017, 2017/2018 et 2018/2019 de 39.44 % , 54.69 % et 54.76%. Le tableau 11 en annexes montre un effet très hautement significatif du facteur traitement sur l'indice de récolte ($P < 0.0001$).

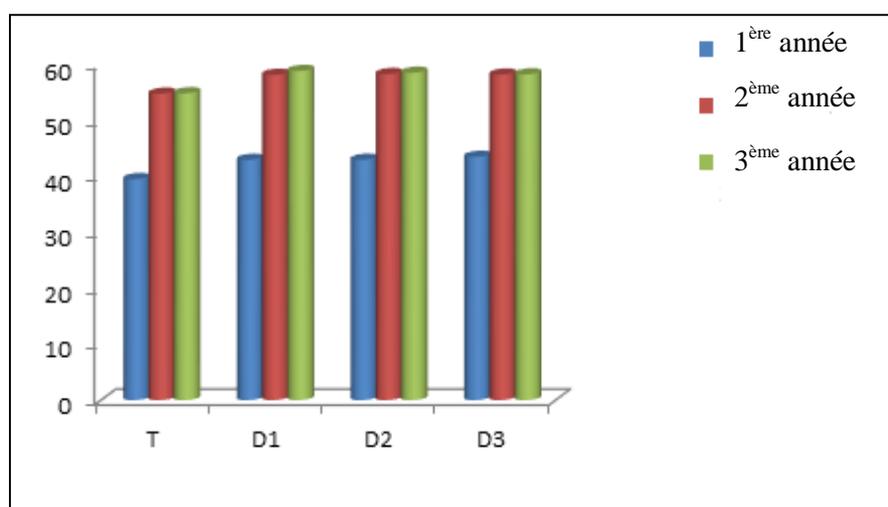


Figure 40. Effet des doses d'azote sur l'indice de récolte moyen du blé dur dans la région de Constantine pour les trois années de culture.

3.5.2.1.2. Effet du facteur année sur l'indice de récolte (IR%).

L'indice de récolte moyen des différentes doses enregistre la plus forte valeur 57.52 % (a) pour la 3^{ème} année de culture, suivie par l'IR de la 2^{ème} année de culture qui est de 57.26 % (b), le plus faible IR a été enregistré la 1^{ère} année de culture qui est de 42.16 % (c) (tableau 11 en annexes).

3.5.2.2. Région de Sétif.

3.5.2.2.1. Effet du facteur traitement sur l'indice de récolte.

L'indice de récolte moyen est proportionnel à la croissance des doses d'azote et le test de Newman et Keuls classe les indices de récolte moyens en 04 groupes homogènes, il est de 49.56 % (a) avec la dose D3 et 48.86 % (b) avec la dose D2, 44.91 % avec D1 et 40.99 % (c) avec T qui présente l'indice de récolte le plus faible (tableau 12 en annexes).

Il est élevé pour la dose D3 il chute avec la décroissance des doses d'azote apportées

L'effet des doses d'azote sur l'indice de récolte moyen du blé dur pour les trois années d'étude illustré par la figure 40 montre que l'indice de récolte moyen augmente avec les doses D3, D2, D1 et en dernier lieu T pour toutes les années avec successivement 45.58 %, 44.49 %, 39.49 % et 35.09 % pour la 1^{ère} année. 51.57 %, 51.65 %, 50.29 % et 44.97 % pour la 2^{ème} année. 51.54 %, 50.45 %, 44.93 % et 42.89 % pour la 3^{ème} année (Figure 42).

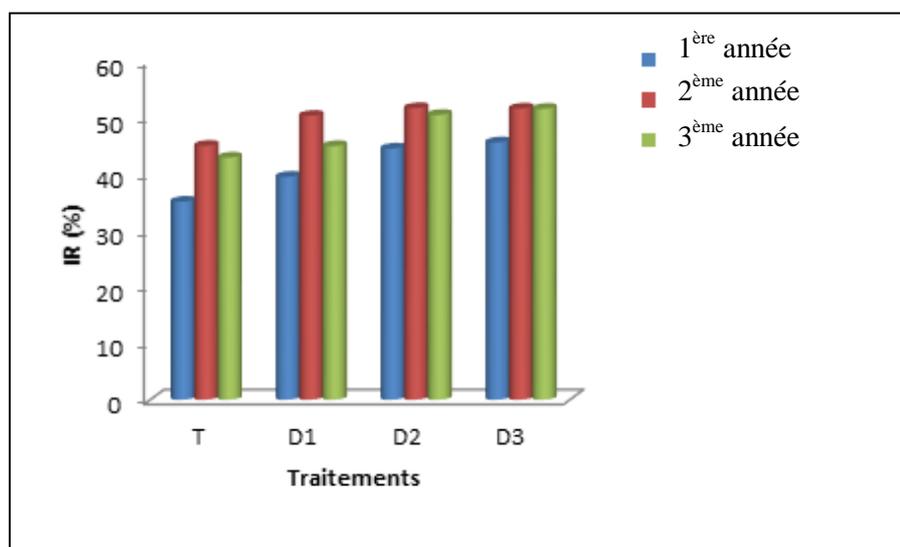


Figure 41. Effet des doses d'azote sur l'indice de récolte moyen du blé dur dans la région de Sétif pour les trois années d'étude.

3.5.2.2.2. Effet du facteur année sur l'indice de récolte (IR%).

L'indice de récolte moyen des différentes doses enregistre la plus forte valeur 49.62 % (a) pour la 2^{ème} année de culture, suivie par l'IR de la 3^{ème} année de culture qui est de 47.45 % (b), le plus faible IR a été enregistré la 1^{ère} année de culture qui est de 41.16 % (c) (tableau 11 en annexes).

Discussion.

L'indice de récolte est un indicateur utilisé en agriculture pour évaluer le rendement potentiel des cultures et de guider les décisions de gestion agricole concernant la fertilisation, l'irrigation, la densité de semis et d'autres pratiques culturales.

Pour les deux régions, il a été remarqué que :

- L'indice de récolte augmente avec l'augmentation des doses d'azote. Cela peut être expliqué par, les doses supérieures à 100 kg d'engrais/ha ont favorisé une croissance végétative vigoureuse du blé, cela permet d'obtenir des plantes plus grandes et plus productives, ont incité la formation et le remplissage des grains, ce qui entraîne une augmentation du rendement en grains et ont stimulé la production de matière sèche, c'est-à-dire la quantité totale de tissus végétaux produits par la plante. Une plus grande biomasse signifie une plus grande quantité de matière récoltable, ce qui contribue à l'augmentation de l'indice de récolte. Ainsi, Wang et al. (2017), ont démontré qu'une fertilisation adéquate en azote peut augmenter l'indice de récolte et améliorer l'utilisation de l'azote, conduisant ainsi à une augmentation du rendement du blé.
- L'indice de récolte diffère suivant les années. Ce qui affirme que la variation des conditions environnementales entre les deux régions influe négativement sur le paramètre IR%. Austin et al. (1980) ont estimé que le maximum théorique possible de l'IR% des variétés du blé se situe à environ 62 %.

Benmahammed et al. (2003) et Bousba (2012) ont confirmé que l'indice de récolte est un indicateur de la capacité du génotype à produire des grains sous les contraintes hydriques auxquelles il est soumis, une valeur élevée de ce rapport signifie que la translocation de photosynthétats vers les sites est bonne et qu'une part importante de ces derniers a contribué au remplissage des grains.

En zone aride, la meilleure adaptation des céréales apparaît liée à un rapport grains sur biomasse élevé (Auriau,1978). Selon Bouzerzour (1998), dans des milieux variables il faut assurer une production de biomasse aérienne suffisante pour garantir un rendement en grain acceptable.

Cependant, Studeto et al., (1986) ont préconisé que la valeur de l'indice de récolte en dessous duquel on ne peut descendre sous l'effet d'une contrainte hydrique puisse être fixée à 17%. L'évitement du manque d'eau serait en relation avec le maintien d'un indice de récolte élevé (Fussel et al.,1991)

En zone aride, la meilleure adaptation des céréales apparaît liée à un rapport grains sur biomasse élevé (Auriau,1978). Selon Bouzerzour (1998), dans des milieux variables il faut

assurer une production de biomasse aérienne suffisante pour garantir un rendement en grain acceptable.

3.5.3. Composantes de rendement.

3.5.3.1. Région de Constantine.

3.5.3.1.1. Effet du facteur traitement sur les composantes de rendement.

La production du nombre de grains/épi est proportionnelle à la croissance des doses d'azote apporté, la D3 affiche la valeur moyenne années la plus importante 36,66 grains/épi (a) suivis par la dose D2 34,11 (b) grains/épi puis la dose D1 avec 27,44 (c) grains/épi par rapport au témoin T qui enregistre le faible nombre de grains/épi avec 21,66 (d) ($P < 0.0001$ tableau 11 en annexes).

La figure 43 présente l'effet des différentes doses d'azote sur les composantes de rendement du blé dur pour les trois années montre que :

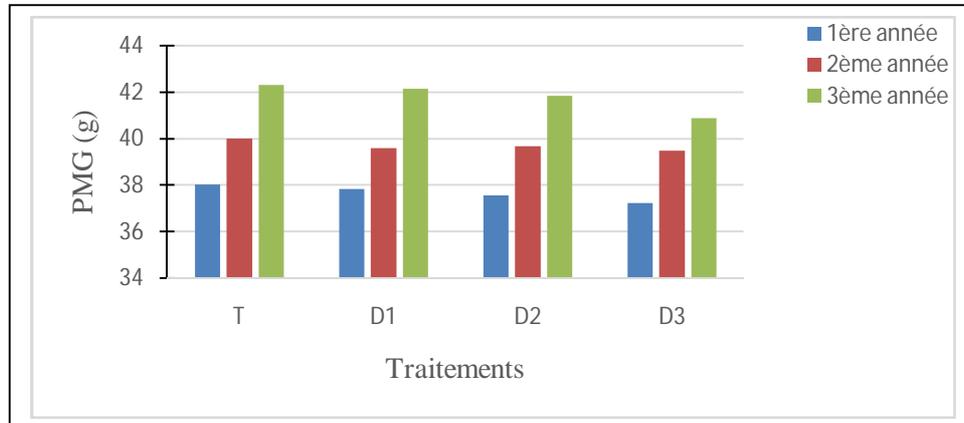
- Pour la 1^{ère}, la 2^{ème} et la 3^{ème} année, la dose D3 extériorise les meilleurs nombres de grains/épi et qui sont de l'ordre de (25.33 grains/épi, 41 grains/épi et 43.66 grains/épi) suivi par D2, D1 puis T qui présente les plus faibles nombres de grains/épi qui sont de (16 grains/épi, 23 grains/épi et 26 grains/épi) respectivement
- Une augmentation de nombre d'épis/m² avec la croissance des doses d'azote, où la dose D3 a enregistré la meilleure valeur avec 128.52, 136.68 et 128.52 épis/m² contre 126.93, 35.33 et 36.33 épis/m² pour la dose D2 et 123.19, 124.75 et 275.11 épis/m² pour la dose D1 et en comparaison avec T qui est de l'ordre de 117.41, 122.83 et 132.87 épis/m².
- Contrairement pour le PMG, la dose d'azote influe inversement sur ce paramètre, autrement dit, qu'au fur et à mesure il ya croissance des doses d'azote, au fur et à mesure il ya diminution du PMG. La dose T affiche la valeur la plus importante du PMG avec en comparaison avec la dose D1, D2 et D3 pour toutes les années de cultures.

3.5.3.1.2. Effet du facteur année sur les composantes de rendement.

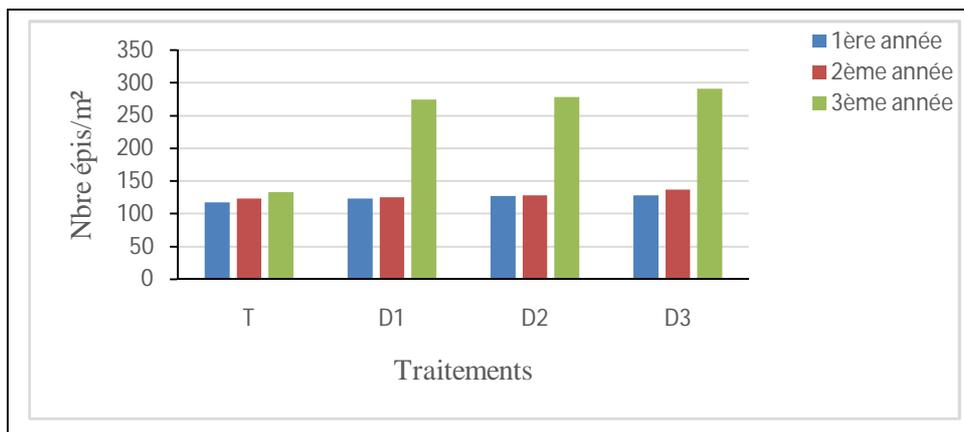
L'année 2018/2019 a permis une meilleure expression des variables suivantes :

- Le PMG avec 41.8 g (a) contre 39.69 g (b), 37.66 g (c) successivement pour les années 2017/2018 et 2016/2017.
- Le nombre d'épis/m² montre une expression de peuplement épis de 244.46 (a) en comparaison avec l'année 2017/2018 avec 128.15 épis/m² (a) et l'année 2016/2017 qui présente un peuplement épi de 124.01 (c) épis/m².

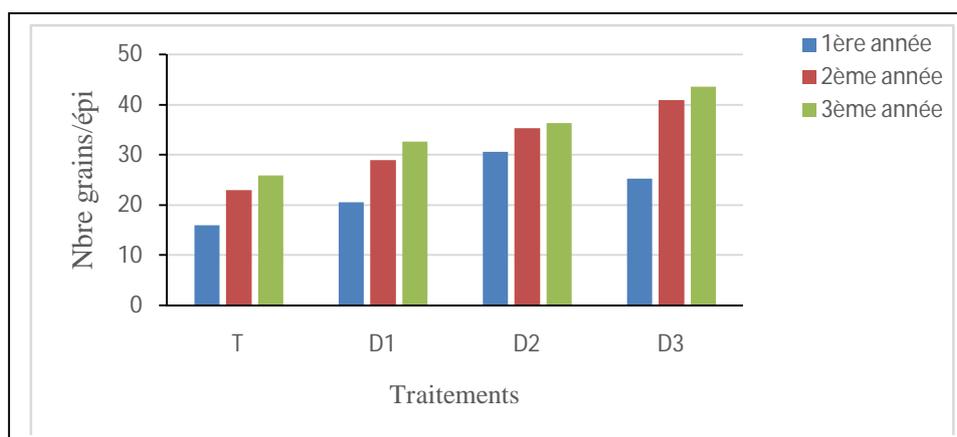
- Un nombre de grains par épi de 34.66 (a) par rapport à celui des deux années 2017/2018 et 2018/2019 avec des valeurs respectives de 32.08 grains/épi (b) et 23.16 grains/épi (d). ($P < 0.0001$ tableau 11 en annexes).



Poids de mille grains (PMG).



Nombre d'épis/m².



Nombre de grains/épis.

Figure 42. Effet des doses d'azote sur les composantes de rendement du blé dur dans la région de Constantine pour les trois années de culture.

3.5.3.2. Région de Sétif.

3.5.3.2.1. Effet du facteur traitement sur les composantes de rendement.

La production du nombre de grains/épi est proportionnelle à la croissance des doses d'azote apporté d'où le test de Newman et Keuls classe les doses par ordre décroissant comme suit la dose D3 avec 25grains/épi (a), la dose D2 avec 22.44 grains/épi (b), la dose D1 avec 19.77 grains/épi (c) par rapport à T avec un faible nombre de grains/épi qui est de 17.66 grains/épi (d). ($P < 0.0001$ tableau 12 en annexes).

La figure 44 de l'effet des différentes doses d'azote sur les composantes de rendement du blé dur montre que :

- Pour les trois années (16/17, 17/18 et 18/19), la dose D3 extériorise les meilleurs nombres de grains/épi et qui sont de l'ordre de (25.33 grains/épi, 41 grains/épi et 43.66 grains/épi) suivi par D2, D1 puis T qui présente les plus faibles nombres de grains/épi.
- Une augmentation de nombre d'épis/m² avec la croissance des doses d'azote, où la dose D3 a enregistré la meilleure valeur.
- Contrairement pour le PMG, la dose d'azote influe inversement sur ce paramètre, autrement dit, qu'au fur et à mesure il ya croissance des doses d'azote, au fur et à mesure il ya diminution du PMG. La dose T affiche la valeur la plus importante du en comparaison avec la dose D1, D2 et D3.

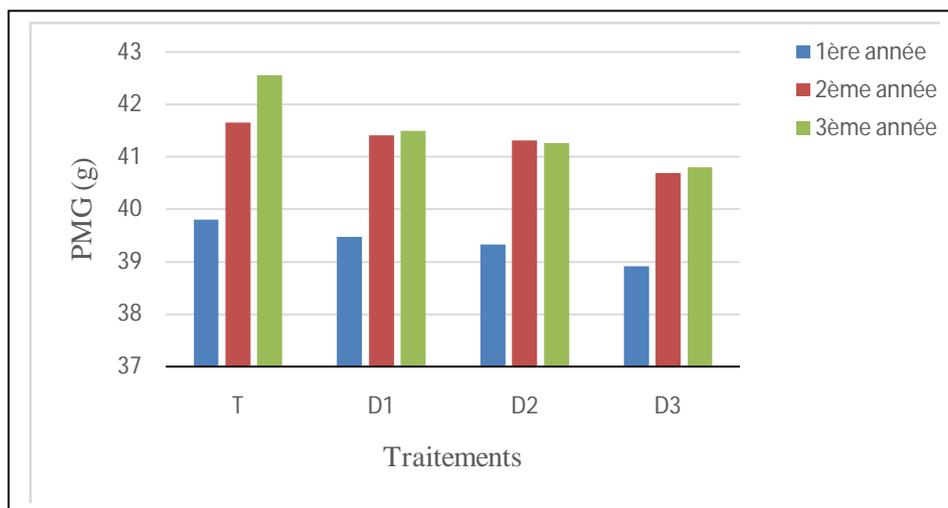
3.5.3.2.2. Effet du facteur année sur les composantes de rendement.

L'année 2018/2019 a permet une meilleure expression des variables suivantes :

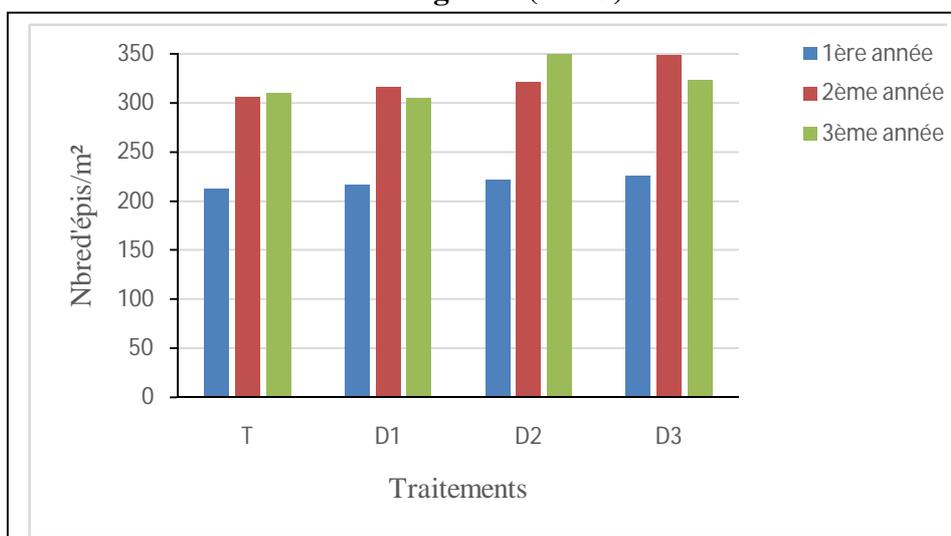
- Le PMG avec 41.8 g (a) contre 39.69 g (b), 37.66 g (c) successivement pour les années 2017/2018 et 2016/2017 (figure 44).
- Le nombre d'épis/m² montre une expression de peuplement épis de 244.46(a) en comparaison avec l'année 2017/2018 avec 128.15épis/m²(a) et l'année 2016/2017 qui présente un peuplement épi de 124.01 (c) épis/m².

Un nombre de grains par épi de 34.66 (a) par rapport à celui de la 2^{ème} et la 3^{ème} année avec des valeurs respectives de 32.08grains/épi (b) et 23.16 grains/épi (d). ($P < 0.0001$ tableau 12 en annexes).

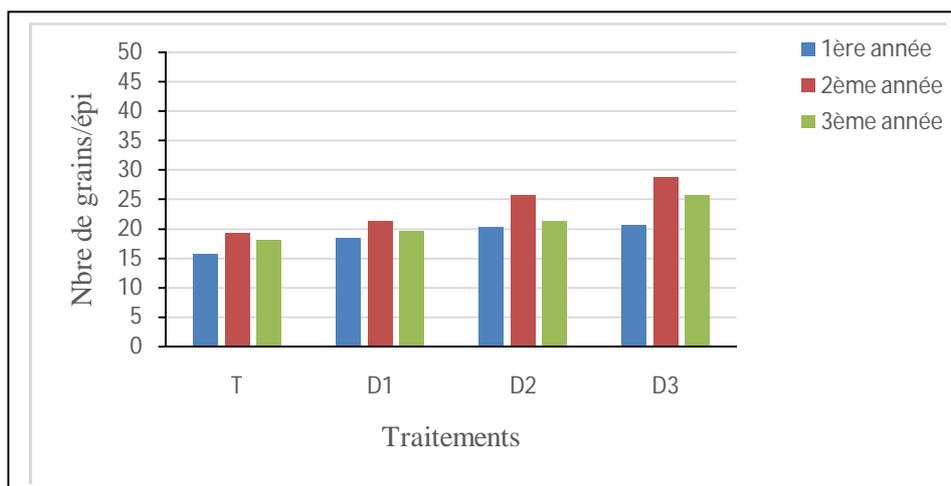
-



Poids de mille grains (PMG).



Nombre d'épis/m².



Nombre de grains/épi.

Figure 43. Effet des doses d'azote sur les composantes de rendement du blé dur dans la région de Sétif pour les trois années de culture.

Discussion

Le rendement du blé est déterminé par plusieurs composantes clés qui contribuent à la production finale de grains. Ces dernières sont influencées par des facteurs tels que la variété de blé, les pratiques agronomiques (fertilisation, irrigation, etc.), les conditions environnementales (climat, sol, etc.) et les interactions entre ces facteurs. Comprendre et optimiser ces composantes de rendement est essentiel pour maximiser la productivité du blé et assurer une production agricole efficace.

Pour les deux régions d'étude, l'azote agit en augmentant le nombre de grains/épi, les traitements ayant reçu des niveaux élevés de fertilisation sont ceux qui ont obtenu le meilleur tallage herbacé, cela est dû à la bonne évolution de l'azote minéral moyen du sol suite à l'ajout de l'azote aux stades propices (figure 13 et 14) qui a favorisé une bonne nutrition azotée stimulant et favorisant à leur tour l'activité photosynthétique dont les produits (assimilats) sont nécessaires à la synthèse d'organes nouveaux. C'est ainsi que les apports importants d'azote favorisent la synthèse de structures végétatives notamment les talles.

Au stade de la montaison, la plante de blé entre dans une phase de transition reproductive, où les épis se forment et les grains commencent à se développer. À ce stade, la demande en azote est plus élevée pour soutenir la formation et le remplissage des grains. En augmentant l'apport d'azote au stade de la montaison, on répond spécifiquement à cette demande accrue en azote, ce qui favorise une meilleure fertilité des épis, une augmentation du nombre de grains et une amélioration du remplissage des grains.

Selon Mosseddaq et Moughli (1999), le nombre de grains par épi est déterminé par le nombre d'épillets potentiels par épi et la fertilité de l'épi. Grignac (1981), note que les valeurs optimales de grains par épi permettant l'obtention des rendements plus élevés, en zone méditerranéenne et en absence de déficit hydrique, oscillent entre 38 et 51 grains par épi. L'azote augmente le nombre de grains par unité de surface à travers l'amélioration du tallage herbacé et épi et le nombre de grains/épis.

D'après Mekliche et Hanifi (1983), le nombre de grains dépend beaucoup plus de la densité de semis que de la dose de l'azote.

Khettal (1995) a affirmé que sur le triticale, l'action des doses croissantes d'azote est positive, elle se traduit par une augmentation du rendement réel en grains sur l'intervalle de 0 à 67 unités/ha.

- L'azote qui a amélioré l'absorption et la remobilisation n'a pas favorisé le remplissage des grains. Pour les deux régions, l'apport de 100 kg d'engrais/ha a permis des poids des grains comparables aux traitements ayant reçu plus d'azote. Ceci est lié tout

d'abord à l'élévation des températures (tableau 1), condition propice au phénomène d'échaudage et à la diminution de l'humidité du sol en fin de cycle exposant la culture à des conditions hydriques défavorables. Nos résultats sont en accord commun avec ceux de Grignac (1981) qui a montré que le PMG diminue considérablement sous l'effet des fortes températures et d'un déficit hydrique au moment du remplissage du grain. Il ajoute que le PMG optimal permettant l'obtention des rendements élevés devrait être au-delà de 48 grammes.

Ainsi Couvreur (1981) a confirmé que le PMG n'est pas indépendant du nombre de grains formés quelque soit le type de génotype ; plus les grains sont nombreux, plus ils sont petits.

Benbalkacem et al. (2000) ont rendis la faiblesse du PMG aux effets de l'environnement. Cependant Fossati (1995) a remis en cause le phénomène de compensation entre ce paramètre et le NG/m² qui varie selon les variétés.

Mossedeq et Smith (1994) ont prouvé la relation inverse entre le PMG et le NE/m² où ils ont montré qu'un apport tardif d'azote augmente le nombre d'épis/m², mais réduit le poids de 1000 grains

L'augmentation du nombre d'épis/m² est proportionnelle avec l'accroissement des doses d'azote, cela peut être attribué à une évolution importante de l'azote minéral moyen du sol (figure 13 et 14) permettant des conditions favorables de la nutrition azotée suite à l'apport de l'azote aux stades critiques de développement de la céréale, surtout (stade tallage épi 1cm) qui est un stade clé pour la formation des talles et qui va favoriser l'augmentation du nombre d'épis/m² ainsi que l'effet de l'humidité et de la température sur la minéralisation de l'azote à ce stade de la culture (figure 15). Nos résultats s'accordent avec ceux de Bouzerzour et Oudina, (1989) et Zair (1994) par mètre carré dépend en premier lieu du facteur génétique, de la densité de semis, de la puissance du tallage, elle-même conditionnée par la nutrition azotée et l'alimentation hydrique de la plante pendant la période de tallage

Grignac (1981), affirme qu'en conditions de déficit hydrique, le nombre d'épis au mètre carré ne doit pas atteindre des valeurs très élevées. Selon (Gate et al., 1992), le nombre d'épis subira une forte diminution si le déficit hydrique intervient durant la phase de montaison. À partir de 550 épis/m² chez le blé tendre et 480 épis/m² chez le blé dur, les rendements ont tendance à diminuer.

Les 3 années diffèrent fortement pour l'expression de l'ensemble des caractères.

-La diminution du nombre de grains/épi peut être attribuée à un nombre réduit de talles et de grains fertiles et à un poids de 1000 grains faible. De même Samarah, (2005), a observé, dans des conditions de sécheresse, une réduction significative du rendement en grains de

l'orge (*Hordeum vulgare* L.), principalement en raison d'un plus petit nombre de talles et de grains fertiles et d'un faible poids de 1000 grains.

Ainsi, Geslin et Jonard (1948) in Boiffin (1981) ont noté qu'à la fin juin, pendant le palier hydrique, des températures maximales supérieures à 30°, susceptibles de provoquer l'échaudage des grains.

Un déficit hydrique après la fécondation réduit la taille des organes et si elle se poursuit pendant la phase de remplissage, elle affecte leur composition. Les différents métabolismes étant inégalement affectés par le déficit hydrique, les concentrations relatives des différents composés sont modifiées : un manque d'eau induit généralement une baisse des teneurs en amidon et en huile des graines, et une augmentation des teneurs en protéines (Hireche, 2006).

Un déficit hydrique précoce affecte en parallèle la croissance des racines et des parties aériennes, le développement des feuilles et des organes reproducteurs (Debaeke et al., 1996).

Au stade montaison le stress hydrique se traduit par la chute du nombre d'épis produits par mètre carré suite à la régression intense des talles et la baisse du nombre de grains par épi.

Ceci se répercute sur le rendement économique de la culture, qui peut baisser de plus de 80 % (Chenaffi et al., 2006).

Selon Jouve et Daoudi (1984), les principales conséquences de la sécheresse survenant durant la période fin-montaison début épiaison, sont la réduction du nombre d'épis par unité de surface et du nombre de grains par épi. Également, une carence en azote aux alentours de la fécondation réduit le nombre de grains par épi en augmentant le nombre de fleurs avortées (Taureau, 1987 ; Gate, 1995).

Pour l'année 2016/2017 le stress hydrique a un effet négatif sur les composantes de rendement (le nombre des épis/m², le nombre de grains par épi et le poids de 1000 grains).

Ce PMG important pour la 3^{ème} année et la 2^{ème} année peut être attribué aux conditions favorables de croissance subie en fin de cycle. Contrairement à celui de la 1^{ère} année qui a présenté le plus faible PMG et qui peut être expliqué par l'action négative des hautes températures qui sont observées en fin de cycle de la céréale, sur la vitesse et la durée de remplissage du grain (tableau 1). Cela a été confirmé par Couvreur (1985), en garantissant que le poids de 1000 grains dépend de la phase de remplissage des grains, des conditions de l'alimentation hydrique et du niveau des températures de l'air. Une forte évapotranspiration potentielle ou des températures élevées pendant le mois précédant l'épiaison induisent la formation de petits grains.

À son tour Meynard (1987) a affirmé que lorsque le remplissage du grain se fait dans des conditions de croissance favorables, le poids de l'épi au stade épiaison est un bon indicateur du rendement potentiel attendu.

Le remplissage du grain est dépendant de l'activité photosynthétique après le stade épiaison. Le déficit hydrique lors de la floraison ou le début du remplissage affecte le poids du grain par l'inhibition de la translocation des assimilats des parties végétatives vers les épis (Wang et al.,2005).

Ce qui est confirmé aussi par Couvreur (1985), en affirmant que le poids de 1000 grains dépend de la phase de remplissage des grains, des conditions de l'alimentation hydrique et du niveau des températures de l'air. Une forte évapotranspiration potentielle ou des températures élevées pendant le mois précédant l'épiaison induisent la formation de petits grains.

Conclusion partielle.

Concernant le rendement et ses composantes, la fertilisation azotée a affecté tous les paramètres de rendement sous les conditions de conduite de l'essai. Les températures minimales et le cumul pluviométrique enregistrés durant les deux années humides sont supérieurs à ceux de la 1^{ère} année ont favorisé la transformation de l'engrais fractionné en trois apports et son assimilation par le blé dur.

En effet, le stress hydrique est le principal facteur limitant la production de la culture du blé dur dans les régions semi-arides en raison des précipitations faibles et incertaines et la gravité des effets causés dépend de l'intensité du stress et du stade de développement de la culture. Ces résultats indiquent que ce n'est pas uniquement l'effet année qui affecte le rendement et ses composantes, ces derniers diffèrent d'une façon significative sous l'effet région et doses croissantes de l'azote.

Les rendements étaient proportionnels avec la croissance de la dose d'azote, mais ça n'a pas vraiment reflété la quantité d'azote apportée par rapport au rendement obtenu, si nous prenons les rendements de la année la plus productive (2^{ème} année), comme exemple, les rendements grains obtenus dans cette année, respectivement pour la région de Constantine et celle de Sétif, nous a amené de penser que mieux accepter le rendement de la dose D1 (47.94 qha⁻¹ et 32.09qha⁻¹) dont l'apport d'azote est de 100 kg ha⁻¹ ou celui de D2 (49qha⁻¹, 34.86 qha⁻¹) dont la dose d'azote apportée est de 150kg ha⁻¹ avec un écart de rendement grains avec le témoin est de 9 à 10qha⁻¹ et 8 à 10qha⁻¹, cela est beaucoup mieux d'apporter une dose D3 (200 kg d'N pour une production de 49.76 qha⁻¹ et 36.38qha⁻¹ d'un écart de rendement qui avoisine les 11 qha⁻¹ et 12 qha⁻¹ seulement avec le témoin T=38.65qha⁻¹ et 24.45qha⁻¹.

En ce qui concerne les paramètres CAU, IRN et EUA et à travers nos résultats réalisés durant les trois années d'étude au niveau des deux sites sis à Constantine et Sétif qui mettent en relation le rendement et la quantité d'azote appliquée, nous pouvons conclure que :

- Le traitement D1 et D2 ont exprimé un IRN important reflétant l'efficacité de l'incorporation de l'azote dans la biomasse végétale et une efficacité de remobilisation de l'azote vers les grains.
- La dose D2 (apport de 150 kg d'engrais/ha) a exprimé les meilleures quantités d'azote absorbées que ce soit pour les grains ou pour la paille par rapport aux autres traitements.

D'un autre côté, l'EUN est faible et varie entre 30,5 et 46,01 kg de grains/kg d'azote, pour Constantine et 33 et 35.6 kg de grains/kg d'azote, pour Sétif (années humides) et 21,7 kg pour Constantine de grains/kg d'azote et 20,8 kg de grains/kg d'azote, pour Sétif (année sèche). Ce niveau d'efficacité d'utilisation d'azote est notoirement bas témoignant d'un faible niveau de gestion de l'azote pour les doses D2 et D3 ce qui participe pleinement à l'écart des rendements observés (D2 et D3 par rapport à T).

En outre, et dans le but d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'azote (c.-à-d. l'amélioration du ratio entre azote des produits finis et azote nécessaire à la production) par le blé dur, il est indispensable de gérer la fertilisation azotée en synchronisant les dates et la quantité de l'apport azoté avec les besoins de la plante en tenant compte de l'aspect variétal, et ceci en relation avec la variabilité des pratiques et des situations culturales tout en utilisant des outils d'aide à la décision comme le SPAD afin de réussir cette synchronisation. Dans notre cas la variété expérimentée (Waha) est une variété productive, cependant, les niveaux de l'EUA restent faibles en liaison avec le paquet technique et les conditions de la culture (2^{ème} et 3^{ème} année).

Ces outils vont améliorer sans doute cette efficacité et par conséquent le rendement tout en préservant l'environnement, donc, l'enjeu est de taille tant pour le rendement que pour l'environnement.

Pour améliorer le rendement économique (coût de production bas) et de s'orienter peu à peu vers un système agroécologique, il est judicieux de prendre en compte la fourniture du sol en azote dans le programme de fertilisation.

La relation entre l'eau et l'azote dans le sol est importante puisqu'elle conditionne l'utilisation de l'azote par les cultures dans la région semi-aride.

Pour augmenter l'EUA, il faut améliorer la gestion des rotations des cultures et de la couverture du sol par les résidus de cultures.

L'intérêt de l'introduction des espèces appartenant à la famille des légumineuses réside dans leur rôle fertilisant des sols pauvres en éléments azotés comme les régions arides et semi-arides et à la capacité de quelques légumineuses à solubiliser des phosphates de calcium et le phosphore occlus par leurs exsudats racinaires (Arihara et Ohwaki, 1989 ; Gardener et al, 1981; Subbarao et al, 1997). Le pouvoir fertilisant des légumineuses est le résultat d'une association symbiotique entre les racines de la majorité des espèces de cette famille et la bactérie du sol appelée *Rhizobium* sp. En effet, la symbiose *Rhizobium*- légumineuse fixe 35 x 10 tonnes d'azote/an (Hardy et Hoolsten, 1977). Selon Niftal (1985) les légumineuses fixent annuellement 80 millions de tonnes d'azote atmosphérique.

Un autre facteur non négligeable qui présente un rôle judicieux dans l'augmentation des rendements du blé dur et dans l'amélioration de l'EUN, c'est l'irrigation d'appoint qui reflète le rôle primordial de l'eau pour l'élaboration du rendement du blé dans la région semi-aride.

2e partie. Évaluation de l'indicateur de la nutrition azoté.

Introduction.

La céréaliculture algérienne est située en grande partie dans la zone semi-aride où peu de pluviométrie est disponible avec une répartition inégale et irrégulière durant la saison de croissance des cultures. Le manque d'humidité adéquate menant à un stress hydrique est un phénomène fréquent dans la région semi-aride, provoqué par des pluies peu fréquentes qui affecte le rendement. Ces tendances interagissent avec la gestion de la fertilisation azotée. Entre une efficacité d'utilisation d'azote par les plantes et les pertes d'azote dans le système (lixiviation, volatilisation...), le pilotage de l'azote devient une nécessité impérieuse dans la pratique de la fertilisation. Dans ce contexte, le recours à des outils de pilotage de la fertilisation comme **indicateur de la nutrition azotée de la plante**, le chlorophylle-mètre s'affiche comme une stratégie intéressante pour adapter les pratiques agricoles (AFOM, 2016).

La photosynthèse – est donc complètement dépendante de la teneur en azote des plantes pour sa synthèse. C'est d'ailleurs pour ça que certaines technologies numériques mesurent l'intensité chlorophyllienne des plantes comme un moyen détourné d'avoir accès à leurs carences et/ou statut azoté.

D'après Gras et al. (1989), un indicateur est une variable qui synthétise une information au sujet d'une autre variable plus difficile d'accès afin d'aider un utilisateur dans son action.

Pour choisir ou créer un indicateur, il est indispensable d'identifier les utilisateurs finaux à qui il est destiné, de définir les objectifs de l'utilisation de cet indicateur, et de

préciser les échelles spatiale et temporelle auxquelles il devra être calculé (Bockstaller et al., 2008 ; Carof et al., 2013). En effet, le choix d'un indicateur agro-environnemental sera différent pour l'agriculteur qui souhaite faire évoluer ses pratiques culturales, pour le consommateur qui veut s'informer sur l'impact environnemental des produits qu'il achète ou pour le décideur qui évalue des politiques agricoles et environnementales (Zahm, 2011).

3.2. Évaluation des indicateurs de la nutrition azotée.

La teneur en chlorophylle est un paramètre biochimique essentiel pour le suivi des différents stades de croissance des cultures, ainsi que pour l'estimation des rendements des céréales en agriculture.

3.2.1. Région de Constantine.

3.2.1.1. Effet du facteur traitement sur l'indice de teneur de chlorophylle des feuilles aux différentes dates de mesure.

Nos résultats confirmés par des analyses statistiques illustrés par le tableau 13 en annexes montrent que les lectures au chlorophylle-mètre sont très hautement significativement différentes selon la dose d'azote apportée et pour les trois stades (date de mesure). Au stade début montaison et à la floraison, la teneur en chlorophylle est liée positivement à cet apport d'azote puisque les valeurs élevées correspondent aux traitements fortement fertilisés.

Selon le tableau 13 en annexes et la figure 45, la dose D3 extériorise une teneur moyenne en chlorophylle la plus forte soit une valeur de 39.03 SPAD et 37.49 SPAD au stade début montaison (respectivement pour la 2^{ème} et la 3^{ème} année). Cependant à la mi-montaison la chlorophylle n'a pas été influencée par l'augmentation des doses des traitements azotés où la dose D2 a exprimé la teneur moyenne de chlorophylle la plus élevée, avec 38.4 SPAD, 45.6 SPAD et 44.72SPAD, pour successivement la 1^{ère}, la 2^{ème} et la 3^{ème} année. Au stade floraison, la dose D3 enregistre les valeurs les plus élevées avec 35.48SPAD (1^{ère} année), 44.83SPAD (2^{ème} année) et 43.23SPAD (3^{ème} année) par rapport aux autres traitements.

3.2.1.2. Effet du facteur année sur l'indice de teneur de chlorophylle des feuilles aux différentes dates de mesure.

Le tableau 13 en annexes de l'analyse de variance montre que l'effet année influence très positivement la teneur moyenne en chlorophylle ($P < 0.0001$) pour toutes les dates de mesures. Les années humides (2^{ème} et 3^{ème} année) ont exprimé des teneurs moyennes élevées en chlorophylle 34,23 SPAD (a) et 33,26 SPAD (b) successivement pour la première date de mesure (début montason), 44.47 SPAD (a) et 43.36SPAD (b) pour la deuxième date de

mesure (mi-montaison) et 42 SPAD (a) et 41.22SPAD (a) pour la troisième date de mesure. En contrepartie, l'année sèche a affiché des teneurs moyennes en chlorophylle basse pour les trois dates de mesures 29.65 SPAD (c), pour le stade début montaison, 37.37 SPAD (c) et 33.47 SPAD (c), pour le stade floraison.

3.2.2. Région de Sétif.

3.2.2.1. Effet du facteur traitement sur l'indice de teneur de chlorophylle des feuilles aux différentes dates de mesure.

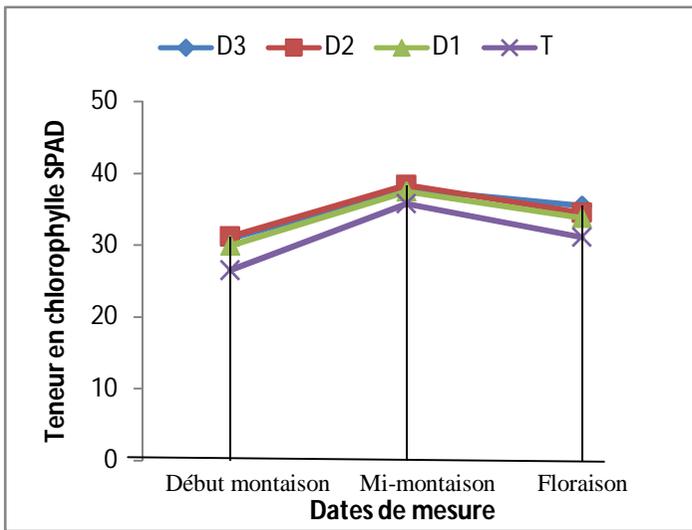
Nos résultats confirmés par des analyses statistiques illustrés par le tableau 14 en annexes montrent que la lecture du chlorophylles-mètre est très hautement significativement différente selon la dose d'azote apportée et pour les trois stades (date de mesure). Au stade début montaison et à la floraison, la teneur en chlorophylle est liée positivement à cet apport d'azote puisque les valeurs élevées correspondent aux traitements fortement fertilisés.

Selon le tableau 14 en annexes et la figure 45, la dose D3 a exprimé une teneur moyenne en chlorophylle la plus forte avec une valeur de 31.2 SPAD, 38.7SPAD et 37.12SPAD au stade début montaison (respectivement pour la 1^{ère}, la 2^{ème} et la 3^{ème} année).

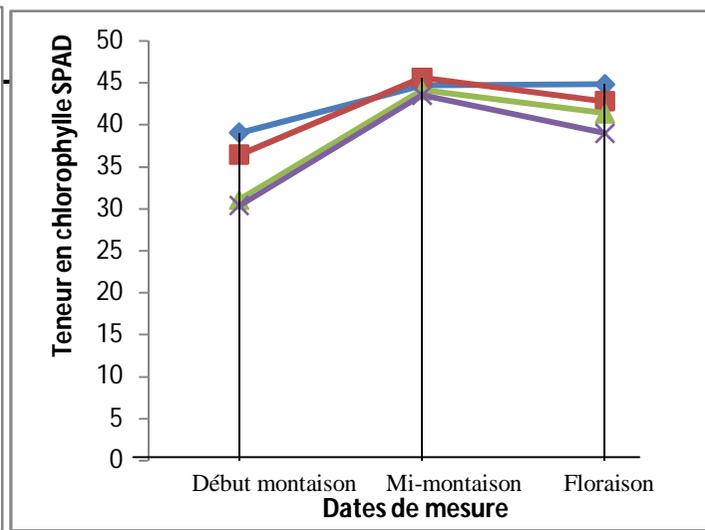
Cependant à la mi-montaison, la chlorophylle n'a pas été influencée par l'augmentation des doses des traitements azotés où la dose D2 a affiché la teneur moyenne de chlorophylle la plus élevée, avec 38.05 SPAD, 44.98SPAD et 44.34SPAD, pour successivement la 1^{ère}, la 2^{ème} et la 3^{ème} année. Au stade floraison, la dose D3 enregistre les valeurs les plus élevées avec 34.78SPAD (1^{ère} année), 44.33SPAD (2^{ème} année) et 42.54SPAD (3^{ème} année) par rapport aux autres traitements.

3.2.2.2. Effet du facteur année sur l'indice de teneur de chlorophylle des feuilles aux différentes dates de mesure.

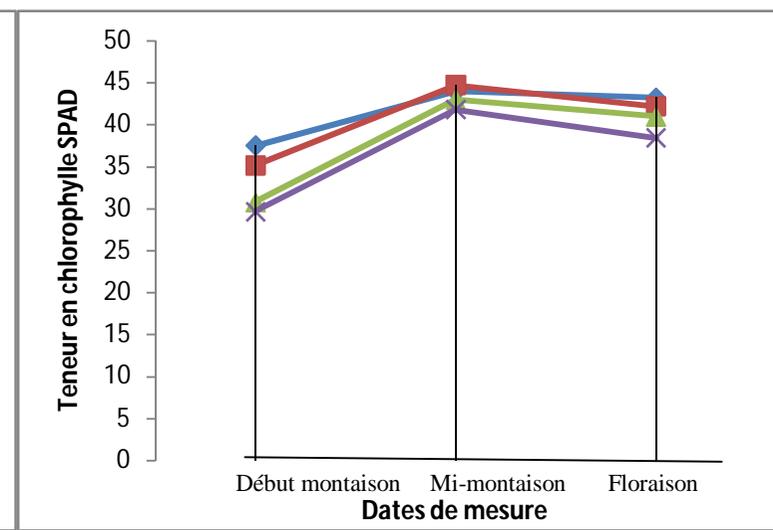
Le tableau 14 en annexes de l'analyse de variance montre que l'effet année influence très positivement la teneur moyenne en chlorophylle ($P < 0.0001$) pour toutes les dates de mesures. Les années humides ont extériorisé des teneurs moyennes élevées en chlorophylle 33,98 SPAD (a) et 32,94 SPAD (b) successivement pour la première date de mesure (début montaison), 44.05 SPAD (a) et 43.03SPAD (b) pour la deuxième date de mesure (mi-montaison) et 41.62 SPAD (a) et 40.77SPAD (a) pour la troisième date de mesure. En contrepartie, l'année sèche a affiché des teneurs moyennes en chlorophylle basses pour les trois dates de mesures 29.38 SPAD (c), pour le stade mi-montaison, 37.11 SPAD (c) et 32.98 SPAD (c).



1^{ère} année.

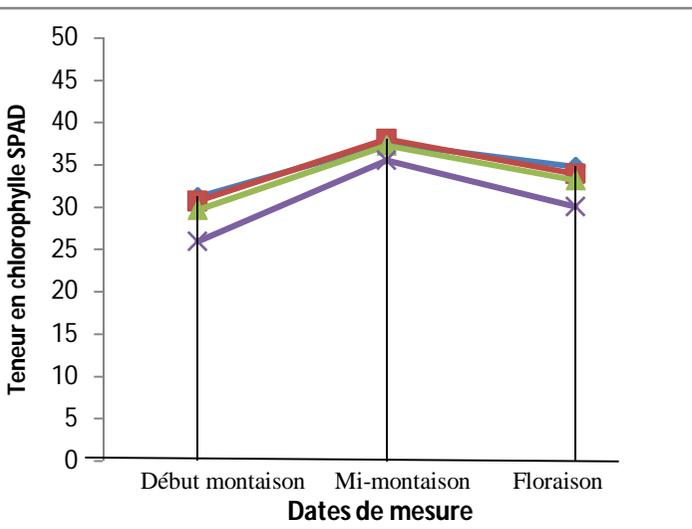


2^{ème} année.

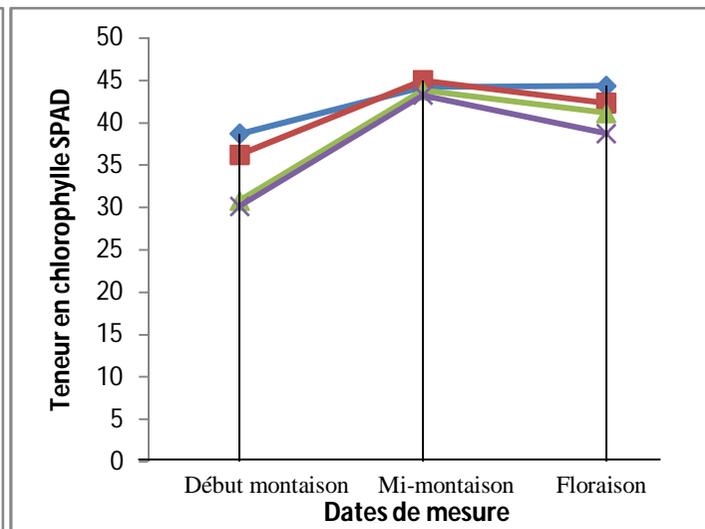


3^{ème} année.

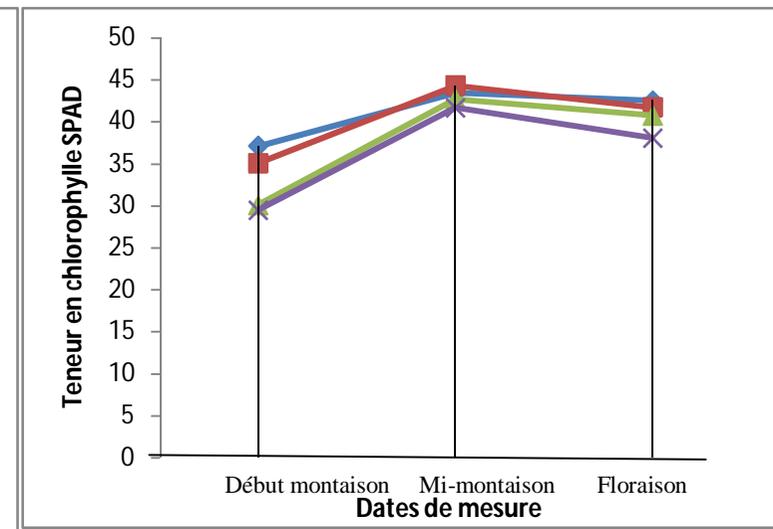
Région de Constantine.



1^{ère} année.



2^{ème} année.



3^{ème} année.

Région de Sétif.

Figure 44. Valeurs moyennes de la teneur en chlorophylle des feuilles en fonction des doses d'azote et la date de mesure.

Dans les deux régions d'étude (Mi-montaison et floraison)

Discussion.

La chlorophylle est un pigment essentiel présent dans les plantes, responsable de la photosynthèse, le processus par lequel les plantes convertissent l'énergie lumineuse en énergie chimique. La chlorophylle est responsable de la couleur verte des feuilles et joue un rôle crucial dans la capture de la lumière et la production de molécules organiques nécessaires à la croissance et au développement des plantes.

La mesure de la chlorophylle peut fournir des informations précieuses sur l'état physiologique des plantes, leur santé et leur fonctionnement. L'utilisation d'un chlorophyllemètre est l'une des méthodes couramment utilisées pour évaluer la concentration en chlorophylle dans les tissus végétaux de manière rapide et non destructive.

Au stade B et à la floraison, c'est l'apport de 200 kg d'engrais/ha qui a présenté la teneur moyenne de la chlorophylle la plus forte.

À la mi-montaison la chlorophylle n'a pas été influencée par l'augmentation des doses des traitements azotés où la dose D2 a exprimé la teneur moyenne de chlorophylle la plus élevée, cela peut être expliqué par l'importante quantité d'azote absorbé par les tissus de la plante et qui est bien influencée par la nutrition azotée ou du moins par la dose d'apports d'azote. Ces résultats montrent que plus le sol est pourvu en azote, plus ce dernier est prélevé en grande quantité.

Nos résultats sont concordants avec ceux de Moughli (2010) qui a montré que la teneur en chlorophylle des feuilles s'est distinguée par une augmentation dans les doses croissantes d'azote. Il attribue cette augmentation à la localisation de la majorité de l'azote dans les molécules de chlorophylle, ce qui exprime la bonne corrélation entre la teneur de la feuille en chlorophylle et sa teneur en azote. Zhang et al. (1997) à leur tour ont montré que la fertilisation azotée stimule la synthèse de la chlorophylle, mais non la photosynthèse. Ainsi, Erne et Lannoye (1991) ont confirmé que l'altération de l'état physiologique des plantes, causée par des conditions défavorables de l'environnement, se reflète rapidement au niveau des signaux lumineux et thermiques émis par les feuilles.

La teneur moyenne de la chlorophylle a augmenté pour tous les traitements entre stade B et la mi-montaison du fait de l'augmentation de la surface foliaire et donc de l'activité chlorophyllienne. Ainsi, Olesen Jorgen et al. (2002) ont démontré que la biomasse sèche résulte de la conversion du rayonnement lors des processus de la photosynthèse. Ils ont assuré que l'ensemble des activités liées à cette dernière est influencé par l'azote. Or, une carence en azote se traduit par une diminution de la biomasse en affectant les phénomènes de conversion du rayonnement, et en particulier la mise en place de la surface foliaire/m² qui elle même

dépend de nombreux paramètres tel le nombre de plantes/m², de talles/plantes, de feuilles/par talle, de la surface de chaque feuille (Bélangier et al., 1992 ; Plénet, 1995) ainsi que du processus de sénescence des feuilles. Gastal et Nelson (1994) ; Triboï et Ntonga (1993) ; Yang et Zhang (2006) et Kichey et al., 2007 indiquent qu'un apport en azote augmente la surface foliaire, la concentration en chlorophylle, et la durée de vie des feuilles.

Les années humides ont exprimé des teneurs moyennes élevées en chlorophylle par rapport aux années sèches, ainsi Bousba et al. (2009), indiquent qu'une diminution de la teneur en chlorophylle est remarquée chez le blé dur sous stress hydrique. Aussi, la variété qui accumule plus de protéine est celle aussi qui a la plus forte diminution de la chlorophylle. La réduction de la teneur en chlorophylle est attribuée aux cultivars qui sont moins résistants à un effet de manque d'eau (Kiliç et Yağbasanlar, 2010 ; Khayatnezhad et al., 2011). Les auteurs rappellent l'utilité de l'eau dans la synthèse de la chlorophylle. La teneur en chlorophylle des feuilles est fonction de nombreux facteurs, d'une part de l'âge des feuilles, de la position des feuilles, et d'autre part, des composantes environnementales par la lumière, la température et par l'eau (Hikosaka et al., 2006). Toutefois, le stress hydrique est l'une des principales contraintes qui affecte le niveau de la teneur en chlorophylle chez la plante (Mingcai et al., 2007 ; Kiliç et Yağbasanlar, 2010 ; Khayatnezhad et al., 2011).

3.2.1.4. Relation entre l'indice de chlorophylle -quantité d'azote assimilé dans les tissus de la plante pour les trois dates de mesures.,

Pour connaître avec précision la relation chlorophylle-quantité d'azote assimilé dans les tissus de la plante, nous avons étudié séparément l'effet de chaque dose pour les trois dates de mesure (début montaison, mi-montaison et floraison) et pour les trois années.

Si nous prenons un exemple lecture SPAD en relation avec N-végétal en fonction des différents stades de végétation (figure 46 et 47) : nous remarquons une forte corrélation entre stade tallage avec ($R^2=0.77$, $R^2=0.82$ et $R^2=0.91$), respectivement pour la 1^{ère}, la 2^{ème} et la 3^{ème} année et et le stade floraison avec ($R^2=0.80$, $R^2=0.82$ et $R^2=0.78$), respectivement pour la 1^{re}, la 2^e et la 3^e année par rapport à l'expression de la chlorophylle, cependant, au stade mi-montaison la relation est moins importante avec ($R^2=0.59$, $R^2=0.21$ et $R^2=0.38$), respectivement pour la 1^{re}, la 2^e et la 3^e année, ceci est probablement dû au fait qu'il y a une forte absorption de N par le végétal alors que ce dernier n'est pas encore bien reparti dans tout le végétal, ce qui explique la faible relation entre N-végétal et la couleur de la chlorophylle

En d'autres termes, la faible corrélation entre la lecture SPAD et la teneur en azote végétal au stade de mi-montaison peut être attribuée à une distribution inégale de l'azote dans la plante à ce stade de croissance. Cela souligne l'importance de prendre en compte le stade de croissance spécifique (stade floraison) de la plante lors de l'utilisation de la lecture SPAD comme indicateur de la teneur en azote végétal.

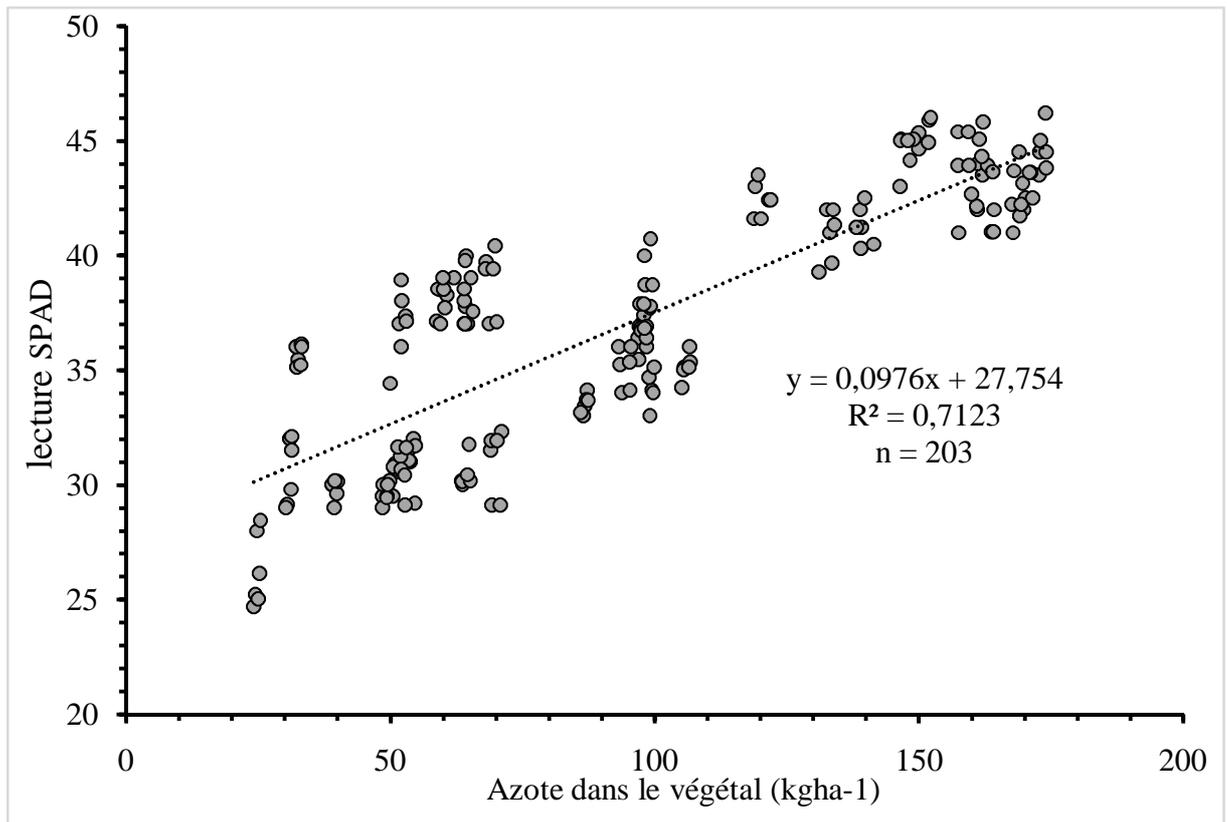


Figure 45. Relation entre la quantité d'azote assimilé dans les tissus de la plante et la chlorophylle pour les trois dates de mesures et pour les trois années d'étude des deux régions (Constantine et Sétif).

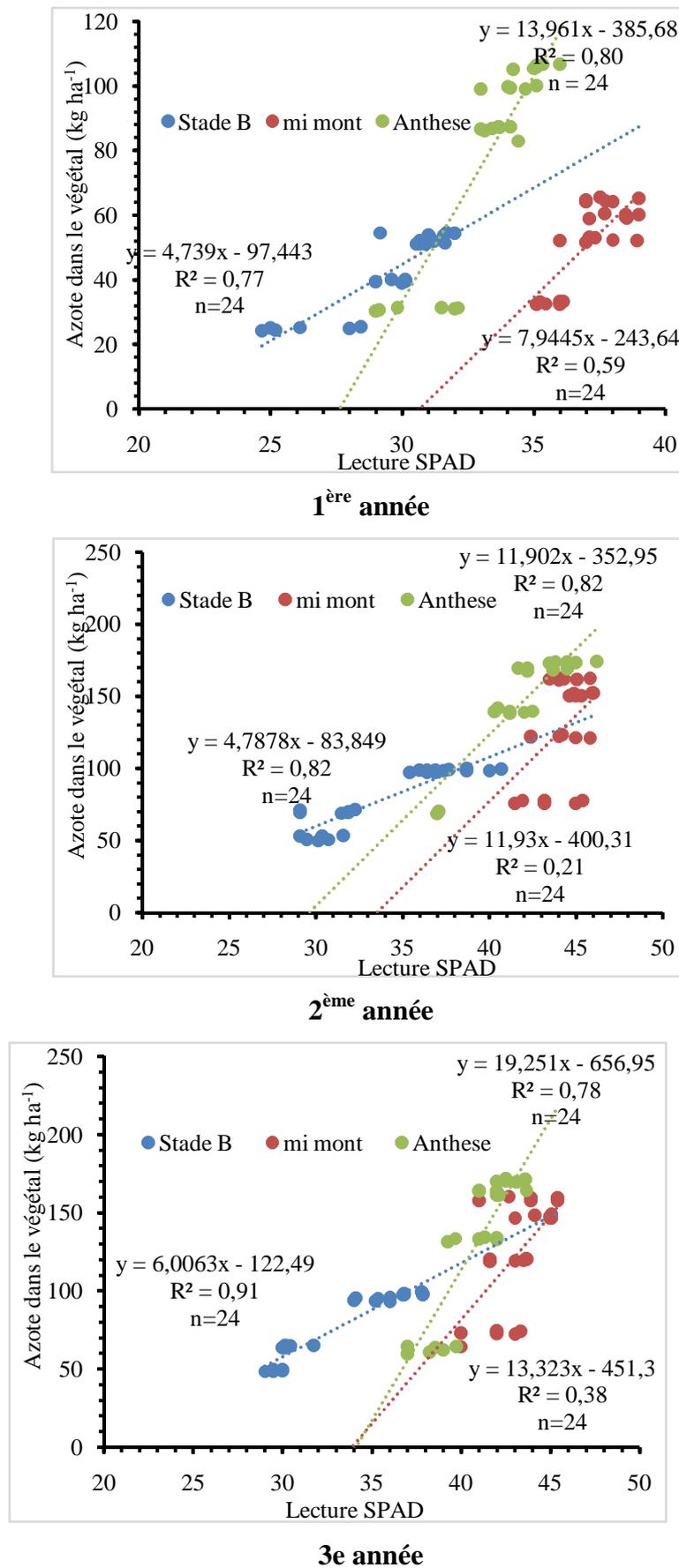


Figure 46. Relation entre la quantité d’azote assimilé dans les tissus de la plante et la chlorophylle pour les trois dates de mesures et pour les trois années d’étude.

La teneur en chlorophylle des feuilles s'est distinguée par une augmentation dans les doses croissantes d'azote. Cette augmentation pourrait être attribuée à la localisation de la majorité de l'azote dans les molécules de chlorophylle, ce qui exprime la bonne corrélation entre la teneur de la feuille en chlorophylle et sa teneur en azote Moughli, (2010). Un apport en azote augmente la surface foliaire, la concentration en chlorophylle, et la durée de vie des feuilles (Gastal et Nelson, 1994 ; Triboï et Ntonga, 1993 ; Yang et Zhang, 2006 ; Kichey et al., 2007).

Les teneurs moyennes en chlorophylle des feuilles au stade début montaison (stade B), ont présenté des meilleures corrélations que la mi-montaison, résultant du fait de l'importance de l'absorption d'azote entre le stade B et la mi-montaison dans l'élaboration du rendement.

L'azote qu'on le trouve dans la sève agit sur le remplissage des grains à travers les assimilés provenant de la photosynthèse. L'azote absorbé n'agit donc pas directement sur les grains, mais agit en stimulant la photosynthèse et à travers la production d'assimilés.

Au stade début montaison l'azote absorbé par les tissus de la plante est lié à la production de la paille. Les structures végétatives (feuilles, talles, tiges) qui donnent lieu à la paille, voient le maximum de leur croissance entre le stade tallage et la fin de la montaison. Ainsi l'azote absorbé au stade début montaison (stade B) déterminera mieux le niveau de production que celui de la mi-montaison. Donc pour évaluer la production de la paille, la détermination de l'azote de la sève doit se faire au stade début montaison ou même au stade tallage.

Ainsi Corbeels et al. (1998) a rapporté que les besoins en azote du blé sont plus marqués au stade épi 1 cm qui veut dire qu'au cours de la période montaison qui débute au stade épi 1cm et prend fin à l'épiaison (avant la floraison), la croissance des jeunes organes nécessite une forte consommation d'azote servant pour une plus grande surface foliaire interceptant plus de lumière (Lemaire et Gastal, 1997 ; Demotes Mainard et Jeufroy, 2004).

3.2.1.6. Relation entre l'indice de chlorophylle –rendement du blé dur pour les trois dates de mesures.

Les équations de régression linéaire et les statistiques associées à chaque stade (Figure 48 et figure 1 en annexes) indiquent une relation positive entre la chlorophylle et le rendement de blé.

Cependant, la force de la corrélation varie légèrement entre les stades de croissance ($R^2=0.93$, $R^2=0.81$ et $R^2= 0.79$), respectivement avec les stades tallage, mi-montaison et floraison avec une corrélation plus forte au stade de tallage, suivi du stade de mi-montaison et enfin du stade de floraison.

La variation de la force de corrélation entre les stades de croissance peut être expliquée par des facteurs biologiques et physiologiques propres à chaque stade de développement du blé.

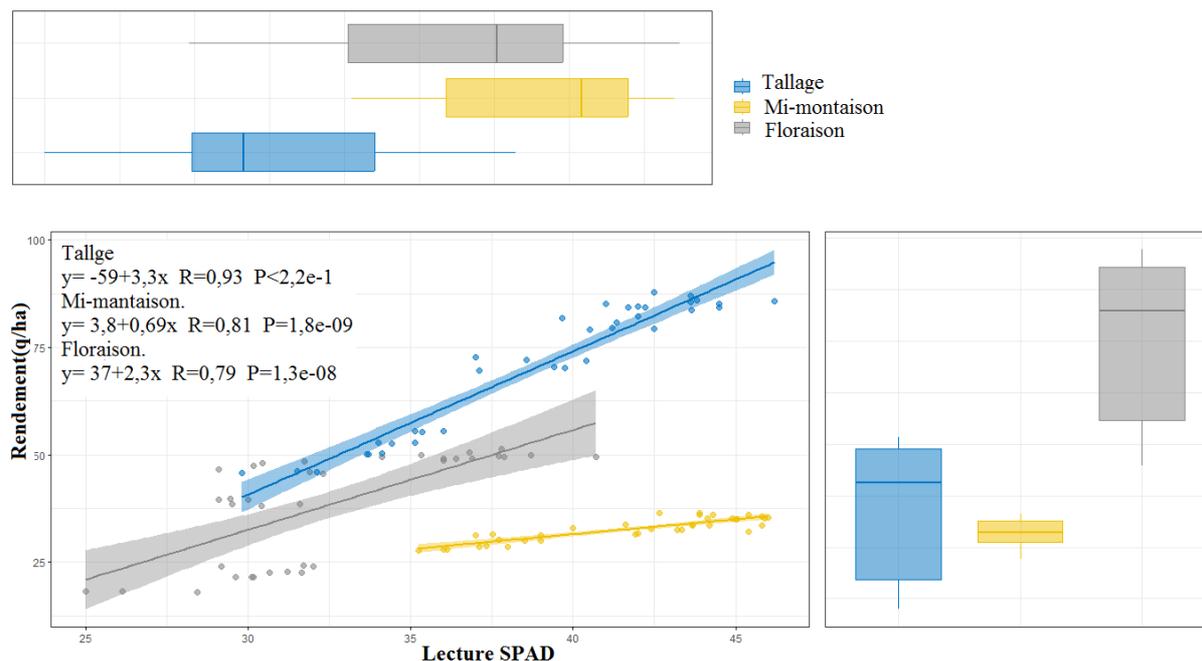


Figure 47. Relation Indice de chlorophylle –Rendement du blé dur pour les trois dates de mesures.

Stade de tallage : Au stade de tallage, la corrélation entre la chlorophylle et le rendement de blé peut être plus forte en raison de l'importance de la photosynthèse et de l'accumulation de biomasse végétale nécessaire à la croissance et au développement des organes reproducteurs, tels que les épis de blé. Une concentration plus élevée de chlorophylle peut indiquer une activité photosynthétique plus intense, ce qui favorise une meilleure production de biomasse et donc un rendement de blé plus élevé.

Stade de mi-montaison : Au stade de mi-montaison, le blé entre dans une phase de transition où la croissance végétative ralentit et la plante commence à allouer davantage de ressources à la formation des organes reproducteurs. À ce stade, la corrélation entre la chlorophylle et le rendement de blé peut être légèrement moins forte en raison de la redistribution des ressources de la plante vers les parties reproductrices. Cela peut entraîner une diminution relative de la production de biomasse végétale par rapport au stade de tallage, ce qui réduit légèrement l'impact de la chlorophylle sur le rendement.

Stade de floraison : Au stade de floraison, la plante investit principalement ses ressources dans la formation des fleurs et des grains de blé. À ce stade, la corrélation entre la chlorophylle et le rendement peut être moins forte en raison de l'importance accrue des facteurs liés à la pollinisation, à la fécondation et au remplissage des grains. Ces processus sont régulés par d'autres facteurs, tels que la disponibilité en eau, les nutriments, les

conditions climatiques, et peuvent influencer le rendement indépendamment de la chlorophylle.

Nos travaux corroborent avec ceux de Almutairi (2016) montrant la relation entre le contenu de chlorophylle et le rendement de blé pour différentes variétés de blé et l'effet de la fertilisation tardive en azote. Les résultats indiquent une corrélation positive significative entre le contenu de chlorophylle et le rendement de blé, avec une corrélation plus forte au stade de tallage par rapport aux stades de mi-montaison et de floraison.

Ainsi dans les travaux de Prasad (2007) qui explorent la relation entre la fluorescence de la chlorophylle et le rendement de blé. Les résultats de cet auteur montrent une corrélation positive significative entre la fluorescence de la chlorophylle et le rendement de blé

3.2.1.7. Relation entre l'indice de chlorophylle – rendement de blé dur.

La figure 49 et la figure 2 en annexes montrent la relation entre la chlorophylle et le rendement grains de blé, ainsi que le rendement paille et le rendement total, peut être expliquée comme suit :

1. L'augmentation de la concentration de chlorophylle est associée à une augmentation du rendement grains de blé. La valeur élevée ($R^2=0.79$) indique une relation assez forte entre la chlorophylle et le rendement grains de blé.
2. ($R= 0.81$) indique une relation assez forte entre la chlorophylle et le rendement paille.
3. La valeur élevée de R (0.93) indique une relation très forte entre la chlorophylle et le rendement total.

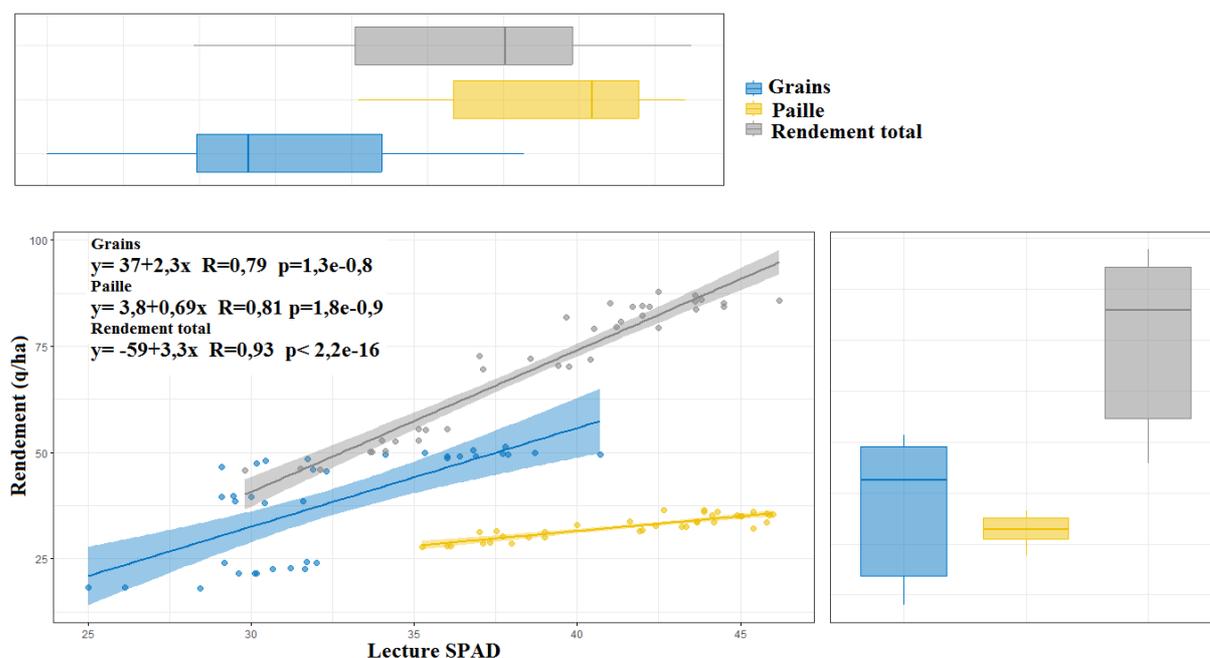


Figure 48. Relation Indice de chlorophylle –Rendement du blé dur pour les différentes parties (grains, paille et total) de blé dur.

Les relations illustrées dans la figure 48 indiquent que plus la concentration de chlorophylle est élevée, plus les rendements grains de blé, paille et total sont susceptibles d'être élevés. La chlorophylle joue un rôle crucial dans la photosynthèse et l'accumulation de biomasse végétale, ce qui influe directement sur le rendement du blé. Nos résultats sont en accord commun avec ceux de Miao (2019) montrant une corrélation positive significative entre la concentration de chlorophylle et le rendement grains de blé et soulignant l'importance de la photosynthèse et de la chlorophylle dans la production de grains de blé.

3.2.1.7. Recommandations de la fertilisation azotée dans la région semi-aride.

L'azote est l'un des éléments nutritifs indispensables pour la croissance et le développement des plantes. Cependant en zones semi-arides caractérisées par un manque de pluie, l'apport d'azote n'est pas toujours justifié. En effet, vu les niveaux souvent bas des rendements obtenus et la hausse des prix de l'engrais azoté, les céréaliculteurs de cette région hésitent de l'apporter.

En plus de la faiblesse des quantités de pluies enregistrées dans la région semi-aride, les fortes fluctuations intra et interannuelles des précipitations rendent la gestion de la fertilisation azotée une des pratiques les plus délicates, car il faut tenir compte de la diversité des conditions pédoclimatiques et les incertitudes liées au climat, au fonctionnement biologique des sols et à la disponibilité des formes d'azote. Ces incertitudes conduisent

souvent à chercher à minimiser les risques de pertes de rendement en augmentant les doses d'azote.

En général, apporter de l'azote dans des conditions inadaptées (quantité mal évaluée, météo, période du cycle cultural, sol) reste un des problèmes majeurs de la fertilisation minérale du fait qu'ils induisent une quantité d'azote non valorisé par les plantes. En moyenne, moins de la moitié de l'azote apporté par un fertilisant est absorbé par la culture fertilisée. Cette faible efficacité provient notamment du fait que l'azote apporté est soumis à un certain nombre de processus biologiques et physiques, qui interviennent très tôt après les apports d'azote, et qui sont en forte compétition avec le peuplement végétal (pertes gazeuses, organisation microbienne, transport et lixiviation). Autrement dit, la plus grande partie de l'engrais azoté est perdue pendant l'année d'application due essentiellement à la faible synchronisation entre la fourniture de l'azote par le sol et la demande de la culture (Cassman et al., 2002 ; Dobermann, 2005). Par conséquent, la gestion de l'azote doit être affinée pendant la saison culturale durant laquelle l'azote est appliqué afin de maximiser l'EUN. Synchroniser l'apport avec les besoins de la plante permet ainsi de limiter les pertes d'azote. Tout apport non valorisé constitue une perte économique sèche pour le céréaliculteur et un risque pour l'environnement.

En cas d'un déficit hydrique (année sèche) durant tout le cycle de la culture, l'absorption d'azote est réduite ou même stoppée et l'apport d'azote constitue un gaspillage pour le céréaliculteur. Pour remédier à cette situation, il est nécessaire de réduire les doses d'azote dans ces zones et de sélectionner des variétés ayant une meilleure efficacité d'utilisation de cet élément (Moll et al. 1982 ; Moll et al. 1987). Cette stratégie permettrait de réduire les accidents dus aux fortes concentrations de N dans le sol en années sèches et de garantir des rendements satisfaisants en années pluvieuses.

Cette difficulté d'ajuster les doses d'azote ne permet pas d'obtenir des rendements et des taux de protéines souhaités. Cette non-maîtrise des doses entraîne un rejet concomitant des engrais azotés par les céréaliculteurs, ce qui provoque une anarchie d'utilisation d'azote au cours des années. La priorité consiste à analyser l'azote du sol ; on parle de reliquats azotés en sortie hiver.

Nous avons constaté ces dernières années des quantités d'azote apportées équivalentes à 200 kg.ha⁻¹) surtout dans la région de Constantine, alors que des expériences conduites sur l'adaptation des itinéraires techniques ont montré que, compte tenu des systèmes de cultures pratiqués, la dose optimum se situait entre 130 et 150 Kg ha⁻¹ (Limaux, 1989,1991). Dans ces

travaux Limaux (1994) insiste que les fournitures en azote du sol permettaient de ne pas dépasser 100 kg.ha-1, sans aucun risque de perte de production.

Une des conséquences majeures de ces pratiques de surfertilisation se répercute d'une façon défavorable sur l'environnement. Il devient dès lors indispensable de proposer aux céréaliculteurs des modes de raisonnement de la fertilisation azotée qui se traduisent par des pratiques, dont on espère qu'elles permettront à moyen terme (quelques années) de stabiliser les rendements et augmenter l'EUN de l'engrais azoté.

Tous les essais ont été réalisés dans des conditions pluviales, semi-arides, dans des champs où les parcelles étaient soumises exactement aux mêmes parcours de production, mis à part la fertilisation azotée. Les traitements de fertilisation ont aussi imité à partir de ceux pratiqués par les céréaliculteurs dans les deux régions d'étude.

Les résultats de cette étude ont montré qu'en années humides (2017/2018 et 2018/2019), la dose de 100 kg de N ha-1 fractionnée en trois applications est suffisante pour maximiser le rendement. En effet, il faut noter que les apports de doses d'azote relativement élevées peuvent provoquer, en cas de pluies précoces, une croissance de plantes et un tallage accru et par conséquent un épuisement rapide de l'eau du sol et une chute des rendements si les conditions pluviométriques sont par la suite déficitaires. Le recouvrement rapide du sol pourrait aussi être bénéfique en année pluvieuse puisque l'évaporation est réduite au détriment de la transpiration. C'était le cas pour les deux années humides d'étude.

Par contre l'année sèche (2016/2017), caractérisée par une ampleur du déficit hydrique surtout la période printanière qui était moins pluvieuse que la normale. Dans ce cas, le déficit hydrique durant le cycle de la culture provoque une réduction ou même l'arrêt de l'absorption d'azote et l'apport d'azote constitue un gaspillage pour le céréaliculteur.

Sachant que l'azote exerce dans ces régions un rôle d'autant plus déterminant que le régime des pluies est partout favorable au lessivage de l'azote minéral du sol provenant soit des engrais soit de la minéralisation de l'humus ou des résidus culturaux. Ces conditions soulèvent notamment le problème de la valorisation optimale de l'azote apporté sous forme d'engrais.

Pour remédier à cette situation, il est nécessaire de réduire les doses d'azote dans ces régions et de sélectionner des variétés ayant une meilleure efficacité d'utilisation de cet élément.

Des recommandations en fertilisation azotée sont une importante démarche pour les céréaliculteurs, dont les résultats seraient soutenus par des essais au champ réalisés dans les conditions semi-arides tout en s'aidant à des outils d'aide à la décision comme le

chlorophylle- mètre dans le but d'améliorer l'efficacité de la fertilisation, c'est-à-dire pour permettre aux céréaliculteurs de la région d'avoir une meilleure productivité possible avec le minimum d'azote. En d'autres termes pour atteindre un rendement maximisant le rapport entre la rentabilité et l'efficacité de l'azote apporté (ou un rendement commercial maximal prenant en compte le rendement et la qualité de récolte) tout en minimisant l'impact sur l'environnement. Il est donc crucial de déterminer une dose économiquement optimale, qui donnera le profit maximum pour le céréaliculteur.

Cette dose optimale dépend de plusieurs paramètres à savoir : l'efficacité de l'engrais, les techniques culturales, le coût de l'unité de l'azote et le prix du produit récolté.

La discussion avec des professionnels et des céréaliculteurs expérimentés des deux régions (Constantine et Sétif) était particulièrement utile pour avoir l'assurance que les recommandations tenaient compte tant des pratiques culturales que des contraintes propres à la culture.

Donc, au titre des résultats obtenus à travers cette expérimentation et en tenant compte des interactions traitement*année et traitement*région, nous préconisons, selon le potentiel des parcelles, pour les années humides, une dose optimale de 100 kg de N ha⁻¹ en trois apports, pour le cas de la région de Sétif et jusqu'à 150 kg de N ha⁻¹, pour le cas de la région de Constantine, tout en allant jusqu'à 3 à 4 fractionnements en fonction de la pluviométrie tout en respectant toujours la période d'apport pour assurer une meilleure valorisation d'azote à condition que la pluviométrie le permette, dans le cas échéant il faut annuler les apports de la quantité d'azote prévue afin d'éviter le risque de provoquer une phytotoxicité outre le gaspillage de l'engrais apporté et le coût supplémentaire à la production et amoindrir cette dose d'azote pour les années sèches. Cette stratégie permettrait de réduire les accidents dus aux fortes concentrations de N dans le sol en années sèches et de garantir des rendements satisfaisants en années pluvieuses.

Finalement, il y a lieu de rappeler que ces recommandations ne représentent que des modèles de référence, ils constituent essentiellement des points de repère. De nombreux facteurs, entre autres ceux qui sont définis par les conditions particulières du champ (par exemple, l'état sanitaire de la culture et du sol, les accidents météorologiques, ...etc.), doivent aussi être pris en considération.

Conclusion générale.

L'objectif de cette étude est d'évaluer plusieurs indicateurs de la nutrition azotée à partir d'analyses végétales afin de développer des outils de raisonnement pour la fertilisation azotée. Ces outils permettront de recommander aux céréaliculteurs de la région semi-aride une dose optimale d'engrais azotée pour la culture de blé dur.

Nous avons choisi de travailler sur une espèce de blé dur à savoir la variété Waha, pour lequel l'effet de l'azote sur la croissance et le développement a été largement étudié. Pour mener à bien ces objectifs, nous avons mis en place une expérimentation au niveau de laquelle la conduite a été optimale pour l'ensemble des techniques sauf pour la fertilisation.

L'azote a agi d'une manière très hautement significative par l'apport de N sur presque la totalité des paramètres étudiés, ils ont augmenté de façon proportionnelle à la quantité d'azote appliquée tant que les conditions ou facteurs du milieu restent favorables. Le rendement grains obtenu pour la dose 200kg d'engrais/ha est en moyenne de 41.42 q/ha pour la région de Constantine et 33.09q/ha pour la région de Sétif.

Pour les deux régions, le CAU et le IRN sont inversement proportionnels avec les doses croissantes de N apporter.

L'EUA diminue avec l'augmentation des doses d'azote appliqué. La dose optimale est l'apport de 100 kg d'engrais/ha, qui a obtenu la meilleure efficacité d'utilisation de l'azote. La dose 100 kg d'engrais/ha a utilisé l'azote de manière efficace par rapport aux autres apports, plus la dose est élevée plus l'efficacité d'utilisation de l'azote est faible.

Les valeurs moyennes de EUA sont de 2,8 toutes doses confondues pour la zone de Sétif et 2,71 pour la zone de Constantine.

Le rendement obtenu du traitement 100kg urée/ha est le meilleur par rapport aux autres traitements, il représente 70 % et 58 du rendement potentiel, respectivement pour le site de Constantine et Sétif.

La dose D1 avec un apport de 100 kg d'engrais/ha a enregistré la meilleure valeur de l'IRN par rapport aux autres traitements ; c'est les apports les plus importants d'azote (apports supérieurs à 100 kg de d'engrais/ha) qui ont des indices de récolte les plus faibles. Contrairement à l'indice de récolte azoté, le CAU présente des valeurs moyennes basses pour de faibles doses d'azote (apports supérieurs à 100 kg d'engrais/ha) qui ont des indices de récolte azoté supérieurs.

Par contre, au cours du cycle, l'effet de l'apport de N a été très hautement significatif pour presque la totalité des variables excepté celui du nombre d'épi/m², pour lesquelles les

apports supérieurs à 100 kg d'engrais/ha ont permis de meilleurs résultats que l'apport de 100 kg d'engrais/ha.

Au contraire, pour le PMG, la dose d'azote influe inversement sur ce paramètre, autrement dit, qu'au fur et à mesure il ya croissance des doses d'azote, au fur et à mesure il ya diminution du PMG.

L'indice de la chlorophylle est lié à la quantité d'azote absorbée du début montaison à la floraison. Cet azote est destiné à l'accumulation et l'assimilation au niveau des feuilles, d'où la bonne corrélation avec l'azote et la production de la matière sèche. D'ailleurs, la corrélation entre les deux variables est assez bonne au stade mi-montaison (stade B) expliquant la conversion du rayonnement en biomasse qui varie avec les stades phénologiques de la culture.

L'effet facteur région est visible sur la majorité des paramètres étudiés, d'où la région de Constantine présente des meilleures valeurs que celle de Sétif, exception faite pour le PMG et le nombre d'épi/m² affirmant que la variation des conditions environnementales entre les deux régions influe négativement sur l'expression de ces derniers.

La comparaison des résultats sur plusieurs années dans les conditions de la région semi-aride fait ressortir une variabilité inter et intra-annuelle notable. C'est ainsi que la différence sensible pour les paramètres d'utilisation d'azote. Les années 2016/2017, 2017/2018 et 2018/2019 diffèrent fortement pour l'expression de l'ensemble des caractères étudiés d'où un effet négatif caractérisant l'année 2016/2017 (année sèche) par rapport aux autres années 2017/2018 et 2018/2019 (années humides) qui étaient favorables pour l'ensemble des variables étudiées.

Pour répondre aux préoccupations des céréaliculteurs concernant les prix croissants des inputs conduisant de plus en plus à alourdir leurs charges pour améliorer leurs rendements. Nous nous sommes trouvé devant la nécessité impérieuse de gérer la fertilisation azotée qui consiste à améliorer leurs rendements et à maximiser le profit tout en préservant l'environnement. Nous avons jugé qu'il est temps de déterminer une dose économiquement optimale, qui donnera le profit maximum pour les céréaliculteurs, dans la région semi-aride.

À travers les résultats obtenus dans cette investigation et à partir aux corrélations effectuées entre les différents paramètres en relation avec l'utilisation de l'azote et l'indice de chlorophylle (outil d'aide à la décision), la dose optimale ainsi calculée varie de 100 à 150 kg d'engrais/ha, selon la région. Cette dose optimale dépend de plusieurs paramètres à savoir : l'efficacité de l'engrais, les techniques culturales, le coût de l'unité de l'azote et le prix du produit récolté.

Alors nous recommandons, selon le potentiel des parcelles, pour les années humides, une dose optimale de 100 kg de N ha⁻¹ en trois apports, pour le cas de la région de Sétif et jusqu'à 150 kg de N ha⁻¹, pour le cas de la région de Constantine, tout en allant jusqu'à 3 à 4 fractionnements en fonction de la pluviométrie tout en respectant toujours la période d'apport pour assurer une meilleure valorisation d'azote à condition que la pluviométrie le permette, dans le cas échéant il faut annuler les apports de la quantité d'azote prévue afin d'éviter le risque de phytotoxicité outre le gaspillage de l'engrais apporté et le coût supplémentaire à la production et amoindrir cette dose d'azote pour les années sèches. Cette stratégie permettrait de réduire les accidents dus aux fortes concentrations de N dans le sol en années sèches et de garantir des rendements satisfaisants en années pluvieuses.

Finalement, il y a lieu de rappeler que ces recommandations ne représentent que des modèles de référence, ils constituent essentiellement des points de repère. De nombreux facteurs, entre autres ceux qui sont définis par les conditions particulières du champ (par exemple, l'état sanitaire de la culture et du sol, les accidents météorologiques, ...etc.), doivent aussi être pris en considération.

Nous pouvons aussi retenir les points suivants :

- Compte tenu des quantités d'azote absorbé par la variété expérimentée (Waha), du coefficient d'utilisation apparent faible, des engrais azotés, de l'azote fourni par le sol et des risques de pertes des nitrates en profondeur, une fourchette de 100 à 150kgN/ha constitue la dose de moindre risque dans la région semi-aride à savoir les deux régions d'étude Sétif et Constantine, permettant les meilleurs rendements.
- Le précédent cultural et la richesse initiale du sol en azote sont déterminants quant à la réponse du blé à l'apport d'azote. D'où la nécessité de nuancer les apports selon ces derniers.

Parmi les recommandations :

Augmenter la fréquence des mesures.

La mesure au stade A est très intéressante pour l'ajustement du premier apport. Lorsque la richesse initiale du sol est déterminée on ne sait pas comment elle va évoluer jusqu'au stade tallage. À cette date, les nitrates de la sève renseignent sur l'absorption qui va renseigner sur l'azote disponible. Au stade tallage, il sera possible de réajuster la dose d'apports selon l'évolution de l'azote minéral.

À la floraison, il sera donc possible de rajouter un supplément d'azote sur la base des résultats de l'analyse de la sève pour améliorer la qualité des grains (teneur en protéines).

- Développer, une fois ces normes établies, un logiciel d'aide à la décision en matière de gestion de la fertilisation azotée des cultures qui prendrait en compte les paramètres habituels complétés par les résultats de l'analyse des nitrates de la sève.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

- Abeledo LG., Savin R., Slafer GA. (2008). Wheat productivity in the Mediterranean Ebro Valley: Analyzing the gap between attainable and potential yield with a simulation model. *European Journal of Agronomy*. Volume 28, Issue 4, May 2008, Pages 541-550
- AFOM (2016) Association française des opérateurs mobiles
- AFSSA. (2003). (Agence française de sécurité sanitaire des aliments).
Évaluation des risques et bénéfices nutritionnels et sanitaires issus de l'agriculture biologique. 186p.
- Alagarswamy G. et seetharma N. (1983). Biomass and harvest index as indicators of nitrogen uptake and translocation to the grain in sorghum genotypes. P. 423-427 .In M.R. Saric and B.C. Loughman (ed.). *Genetic aspects of plant nutrition*. Martinus Nijhoff publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Almutairi, Z. M. (2016). Relationship between Chlorophyll Content and Wheat Yield for Different Wheat Varieties under Late Nitrogen Fertilization. *American Journal of Experimental Agriculture*, 13(1), 1-9. DOI: 10.9734/AJEA/2016/24098
- Ammar M. (2014). Organisation de la chaîne logistique dans la filière céréales. Etat des lieux et perspectives. Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes. Institut Agronomique méditerranéen de Montpellier. These de hautes Etudes du CIHEAM.
- Anderson E.L., Kamprath E.J. and Moll R.H. (1984a). Nitrogen fertility effects on accunrulation, renobilization and partitioning of N and dry matter in corn genotypes dil'fèring in prolificacy. *Agron.* .1. 76:397-404.
- Angus J. F. (1995). Modeling N fertilization requirements for crops and pastures. In : Bacon PE, eds. *Nitrogen fertilization in the environment*. New York : Marcel Dekker, Inc., 109 – 127.
- Arihara, J. and Ohwaki, Y. (1989). Estimation of available phosphorous in vertisol and alfisol on view of root effects on rhizosphere soil. In XI Colloquium, Wageningen, Holland.
- Arvalis-Institut du végétal (2006). Comment s'élabore le rendement des céréales à paille ? Available at: <http://www.arvalis-infos.fr/comment-s-elabore-le-rendement--@/view16191-arvarticle.html>
- Auriau P. (1978). Sélection pour le rendement en fonction du climat chez le blé. Ecole Nationale Supérieure Agronomique
- Austin R. B. , Bingham J., Blackwell RD., Evans L. T., Ford M.A., Morgan C.L., Taylor M. (1980). Genetic improvements in winter wheat yields since 1900 and associated physiological changes. Publié en ligne par Cambridge University Press: 27 March 2009.
- Ayadi S., Karmous C., Chamekh Z., Hammami Z., Baraket M., Esposito S., Rezgui S., Trifa Y.(2016). Effects of nitrogen rates on grain yield and nitrogen agronomic efficiency of durum wheat genotypes under different environments: Durum wheat nitrogen use efficiency. *Annals of Applied Biology*. 168(2): 264-273.

B

- Badraoui M., Agbani M., El Gharous M., Karrou M., Soudi B. (2000). Normes d'interprétation des analyses de sol pour les cultures de blé et de betterave en irrigué dans les Doukkala. Séminaire Intensification agricole et qualité des sols et des eaux', Rabat, 2-3 Novembre 2000. 31-47 pp.
- Bai, Y., Wu, J., Clark, C.M., Naeem, S., Pan, Q., Huang, J., Zhang, L., Han, X., and Wei, X. (2011). Interactive effects of temperature, moisture, and nitrogen addition on soil respiration and nitrogen mineralization in a temperate steppe. *Soil Biology and Biochemistry* 43, 488-495. DOI: 10.1016/j.soilbio.2010.10.019
- Bajji, M. (1999). Étude des mécanismes de résistance au stress hydrique chez le blé dur : caractérisation de cultivars différant par leurs niveaux de résistance à la sécheresse et de variants somaclonaux sélectionnés in vitro. Thèse de doctorat, faculté des sciences, université catholique de Louvain.
- Bahlouli F., Bouzerzour H., Benmahammed A. et Hassous K. L. (2005)a. Selection of high yielding and risk efficient durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars under semi-arid conditions. *Agronomy Journal*.4, pp: 360-365.
- Baize D., 1988. Guide des analyses courantes en pédologie. Ed INRRA paris, 172 p.
- Baize D., 2000. Guide des analyses en pédologie, 2eme Ed. Rev et augmentée. INRA, Paris. 255p.
- Baldy, C., Ruelle, P., & Fernandes, A. (1993). Résistance à la sécheresse du sorgho-grain en climat méditerranéen. *Sécheresse*, 4: 85-93.
- Barkat H. (2014). Analyse des groupements Herpétologiques dans les Hautes Plaines Sétifiennes (cas de la région de Beni Aziz).Thes.magister. Univ. Faraht Abbas Sétif 1.74P.
- Barker A. V. and Bryson G. M. (2007). Nitrogen. in Handbook of plant nutrition editors A. V. Barker, D. J. Pilbeam. Ed. CRC Press Taylor & Francis. P662.
- Benjamin J.G., Porter L.K., Duke H.R., Ahuja L.R. (1997). Corn Growth and Nitrogen Uptake with Furrow Irrigation and Fertilizer Bands. *Agronomy Journal*. 89(4): 609-612..
- Belaid, D. (1987). Etude de la fertilisation azotée et phosphatée d'une variété de blé dur (Hedba3) en conditions de déficit hydrique, Mémoire de magister. INA - El Harrach, Alger, 108p.
- Barraclough, P. (2011). Molecular genetics of nitrogen use efficiency in cereals. *Plant Biotechnology Journal*, 9(6), 685-696.
- Belagrouz, A. (2013). Analyse du comportement du blé tendre, variété WIFAK (*Triticum aestivum* L.) conduite en labour conventionnel, travail minimum et semis direct sur les hautes plaine sétifiennes. Thèse de Magister des Sciences Agronomiques FSNV, DSA, Université Ferhat Abbas, Sétif-1, 27 pages.
- Bélangier G., Gastal F., Lemaire G. (1992). Growth analysis of a tall fescue fertilized with different rates of nitrogen. *Crop. Sci.* 32: 1371 – 1376.
- 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. *Agric. Food Secur.* 7. <https://doi.org/10.1186/s40066-018-0231>

- Benbelkacem A., Sadli F., Brinis L.,(1995). La recherche pour la qualité des blés durs en Algérie. In: Di Fonzo N., Kaan F. & Nachit M. (Eds.). Durum wheat quality in Mediterranean region. CIHAM: Options Méditerranéennes: Série A. Séminaire Méditerranéens, 22: 61-65.
- Benbelkacem, A., Kellou, K. (2000). Évaluation du progrès génétique chez quelques variétés de blé dur (*Triticum turgidum* L. var. durum) cultivées en Algérie.
- Benmahammed, A., Kermiche, A., Hassous, K. L., Djekoun, A., & Bouzerzour, H. (2003). Sélection multi-caractères pour améliorer le niveau de stabilité du rendement de l'orge (*Hordeum vulgare* –L.) en zone semi-aride, revue sciences et technologies, 19: 98-103.
- Benniou R., 2008. Les systèmes de production dans les milieux semi-arides en Algérie: analyse agronomique de leur diversité et des systèmes de culture céréalières dans les Hautes Plaines Sétifiennes. Thèse de Doctorat, INA-Alger ; 293 p.
- Benniou R. (2013). Agriculture conservation roll of moisture and soil organic matter semi-arid journ.of Mat. Env scn, 3(1), pp: 91-98
- Benniou R., TAYEB-BEY H., et YAHIAOUI S. (2018). Comparaison des différentes techniques (SD, TCS, TC) sur l'efficacité d'utilisation de l'eau chez le blé dur en conditions pluviales en semi-aride. Revue agriculture
- Benton Jones Jr J. (2012). Plant Nutrition and Soil Fertility Manual.Ed. CRC Press .ISBN. 978-1439816094
- Brenner J. M. et Mulvaney C. S. (1982). Total nitrogen. Pages 595-622 dans C. A. Black et al., 6d. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Black C.A. (1968). Soil plant relationship. 2^{ème} édition .John Wiley and son inc. NewYork.London. Sydney. 792P.
- Bockstaller C. Guichard L., Makowski D., Aveline A., Girardin P. & Plantureux S. (2008). Agri-environmental indicators to assess cropping and farming systems. À review Agronomy for Sustainable Development **volume 28**, pages139–149 (2008)
- Boiffin J., Caneill J., Meynard J.M., Sebillote M. (1981). Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse. 1 - Protocole et méthode d'étude d'un problème technique régional. Agronomie, 1(7), 549 – 558.
- Boufenar- Zaghouane F. et Zaghouane O. (2006). Guide des principales variétés de céréales à paille en Algérie (blé dur, blé tendre, orge et avoine). ITGC, ICARDA., Alger. 154 p.
- Bouneau M. et Soucheir B. (1979). Constituants et propriétés du sol. Edit, Masson et Cie, Paris, 459 p.
- Bousba, R., Ykhlef, N. and Djekoun, A. (2009). Water use efficiency and flag leaf photosynthetic in reponse to water deficit of durum wheat (*Triticum durum* Desf.). World Journal of Agricultural Sciences. 5.5,pp. 605 -616.
- Bousba R., Djekoun A., Duraa S., Ykhlef N.. (2012). Caractérisation moléculaire et association marqueur SSR phénotype pour la tolérance au stress hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf). European Scientific Journal, 9(12): 186-201.
- Boussouf F. (2012). Mise en évidence des structures permanentes comme méthode de Revalorisation du patrimoine bâti : Cas de Constantine. E.P.AU, Alger. 256 p.

- Bouzerzour, H. et M. Dekhili. (1995). Heritability, gain from selection and genetic correlation for yield of barley grown in two contrasting environments. *Field Crops Res.*, 41,173-178
- Bouzerzour, H. (1998). Sélection pour le rendement, la précocité à l'épiaison et la biomasse aérienne chez l'orge (*Hordeum vulgare* L.) en zone semi-aride. Thèse de Doctorat d'Etat. Univ Constantine.
- Bouzerzour H., Adjabi A., Benmahammed A. (2002). Productivité et adaptation comparée des variétés de céréales en zone semi-aride d'altitude. *Céréales* 37, 15- 16 p. Éd. ITGC.
- Bouzerzour, H., Benmahammed, A., Benkharbache, N. & Hassous, K.L. (2002). Contribution des nouvelles obtentions à l'amélioration et à la stabilité du rendement d'orge (*Hordeum vulgare* L.) en zone semi-aride d'altitude. *Revue Recherche Agronomique de l'INRAA*, 10 : 45-58.
- Bouzerzour H., Mahnane S., Makhlof M. (2006). Une association pour une agriculture de conservation sur les hautes plaines orientales semi-arides d'Algérie. *Options méditerranéennes. Série a. n 69*, 107-111 pp.
- Bouzerzour H. & Monneveux P. (1992). Analyse des facteurs de stabilité du rendement de l'orge dans les conditions des Hauts Plateaux de l'Est algérien. Tolérance à la sécheresse des céréales en zone méditerranéenne. *Diversité génétique et amélioration variétale. Les Colloques (n° 64)*, Montpellier (France), 15-17 Décembre 1992. Ed. INRA, Paris, Pp. 139-158.
- (Bouzerzour H. et Oudina M, (1998). Associations de certains caractères morphologiques au rendement grain chez le blé dur (*Triticum durum* Desf). en conditions semi arides. *Ann. Inst. Nat. Agron. El-Harrach*, 1983, Vol. 13, N° 1, 157 - 167.
- Boyd D.A., Needham P. (1976). Factors governing the effective use of nitrogen. *Span*, 19(2),68 -70
- Boyer, J.; Roberge, G. ; Friot, D. (1985). Etude écophysiological de la productivité de quelques graminées à hauts rendements fourragers cultivées au Sénégal. II. Variations de leur valeur fourragère en fonction du rythme d'exploitation et de la fumure minérale. *Rev. Elev. Méd. vét. Pays trop.*, 1985, 38 (4) : 339-352.
- Broadbent F.E., Carlton A.B. (1978). Fiels trials with isotopically labeled nitrogen fertilizer. In "Nitrogen in the Environment", Vol 1 (Niel sen and Mc Donald Eds) Academic Press, 1- 41

C

- Campbell C.A., Zentner R.P., Selles F., McConkey B.G., Dyck F.B. (1993). Nitrogen Management for Spring Wheat Grown Annually on Zero-Tillage: Yields and Nitrogen Use Efficiency. *Agronomy Journal*. 85(1): 107-114.)
- Carof M. Colomb B, Aveline A. (2013). A guide for choosing the most appropriate method for multi-criteria assessment of agricultural systems according to decision makers' expectations. Elsevier. *Agricultural Systems*. Vol. 115, February 2013, Pages 51-62
- Cassman K.G., Dobermann A.R., Walters D.T. (2002). Agroecosystems, Nitrogen-use Efficiency, and Nitrogen Management. *AMBIO*. 31(2): 132-140.

- Cassman, K.G., Dobermann, A., Walters, D.T. and Yang, H. (2003) Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 28, 315–358.
- Cassman, K.G. & Dobermann, A. (2021). Nitrogen and the future of agriculture: 20 years on. *Ambio*, 51, 17-24
- Chacha A. (2011). Géodynamique des bassins Triasiques de l'Atlas Saharien Oriental et implication pétrolière. Thes. Mag. Univ. E M'Hamed Bougara-Boumerdes. Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie. 96p.
- Ciucă M. and Petcu E. (2009). SSR markers associated with membrane stability in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Romanian Agricultural Research*. Nbr 26. 2009.
- Chehat, F. (2005). Les politiques céréalières en Algérie. Rapport Annuel. AgriMed. Agriculture, pêche, alimentation et développement rural durable dans la région Méditerranéenne, CIHEAM 2006.
- .Chenafi H., Bouzerzour H., Aidaoui A. et Saci A. (2006). Yield response of durum wheat (*Triticum durum*, Desf) cultivar Waha to deficit irrigation under semi arid growth conditions. *Asian Journal plant Science.*, 5: 854-860.
- Chennafi, H., A. Saci, A. Chennafi & M.A. Laib. (2008)(a). Amélioration de l'agriculture pluviale en environnement semi-aride. In : Proceedings du séminaire national sur les contraintes à la production du blé dur en Algérie. Université Chlef, le 29 et 30 novembre 2008, 62-68..
- Chennafi, H., Saci, A., Harkati, N., Adjabi, A., Mébarkia A. (2011). L'optimisation du rendement de la culture du blé sous l'effet du précédent cultural et l'outil de labour en environnement semi-aride. In Bouzerzour H., Irekti H. & Vadon B. Quatrième rencontres méditerranéennes du semis direct. Options méditerranéennes. Série A.: Séminaires Méditerranéens 96: 213:220. Ed. CIHEAM, Lavoisier. Paris, 251 p
- Chennafi H., A. Saci, N. Harkati, A. Adjabi, A. Mébarkia. (2010)b. L'optimisation du rendement de la culture du blé sous l'effet du précédent cultural et l'outil de labour en environnement semi-aride. *Options Méditerranéennes*, 96 : 213-220.
- Chennafi, H. (2012). Decadal evaluation of durum wheat water requirements to improve rainfed agriculture under semi-arid conditions. *J.Energ Proc.* 18, 896-904
- Christian S. Muller J-C. Decroux J. (2005). Guide de la fertilisation raisonnée. Ed. France Agricole. pp105-142.
- Ciūca M et Petcu E. (2009). SSR Markers associated with membrane stability in wheat, (*Triticum aestivum* L.) ; *Romanian Agricultur Research* n° 26 ; 21-24pp.
- Clement-Grandcourt M. et Prats J.(1971). Les céréales Collections d'enseignement agricole 2eme Ed, Ballier France. 351p.
- Corbeels M., Hofman G., Cleemput O. (1998). Analysis of water use by wheat grown on cracking clay soil in a semi – arid mediterranean environment: weather and nitrogen effects. *Agricultural water management*, 38 : 147 – 167.
- Couvreur F. (1981). La culture du blé se raisonne, cultivar. Juin 1981, ITCF. pp, 39-41.
- Couvreur F. (1985). Relation entre le développment de l'épi et les stades repères de végétation.:39-53.
- Cruz P. (2012). Physiologie de la nutrition des plantes cultivées. Éd. Lavoisier ISBN : 978-2743012516.

Cox M. Qualset C.O, Rains D.W (1986). Genetic variation for nitrogen assimilation and translocation in wheat. III. Nitrogen translocation in relation to grain yield and protein. *Crop Science* 26 : 737-740

D

Debaeke, P., Puech, J. & Casals, M.L. (1996). Elaboration du rendement du blé d'hiver en conditions de déficit hydrique. I. Etude en lysimètres. *Agronomie*, 16 : 3-23.

Delli G., Sarfatti P., Bazzani F. and Cadi A. (2002). Application of GIS for agro-climatic characterisation of northern Algeria to define durum wheat production areas. In *Journal of agriculture and environment for international development*. Ed. Istituto Agronomico per l'Oltremare. vol.96.n34. 121-140.

Demotes Mainard S., Jeuffroy M. H. (2004). Effects of nitrogen and radiation on dry matter and nitrogen accumulation in the spike of winter wheat. *Field Crops Research*, 87 : 221 – 233.

Desai, R.M., Bhatia, C.R. (1978). Nitrogen uptake and nitrogen harvest index in durum wheat cultivars varying in their grain protein concentration. *Euphytica* 27, 561–566. <https://doi.org/10.1007/BF00043182>

Dobermann A. (2005). Nitrogen use efficiency – State of the art. *Proceedings of the IFA International Workshop on Enhanced Efficiency Fertilizers*, 28–30 June 2005; Frankfurt, Germany, pp. 1-16.

Dordas M. (2007). "Effect of nitrogen rate and timing of application on winter wheat yield and quality." *Journal of Agronomy and Crop Science*, 193(3), 217-224.

DPAT. (2010). *Annuaire statistique de la Wilaya de Sétif*. pp 3, 49,87-97.

Drury C.F., Zhang T.Q., Kay B.D. (2003). The Non-Limiting and Least Limiting Water Ranges for Soil Nitrogen Mineralization. *Soil Science Society of America Journal*. 67(5): 1388-1404.

E

Ernez M., Lannoye R. (1991). Quantification des désordres photosynthétiques chez la plante stressée : Aspects conceptuels et méthodologiques. *L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides*. Ed. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris, 9-23.

F

Fageria N.K, Baligar V.C. (2008). *Nitrogen Management in Crop Production* Ed.RC Press ISBN : 978-1420075456.

Fageria, N.K. (2009). *The use of nutrients in crop plants*. CRC Press, Boca Raton. Fageria, N.K., Baligar, V.C., 2005. *Enhancing Nitrogen Use Efficiency in Crop Plants*, in: *Advances in Agronomy*. Elsevier, pp. 97–185. [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. (2014). *Nitrogen Management in Crop Production*. Éd. Nitrogen Management in Crop Production. ISBN : 978-1466591577

Far Z. (2016). *Les élevages bovins de la région semi-aride de Sétif face au changement climatique: Impacts et flexibilité*. École Nationale Supérieure Agronomique, Thèse de doctorat en sciences. 98p.

Ferhat A., Chehat F. (2020). La filière de production blé face à la mondialisation : Cas de l'Algérie. *Rooaa Iktissadia Review* ISSN 2253-0088, V10 (02)/2020. (PP 251-264).

- Follett R.F., Hatfield J.L. (2008). Nitrogen in the Environment: Sources, Problems and Management. Ed. Academic Press. ISBN : 978-0123743473.
- Fossati D., 1995 "Structures du rendement et croissance des grains de triticale. Comparaison de géotypes de tailles différentes." Thèse EPF No 11271.Zurich., 153P.
- FranceAgriMer. (2019). Évolution du taux de protéine. https://www.franceagrimer.fr/content/download/62206/document/Bilan_qualit%C3%A9%20b%C3%A9_11_09_2019.pdf
- Fussel L.K., Bidinger F.R., Bieler P. (1991). Crop physiology and breeding for drought tolerance : research and development, file. *Crop*. 27 : 183-199.
- G
- Gao J., Zhao Y., Guo C., Li Y., Liang Y., Wang Y., Lu J., Lv S. (2016). Effects of nitrogen and water management on grain yield and nitrogen use efficiency in winter wheat under drought conditions. *Revue Field Crops Research* <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.09.003> .
- Garabet S., Wood M., Ryan J. (1998). Nitrogen and water effects on wheat yield in a mediterranean – type climate. I. Growth, water – use and nitrogen accumulation. *Field Crops Research*, 57 : 309 – 318.
- Gardener, W. K., Parbery, D. G., Barber, D. A. 1981. Proteoid root morphology and function in *Lapinus albus*. *Plant and soil* 60. 143-147.
- Garcia R. and Hanway J.J. (1976). Foliar fertilization of soybeans during the seed-filling period. *Agron. J.* 68:653–657.
- Garcia-Mina, D. A., Antolin, M. S., Orduna, S. (2019). The effects of nitrogen fertilization on nitrogen use efficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.): a meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(1), 6
- Gastal F., Nelson C.(1994). Nitrogen use within the growing leafblade of tallfescue. *Plant physiology*. 105 (1) : 191.
- Gate P., Bouthier A. et Moynier J-L.(1992). La tolérance des variétés à la sécheresse: une réalité à valoriser. *Pers agri*. n°169: 62-67.
- Gate P. (1995). *Ecophysiologie du blé*. Ed. Lavoisier, Tech. and Doc.
- Gate, P. H. (1995). *Ecophysiologie du blé ; Technique et documentation* : Lavoisier, Paris, 429p.
- Gholizadeh, A., Faraji, A., & Pessarakli, M. (2020). Nitrogen fertilization and its impact on wheat (*Triticum aestivum* L.) yield and quality: a review. *Journal of Plant Nutrition*, 43(3), 342-354.
- Gowariker V., Krishnamurthy V. N., Gowariker S., Dbanorkar M. and Paranjape K. (2009). *The Fertilizer Encyclopedia*. John Wiley & Sons, Inc. P. 835.
- Gras et al. (1989), Grignac P.H.(1978). Amélioration variétale de blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Annale de l'INA (El-Harrach)* : 83 -110
- Grignac, P. (1981). Rendements et composantes du rendement du blé d'hiver dans l'environnement méditerranéen Français. *Communications Scientifiques. Séminaire de Bari*, Sept –oct 1-2 : 11p.
- Grignac P., 1981. Rendement et composantes du rendement du blé d'hiver dans l'environnement méditerranéen français. *Communication au conseil scientifique. Italie*. 11è édition, n° 1178: 185-195

- Guyot G. (2010). La nutrition minérale des plantes cultivées. Ed. Quae. ISBN. 978-2759204684.
- Gowariker V., Krishnamurthy V. N., Gowariker S., Dbanorkar M. and Paranjape K. (2009). The Fertilizer Encyclopedia. John Wiley & Sons, Inc. P. 835.

H

- Hammer, G. L., Sinclair, T. R., & Muchow, R. C. (1997). Dry matter accumulation and remobilization in durum wheat as affected by nitrogen supply and soil water availability. *Australian Journal of Agricultural Research*, 48(6), 753-764.
- Hannachi, A. et Fellahi, Z. (2010). Effets des résidus et du travail du sol sur le comportement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en milieu semi-aride. Mémoire d'Ingénieur, Département d'Agronomie, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, UFAS. 80p.
- Hardy R.W.H., Hoolsten R.D. (1977). Biological nitrogen fixation in naturel and agricultural habitat in Chafi M.H. (1985) Etude préliminaire sur l'effet de quelques microéléments sur la fixation symbiotique d'azote. Univ. Sénia. 62p.
- Hawkesford M.J. et Barraclough P. (2011). Nutrient Use Efficiency in Plants: Concepts and Approaches. Ed. Springer. ISBN. 978-1402096899
- Hawkesford M.J, Malcolm J. (2011). Nitrogen in Agriculture: Sources, Uptake, and Utilization in Crop Plants. *Journal Advances in Agronomy*. Volume : 114. 1-79pp. DOI : 10.1016/B978-0-12-394278-4.00001-1.
- Hawkesford, M.J., Fageria, N.K., & Barraclough, P. (2014). Sustainable Increases in Crop Yields: Exploring the Physiology of Nutrient Use Efficiency. *Journal of Experimental Botany*, 65(2), 409-421. doi:10.1093/jxb/ert394
- Hikosaka, K., Ishikawa, K., Borjigidai, A., Muller, O. and Onoda, Y. (2006). Temperature acclimation of photosynthesis: Mechanisms involved in the changes in temperature dependence of photosynthetic rate. *Journal of Experimental Botany*. 57, 291-302.
- Hireche A. (2006). Evaluation de la pluviosité annuelle dans quelques stations arides algériennes, 315-320p.
- Hirel, B., LeGouis, J., Ney, B., Gallais, A. (2007). The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches. *Journal. Experimental. Bot.*, 58, 2369–2387.
- Hirel, B., Tétu, T., Lea, P.J. and Dubois, F. (2011) Improving nitrogen use efficiency in crops for sustainable agriculture. *Sustainability*, 3, 1452–1485.

I

- INRA et ArvalisInfos (2018) La fertilisation azotée du blé en période de sécheresse
- ISO., 1994. Qualité de l'eau. Dosage des nitrates. Méthode spectrométrique avec l'acide sulfosalicylique. NA 1656, ISO 7890-3, Ed. INAPI. Edition et diffusion, Alger, 4 p.
- ISO., 1994. Qualité de l'eau. Dosage des nitrites. Méthode par spectrométrie d'absorption moléculaire. NA 1657, ISO 6777. Ed. INAPI. Edition et diffusion, Alger, 4 p.
- ITGC, 1978. Les principales variétés de céréales cultivées en Algérie. Ed. ITGC, Algérie, 114 p.
- ITA, 1977. Laboratoire du sol. Méthodes d'analyses physiques et chimiques du sol. 3 Ed. I.T.A. Mostaganem. 105p.

- ITAB et ARVALIS (2013). La fertilisation N-P-K du blé tendre en AB. JTGC13_Poster-1_fertilisation-ble-bio.pptx
- ITGC, 2006. Guide des principales variétés de céréales à paille en Algérie. (Blé dur, blé tendre, orge et avoine). 1er édition, Réalisation ECRIE., Alger
- ITGC (2018) : Billan d'analyse du sol de quelques champs des céréales dans la région de Baraouiya d'El-Khroub.

J

- Joshi, S. K., Sharma, S. N., Sighania, D. L., & Sain, R. S. (2004). Combining ability in the F1 and F2 generations of diallel cross in hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.), *Hereditas*, 141 (2): 115 - 121.
- Jouve, P. et Daoudi, A. (1984). Effets de la date de semis sur l'élaboration du rendement de blé tendre et de l'orge en zones semi-arides et arides (cas du Maroc atlantique). *Agri.Tropic* .Vol. 39 n° 4 : 200.211.
- Justes E. (2013). Nitrogen uptake, partitioning and remobilization in plants: sources of variation and ecological significance. *Annals of Botany*, 112(2), 347-358.

K

- Khayatnezhad, M, Gholamin, R., Jamaati-e-Somarin, S.H., Zabihie-Mahmoodabad, R. (2011). The leaf chlorophyll content and stress resistance relationship considering in Corn cultivars (*Zea mays*). *Adv. Environ. Biol.*, 5(1), 118-122.
- Khettal M. (1995). Fertilisation azotée du triticales en yone subhumide. Thes.Deprt. Agro. Univ. Blida.
- Kiliç, H. and T. Yağbasanlar. 2010. The effect of drought stress on grain yield, yield components and some quality traits of durum wheat (*Triticum turgidum* ssp. durum) cultivars. *Not. Bot. Hort. Agrobot. Cluj*. 38 (1), 164-170.
- Kichey, T., Hirel, B., Heumez, E., Dubois, F., & Le Gouis, J. (2007). In winter wheat (*Triticum aestivum* L.), post-anthesis nitrogen uptake and remobilisation to the grain correlates with agronomic traits and nitrogen physiological markers. *Field Crops Research*, 102(1), 22-32. DOI: 10.1016/j.fcr.2007.02.006
- Kirkegaard J.A et Lilley J.M. (2007). Root penetration rate - A benchmark to identify soil and plant limitations to rooting depth in wheat. *Australian Journal of Experimental Agriculture*47(5) DOI:10.1071/EA06071
- Kumar, V., Singh, R., Kumar, V., & Kumar, R. (2019). Nitrogen Requirement of Wheat and the Efficiency of Nitrogen Utilization in Relation to Grain Yield. *Indian Journal of Ecology*, 46(4), 647-652.

L

- 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*. Elsevier, pp. 85–156. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)87003-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)87003-8)
- Laclau J-P, Bouillet J-P, Ranger J (2000) Dynamics of biomass and nutrient accumulation in a clonal plantation of Eucalyptus in Congo. *Forest Ecology and Management* 128: 181–196
- Lahmar R., H. Bouzerzour. (2011). Du malch terreux au mulch organique. Revisiter le dry-farmaing pour assurer une transition vers l'agriculture durable dans les hautes plaines Sétifiennes. *Options Méditerranéennes*, 96 : 99-106.

- Latreche F. (2011). Le rendement et l'efficience d'utilisation de l'eau de la culture de blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous les effets du précédent cultural et de l'outil de labour du sol en environnement semi-aride. Thes.mag. univ. Ferhat Abbes Sétif.
- Lea P- J. (1993). "Nitrogen nutrition and use in wheat le journal "Annals of Applied Biology"
- Lehrsch G.A., Sojka R.E., Westermann D.T. (2001). Furrow irrigation and N management strategies to protect water quality. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 32(7&8): 1029-1050.
- Lemaire G., Salette J. (1984). Relation entre la dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I – Etude de l'effet du milieu. *Agronomie* 4, 423 – 430.
- Lemaire G., Gastal F. (1997). N uptake and distribution in plant canopies. In Lemaire G. eds. *Diagnosis on the nitrogen status in crops*. Heidelberg : Springer – Verlag, 3 – 43.
- Lemaire, G., Gastal, F. (2016). L'efficience de l'utilisation de l'azote par les cultures. 19.
- Limaux F. (1989). Mise au point d'itinéraires techniques pour les petites terres en Lorraine. Colloque "Ecophysiologie du blé" Versailles Mars 1989, 10 p. A paraître dans les "Colloques de l'INRA
- Limaux F. (1991). Adaptation de la fertilisation azotée à des systèmes céréaliers moins intensifs. COMIFER - 1er Forum européen de la fertilisation raisonnée, 168 – 178
- Limaux F. (1989). Intérêt du zonage agroclimatique pour l'établissement d'itinéraires techniques. Exemple des petites terres en Lorraine. Commission d'agrométéorologie de l'INRA - Séminaire du Mars 1989, 195 – 202
- Limaux F. (1994). Facteurs de variation du Coefficient Apparent d'Utilisation de l'azote de l'engrais. Conséquences pour la conduite de la fertilisation azotée du blé d'hiver et du maïs en Lorraine. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine. 109p.
- .Li, Y., Zhang, J., Wang, R., Zhao, B., and Shan, L. (2007). Effects of temperature and soil moisture on nitrogen mineralization in different types of soils. *Journal of Environmental Sciences* 19, 1229-1234. DOI: 10.1016/S1672-6529(07)60015-5.
- Li L S. Li X., Zhang X. (2017). Nitrogen use efficiency and nitrogen uptake of winter wheat under different nitrogen rates in the Huang-Huai-Hai Plain of China. *Agricultural Water Management*, vol. 180, pp. 66-72.
- Liu, Y., Zhang, J., Liu, S. Zhang, X. (2013). Temperature sensitivity of soil nitrogen mineralization: a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 67, 19-32. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.07.005>
- López-Bellido R., López-Bellido L., Benítez-Vega et López-Bellido F., (2007). Tillage system, preceding crop, and nitrogen fertilizer in wheat crop. Dans : *Agron.J.*, 99, pp. 66-72.
- Louadi K. (1999) A. Systématique éco-éthologie des abeilles (Hymenoptera, Apoidea) et leurs relations avec l'Agrocénose dans la région de Constantine. Thèse Doc. Etat, Sci, Natu. Univ, Mentouri, Constantine, 202 p.

M

- MAAF. (2016). Recensement et analyse des outils de raisonnement dynamique et de pilotage de la fertilisation azotée, Rapport du Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt. france.

- Maamri, K. 2011. Stabilité du critère de la discrimination du carbone isotopique en relation avec le poids spécifique de la feuille drapeau chez quelques variétés de blé dur cultivées en milieu semi aride. Mémoire de magister. Faculté SNV. UFA, Sétif. 75 p.
- Madaci B. (1991). Contribution à l'étude de l'entomofaune des céréales et particulièrement quelques aspects de la Bio-écologie de *Oulema hoffmannseggii* Lac (Coleoptera Chrysomélidae) dans la région du Khroub, Constantine. Thèse Mag. Agr., Inst. Agro., Batna, 89, 101p.
- Madic, M., Drezner, G., Dvojković, K., Brkić, I., & Vinković, T. (2016). The Influence of Nitrogen Fertilization on Yield and Quality of Winter Wheat. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 81(4), 299-303.
- Mahdi, A., Hadi, H., Al-Maarroof, E., & Jaber, F. (2017). Effect of Irrigation Water Salinity and Water Stress on Wheat Yield and Water Productivity under Greenhouse Condition. *Journal of Environmental Science and Technology*, 10(1), 1-11. COI. 10.3923/jest.2017.1.11.
- Magdoff F.R., Ross D., and Amadon J. (1984). A soil test for nitrogen availability to corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:1301–1304.
- Meena S., Singh S., Singh V. (2017). *Nutrient Management for Sustainable Crop Production in Asia*. Ram Editeur: Springer ISBN: 978-9811047711
- Mefti A., A. Abdelguerfi, A. Chebouti. (2000). Etude de la tolérance à la sécheresse chez quelques populations de *Medicago truncatula* (L.). *Field Crops Research* 66: 165-174. et al. (2005)
- Mekhlouf A., Bouzerzour H., Benmahammed A., Hadj Sahraoui N. & Harkati N. (2005). Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi aride. Sécheresse.
- Mhiri, A. (2002) Le potassium dans les sols de Tunisie, Atelier sur la gestion de la fertilité potassique, acquis et perspectives de la recherche. Institut National Agronomique de Tunisie, 13 p.
- Mekliche A. Hanifi, L. (1983). Etude agronomique, analyse diallèle et cytogénétique de quatre variétés de blé tendre cultivées en Algérie. Thèse de Magister INA, El Harrach, 150 pages
- Mkhabela M.S , Mkhabela M.S et Mashinini N.N (2005). Early maize yield forecasting in the four agro-ecological regions of Swaziland using NDVI data derived from NOAA's-AVHRR. Elsevier *Agricultural and Forest Meteorology*. Volume 129, Issues 1–2, 28 March 2005, Pages 1-9
- Meynard J.M., Boiffin J., Caneill J et Sebilotte M. (1981). Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en champagne crayeuse. II - Type de réponse à la fumure azotée et application à la méthode du bilan prévisionnel. *Agronomie*, 1 (9), 795 - 806
- Meynard J.M. (1985). Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver. Thèse I.N.A.P.G., 244 p.
- Meynard J.M. (1985). Les Besoins En Azote Du Blé D'hiver Jusqu'au Début de La Montaison. *Agronomie* 7 (5): 89-579
- Meynard, J.M. (1987). L'analyse de l'élaboration du rendement des céréales sur les essais de fertilisation. *Pers. Agric.* 115, 76-83.

- Meynard J.M., Limaux F. (1987). Préviation des rendements et conduite de la fertilisation azotée. Cas du blé d'hiver. c.R. Acad. Agric. Fr., 73,117 – 132
- Meynard J. M., Aubry C., 1988. Itinéraires techniques pour le blé en condition d'excès d'eau. Persp. Agric., 126 : 80 – 89.
- MétéoBlue. (2020). Simulation de données climatiques et météorologiques historiques pour Sétif. <https://www.meteoblue.com> > meteobleue.com
- Miao, Y. (2019). Relationship between leaf chlorophyll content and yield in different types of winter wheat. PLOS ONE, 14(5), e0216469.
- Miloudi Nachit. (2008). Produire du blé dur dans une région semi-aride l'Icarda (Centre international de recherche agricole dans les régions sèches). Terre-net média.
- Mingcai, Z. Liuheng, D., Tian, X. (2007). Uniconazole-induced resistance of soybean to water deficit stress in relation to changes in photosynthesis, hormones and antioxidant system. J. Plant Physiol. 164, 709-717.
- Moughli L.(2010). Analyses végétales : pour une optimisation dynamique des apports de l'azote, Agriculture du maghreb, (42) :66-70.
- Moll R.H., Kamprath E.J. and Jackson .A. (1982). Analysis and interprétation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. Agron. j. 74: 562-564.
- Moll R.H., Kamprath E.J. and Jackson W.A. (1987). Development of nitrogen efficient protilic hybrids of maize. Crop Sci.27: 18i-186.
- Mosseddaq F. et Mogli L. (1999). Fertilisation azotée des céréales cas des blés en Bour et en irrigué. Bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA. Transfert de Technologie en Agriculture. Bulletin réalisé à l'institut agronomique et vétérinaire Hassan II. Rabat. N° 62. pp 1-4.
- Mossedeq F. et Smith D.H. (1994). Timing nitrogen application to enhance spring wheat yield in a Mediterranean climate. Agron J 1994; 86. :221-6.

N

- N'Dayegamiye A. (2007). La contribution en azote du sol reliée à la minéralisation de la MO facteur climatique et régies agricoles influençant les taux de minéralisation d'azote. Québec CRAAQ – OAQ, 2007 Colloque sur l'azote.
- Nielsen D.R. (2017). Nitrogen in Agriculture: Sources, Uptake and Management. Éd. Springer ISBN : 978-3-319-58787-4.
- Nielsen, D.R. (2022). Soil Hydrology, Physics, and Chemistry. Ed. John Wiley & Sons.
- Niftal M.(1985). Les incolums des légumineuses et leurs applications. Rome.FAO. pp1-47.
- Nkundikije V. (1974). Résultats d'analyse des sols. Rapport labo. Pédo.INA Alger.

O

- Obulbiga, M.F. and Kaboré-Zoungana, C.Y. (2007) Influence de la fumure azotée et du rythme d'exploitation sur la production de matière sèche et la valeur alimentaire d'Andropogon gayanus Kunth au Burkina Faso. Tropicultura, 25, 161-167.
- Oenema O, Brentrup F, Lammel J, Bascou P, Billen G, Dobermann A, Erisman J W, Garnett T, Hammel M, Hanjotis T, Hillier J, Hoxha A, Jensen LS, Oleszek W, Pallière C, Powlson D, Quemada M, Schulman M, Sutton MA, Winiwarter W. (2015). Nitrogen Use Efficiency (NUE) - an indicator for the utilization of nitrogen in agriculture and food systems Prepared by the EU Nitrogen Expert Panel.

- Olesen Jorgen E., Berntsen Jorgen, Hansen Elly M., Petersen Bjorn M., Petersen J. (2002). Crop nitrogen demand and canopy area expansion in winter wheat during vegetative growth. *European Journal of Agronomy*, 16 : 279 – 294.
- Oweis, T., Tavakkoli, A. (2004). Improving crop production in the dry areas of West Asia and North Africa. In *Water Resources Management in Agriculture* (pp. 139-158). Springer, Dordrecht. DOI: 10.1007/978-94-007-1042-1_10
- Prasad, R. (2007). Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis in vivo. In *Chlorophyll a Fluorescence* (pp. 97-124). Springer, Dordrecht. DOI: 10.1007/978-1-4020-3218-9_6

P

- Papakosta D.K et Garianas A.A. (1991). Nitrogen and dry matter accumulation, remobilization and losses for mediterranean wheat during filling. *Agronomy journal* 83 : 864-870.
- Plas D. (1992). Adaptation régionale du raisonnement de la fertilisation azotée : cas du blé tendre en AUNIS. Thèse U.T.C., 174 p.
- Plénet D. (1995). Fonctionnement des cultures de maïs sous contrainte azotée. Détermination et application d'un indice de nutrition. Thèse de doctorat INPL. pp : 153 – 171.
- Plénet D. (2015). Fertilisation azotée des cultures. Éd. Quae. ISBN : 978-2759222985
- Pontailier S. (1971). Engrais et fumure. 4^{ème} Ed. Presse universitaire de France. 127p.
- Przulj N., Momčilović V. (2001a): Genetic variation for dry matter and nitrogen accumulation and translocation in two-rowed spring barley. I. Dry matter translocation. *Eur. J. Agron.*, 15: 241–254

R

- Rachedi, M.F. (2003). Les céréales en Algérie : Problématique et option de réforme. *Céréaliculture*. N° 38, pp 6-9.
- Rao A.S.P, Reddy K.R, Kakani S.G. (2006). Dry matter and nitrogen accumulation and translocation for spring wheat grown under varying nitrogen and water regimes: *Journal Field Crops Research* . Vol. 98 N° 2-pp 218-228. DOI : 10.1016/j.fcr.2006.02.006
- Raun, W.R., Solie, J.B., Johnson, G.V., Stone, M.L., Mullen, R.W., Freeman, K.W., Thomason, W.E., Lukina, E.V. (2002). Improving Nitrogen Use Efficiency in Cereal Grain Production with Optical Sensing and Variable Rate Application. *Agron. J.* 94, 6.
- Recous S. (1983). Utilisation réelle de l'engrais azoté par une culture de blé; 4 années d'expérimentation avec 15 N. Doc. multigraphié, IN.R.A. - I.T.C.F., 57 p.
- Recous S. (1987). Les mécanismes de transformation de l'azote dans le sol. *Perspectives Agricoles* 115: 100-105.
- Recous S. (1988). Dynamique de l'azote en sol cultivé : organisation microbienne des formes ammoniacale et nitrique, conséquences sur l'utilisation de l'azote des engrais par une culture de blé. Thèse Univ. Claude Bernard-Lyon I, 189 p.
- Reguieg H.A.Y. (2007). Etude de la bontonite sur les sols sableux de la région de Mostaganem. Etude de comportement d'une association blé-pois chiche ? Thes Doct.. INA El Harrache Alger. 140P.
- Remy J.C. (1984). Contribution à l'approche du coefficient d'utilisation de l'azote par la plante. Signification de la valeur A pour l'azote. Meeting GRONINGEN .

Rastoin J.L., Benabderrazik H. (2014). Céréales et oléoprotéagineux au Maghreb : pour un co-développement de filières territorialisées, Paris : IPEMED. Chapitre : Algérie : une agriculture sous fortes contraintes.

S

- Safou-Matondo, R., Ickowicz, A., & Lecomte, P. (2005). Évaluation de la contribution de l'azote prélevé par le blé tendre d'hiver à la production de la matière sèche en région méditerranéenne française. *Agronomie*, 25(5), 465-472. doi:10.1051/agro:2005048
- Samarah N.H. (2005). Effects of drought stress on growth and yield of barley. *Agron Sustain Agronomie* 25(1) Dev 25: 145-14 January 2005 DOI:10.1051/agro:2004064
- Sassi K. (2008). Contribution de l'étude à l'adaptation des cultivars de blé dur (*Triticum durum*. Desf) à l'agriculture biologique. Rendement en grain stabilité et qualité technologique et nutritionnelle.
- SDATWS. (2015). Schéma directeur d'aménagement touristique de la wilaya de Sétif, État des lieux-diagnostic prospectif.
- Schmidt H. et Von Fragstein P. (1999). Importance of varying management and environment conditions in longterm crop rotation trial. In J. E. OLESEN, R. ELTUN, M.J. GOODING, E.S. JENSEN & U. Köpke : Designing and Testing Crop Rotations For Organic Farming. Report n° 1, Copenhagen, 191-202.
- Sebillotte M. (1980). An analysis of yield elaboration in wheat. In « Wheat – Documenta Ciba – Geigy ». Bale. Suisse. 25 – 32.
- Slama, A., Ben Salem, M., Ben Naceur, M., Zid, E.D. (2005). Les céréales en Tunisie : production, effet de la sécheresse et mécanismes de résistance. Institut national de la recherche agronomique de Tunisie (Inrat). Univ. Elmanar. Tunisie. (http://www.johnlibbeyeurotext.fr/fr/revues/agro_biotech/sec/e-docs/00/04/11/2E/telecharger.md).
- Schmidt, J., & Von Fragstein, P. (1999). Utilisation de l'azote minéral par le blé tendre d'hiver en fonction du précédent cultural et de la date de semis. *Agronomie*, 19(5-6), 421-435. doi:10.1051/agro:19990503
- Souissi, A., Bahri, H., Chikh m'hamed, H., Annabi, M. (2018). Une métaanalyse sur les effets de la fertilisation azotée sur le rendement et l'efficacité de l'utilisation de l'azote chez le blé dur en Tunisie 91, 25.
- Steduto P., Atvino A., Maglinlo V., Sisto L. (1986). Analysis of the physiological and reproductive response of five wheat varieties under rainfed and irrigated conditions in southern Italy in : drought resistance in plants: physiological and genetic aspects. EEC. Mtg Amalfi 19 – 23 oct. 86 : 131 –149.
- Subbarao, G. V. , N. Ae and T. Otani 1997. Genotypic variation in iron and aluminiumphosphate solubilizing activity of pigeonpea root exudates under P deficient conditions. *Soil science and plante nutrition*, 43(2), 295-305.
- Sutton M.A., Oenema O., Erisman J.W, Leip A, Van G., Hans et Winiwarter, Wilfried. (2011). Too much of a good thing. 2011. ISBN : 0028-0836.

T

Tadesse, T., Abraha, T., Adgo, E., Girmay, G., Gebremedhin, B. (2019). Effects of Nitrogen Fertilization and Soil Moisture on Wheat Productivity and Nitrogen Use Efficiency

- under Different Climate Conditions. *Agronomy*, 9(5), 249. DOI: 10.3390/agronomy9050249.
- Taureau J. C., 1987. Fournitures du sol mesurées et calculées. Conséquences. perspectives Agricoles, 115 : 59-69.
- Thomas H., Stoddart J. L. (1980). Leaf senescence. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, 31, 83-111.
- Torbert H.A., Wood C.W. (1992). Effects of soil compaction and water-filled pore space on soil microbial activity and N losses. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 23(11&12): 1321-1331.
- Triboi E., Gachon L., Morizet J. (1985). Les potentialités de production du blé d'hiver en moyenne montagne du Massif Central. *Agronomie, EDP Sciences*, 5 (2), pp.135-142. ffh1-00884742f
- Triboï E., Ntonga J. (1993). Effet de l'azote et du rayonnement sur le développement des feuilles et de l'épi chez le blé d'hiver : mise en place de l'appareil foliaire et de la structure de l'épi. *Agronomie*. 13 : 253 – 265.
- U
- Ullah, I. (2004). Inheritance of important traits in bread wheat using diallel analysis. PhD, Thesis, NWFP Agri. Univ., Peshawar, Pakistan.
- Ulrich A. (1993). Potato.in : Nutrient deficiencies and toxicities in crop plants, F.Benett,Chapter 15, 194-158pp.
- USDA (2016) Grain: World Markets and Trade TMT.
- USDA Foreign Agricultural Service, 2014. Morocco: grain and feed update (10/22/2014). <http://www.fas.usda.gov/data/moroccograinsand-feed-update>. Accessed 8 June 2015
- Uribelarrea et al., 2007). Tunis
- V
- Valé M. (2006). Quantification et prédiction de la minéralisation nette de l'azote du sol in situ, sous divers pédoclimats et systèmes de culture français. Thes.Doct. Ecole doctorale SEVAB (Sciences Ecologiques, Vétérinaires, Agronomiques et Bioingénieries). Spécialité : Fonctionnement des écosystèmes et agrosystèmes. Institut polytechnique de Toulouse.
- Valé M., Laurent F. Mary B., Justes E. Mangin M. (2007). Minéralisation de l'azote organique. Effets de la température et de l'humidité du sol. *Perspectives agricoles N° 331 • FÉVRIER 2007*. PP 46-49.
- W
- Wallace A , Johnston H. (2016). *Fertilizer Technology and Application* . Éd. John Wiley & Sons ISBN . 978-1-119-24773-2
- Wang, Z.; Li, S.; Vera, C.L.; Malhi, S.S. (2005). Effects of water deficit and supplemental irrigation on winter wheat growth, grain yield and quality, nutrient uptake, and residual mineral nitrogen in soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 36, 1405–1419p.
- Wang X., Chen X., Liu L., Ju H., Liu L. Zhang Q., Li, Zhang L. (2017). Optimizing nitrogen fertilization to improve grain yield and nitrogen use efficiency of winter wheat in a semi-arid region *Journal : PLOS ONE*. DOI. 10.1371/journal.pone.0172329.
- Wang, H., Chen, X., Xu, C., Zhou, S., & Li, F. (2019). Nitrogen uptake, utilization efficiency, and response to fertilizer N in wheat under different soil water conditions. *Agronomy Journal*, 111(5), 2374-2384.

Whitmore A.P., Addiscott T.M. (1987). A function for describing nitrogen uptake, dry matter production and rooting by wheat crops. *Plant and Soil*101, 51 - 60.

Y

Yang, J. H., & Zhang, J. H. (2006). Effects of nitrogen fertilization on leaf senescence and grain protein accumulation in wheat cultivars differing in protein concentration in grains. *Plant and Soil*, 282(1-2), 259-270.

Yang, L., Xue, Q., Zhang, Y., & Zhang, W. (2017). Nitrogen uptake and utilization efficiency in wheat as affected by nitrogen rate and timing. *Crop Science*, 57(1), 423-431.

Z

Zahm F. et Mouchet C. (2011). De la responsabilité sociétale d'une exploitation agricole à la mesure de sa performance globale *Revue de la littérature et application avec la méthode IDEA*. Open edition journals. URL : <http://journals.openedition.org/ei/516> DOI : 10.4000/ei.516 ISSN : 2553-189.

Zak D, Holmes W, MacDonald N, et Pregitzer K (1999) Soil temperature, matric potential, and the kinetics of microbial respiration and nitrogen mineralization. *Soil Sci Soc Am J* 63: 575-584

Zair M. (1994). L'irrigation d'appoint et fertilisation azotée de blé dur. *Céréaliculture* n° 2.

Zhang X., Hennessey T.C., Heinemann A., (1997). Acclimation of loblolly pine (*Pinus taeda*) foliage light intensity as related to leaf nitrogen availability. *National Research Council of Canada, Ottawa, ON, Canada*, 27: 1032-1040.

Zhou, L-Y. 1995. Water consumption and water use efficiency of wheat field in Fengqiu region. *Chin. J. Appl. Ecol.*, n. 6, p. 57–61.

Zhou T., Zhang Y., Pan G., Li J., Haynes C. T., Yin W. Wu, Y., Liu L., Zhang Z., Chen F.. (2008). Effects of rainfall patterns on soil nitrogen mineralization in a semi-arid grassland. *Journal . Geoderma .Volume : 312 Pages : 104-112 DOI : 10.1016/j.geoderma.2017.10.026*

Ziadi N. (2007). Utilisation des engrais minéraux azotés en grandes cultures : description des différentes formes et leurs impacts agroenvironnement. *Colloque sur l'azote. CRAAQ. OAQ 2007*.

Site Internet :

Agenceecofin. (2022). <https://www.agenceecofin.com>

CIC. (2010) : Conseil International des Céréales. Chiffres du 26/06/2014. <http://www.agpb.com/documentation-et-publications/recoltes/160-monde-donnees-globaleset-par-pays-sur-le-marche-des-ce>

CIC. Conseil International des Céréales. 2018. Les statistiques mondiales. *Marché des céréales*, 399.<https://www.igc.int/fr/>.

FAO (2016) *Crop Prospects and Food Situation*. October, 1–42.

FAO. (2018). *Situation mondiale concernant les céréales*. <http://www.fao.org/3/a-BT086f.pdf>

FAOSTAT. (2019) a. URL <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (accessed 3.21.19).

FAOSTAT (WWW Document),2019b.url. <https://www.FAO.org/FAOSTAT/en/data/QC> accessed 3.21.19

FAOSTAT (2020). *Données statistiques de la FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nations)* www.FAOstate.com

FAO (2020). Situation alimentaire mondiale. <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/fr>.

FAO. (2021). Situation alimentaire mondiale. <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/fr>.

FAOSTAT (<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>).

Annexes

Tableau 1. Valeurs moyennes de l'humidité du sol dans la région de Constantine, sous l'effet des facteurs (stade, année et profondeur), test fisher au seuil 5 %.

Variables		Effet moyen			
Stade	Semis	20.023c			
	Début tallage	20.719a			
	Plein Tallage	20.163 b			
	Montaison	17.009d			
	Epiaison	14.129 ^e			
	Floraison	12.543f			
	Maturation	11.256 g			
Année	18/19	19.666a			
	17/18	16.844 b			
	16/17	13.137c			
Profondeur	0-20	16.226 b			
	20-40	16.872a			
Source variation	DDL	Somme des carrés	MC	F	Pr > F
Stade ^{***}	6	1667.794	277.966	12 929.594	< 0,0001
Année ^{***}	2	900.746	450.373	20 949.118	< 0,0001
Profondeur ^{***}	1	13.153	13.153	611.822	< 0,0001
Satde*Campgne ^{***}	12	815.542	67.962	3161.248	< 0,0001
Satde*Profondeur ^{***}	6	4.395	0.733	34.075	< 0,0001
Campgne*Profondeur ^{***}	2	4.444	2.222	103.351	< 0,0001
Satde*Campgne*Profondeur ^{***}	12	5.607	0.467	21.735	< 0,0001
	Stade* année	Stade profondeur			
Satde-début tallage*Campgne-16/17	13.252M	Satde-début tallage*Profondeur-0-20			20.622B
Satde-début tallage*Campgne-17/18	19.475G	Satde-début tallage*Profondeur-20-40			20.817A

Satde-début tallage*Campgne-18/19	29.432A	Satde-Epaison*Profondeur-0-20	13.993H
Satde-Epaison*Campgne-16/17	11.875O	Satde-Epaison*Profondeur-20-40	14.266G
Satde-Epaison*Campgne-17/18	14.948K	Satde-Floaraison*Profondeur-0-20	12.339J
Satde-Epaison*Campgne-18/19	15.565I	Satde-Floaraison*Profondeur-20-40	12.747I
Satde-Floaraison*Campgne-16/17	11.250P	Satde-Maturation*Profondeur-0-20	10.728L
Satde-Floaraison*Campgne-17/18	12.750N	Satde-Maturation*Profondeur-20-40	11.783K
Satde-Floaraison*Campgne-18/19	13.628L	Satde-Montaison*Profondeur-0-20	16.433F
Satde-Maturation*Campgne-16/17	11.192P	Satde-Montaison*Profondeur-20-40	17.584 ^E
Satde-Maturation*Campgne-17/18	11.225P	Satde-Plein tallage*Profondeur-0-20	19.669D
Satde-Maturation*Campgne-18/19	11.350P	Satde-Plein tallage*Profondeur-20-40	20.657B
Satde-Montaison*Campgne-16/17	12.000 O	Satde-semis*Profondeur-0-20	19.796D
Satde-Montaison*Campgne-17/18	15.273J	Satde-semis*Profondeur-20-40	20.250C
Satde-Montaison*Campgne-18/19	23.753C		
Satde-Plein tallage*Campgne-16/17	13.737L		
Satde-Plein tallage*Campgne-17/18	22.485D		
Satde-Plein tallage*Campgne-18/19	24.267B		
Satde-semis*Campgne-16/17	18.652H		
Satde-semis*Campgne-17/18	21.750 ^E		
Satde-semis*Campgne-18/19	19.667F		

Tableau 2. Valeurs moyennes de l'humidité du sol dans la région de Sétif, sous l'effet des facteurs (stade, année et profondeur), test fischer au seuil 5 %.

Variables		Effet moyen				
Stade	Semis	18.766a				
	Début tallage	18.609 b				
	Plein Tallage	18.587 b				
	Montaison	16.470c				
	Epiaison	13.493d				
	Floraison	11.976 e				
	Maturation	11.054f				
Année	18/19	18.059a				
	17/18	16.177 b				
	16/17	12.459c				
Profondeur	0-20	15.064 b				
	20-40	15.816a				
Source variation	DDL	Somme des carrés	MC	F	Pr > F	
Stade***	6	1808.617	301.436	12 860.952	< 0,0001	
Année ***	2	1023.305	511.652	21 829.948	< 0,0001	
Profondeur ***	1	23.755	23.755	1013.529	< 0,0001	
Satde*Campgne ***	12	911.006	75.917	3239.051	< 0,0001	
Satde*Profondeur ***	6	3.771	0.629	26.816	< 0,0001	
Campgne*Profondeur ***	2	14.065	7.032	300.041	< 0,0001	
Satde*Campgne*Profondeur ***	12	17.692	1.474	62.902	< 0,0001	
	Stade* année	Stade profondeur				
Satde-début tallage*Campgne-16/17	11.807L	Satde-début tallage*Profondeur-0-20			18.230C	
Satde-début tallage*Campgne-	18.56 ^E	Satde-début tallage*Profondeur-			18.798A	

17/18		20-40	
Satde-début tallage*Campgne-18/19	25.458A	Satde-Epaison*Profondeur-0-20	13.113H
Satde-Epaison*Campgne-16/17	11.190M	Satde-Epaison*Profondeur-20-40	13.682G
Satde-Epaison*Campgne-17/18	14.608H	Satde-Floaraison*Profondeur-0-20	11.673J
Satde-Epaison*Campgne-18/19	14.680H	Satde-Floaraison*Profondeur-20-40	12.128I
Satde-Floaraison*Campgne-16/17	10.284O	Satde-Maturation*Profondeur-0-20	10.424L
Satde-Floaraison*Campgne-17/18	12.404K	Satde-Maturation*Profondeur-20-40	11.369K
Satde-Floaraison*Campgne-18/19	13.240J	Satde-Montaison*Profondeur-0-20	15.564 ^F
Satde-Maturation*Campgne-16/17	11.172M	Satde-Montaison*Profondeur-20-40	16.923 E
Satde-Maturation*Campgne-17/18	10.861N	Satde-Plein tallage*Profondeur-0-20	18.017D
Satde-Maturation*Campgne-18/19	11.129M	Satde-Plein tallage*Profondeur-20-40	18.87A
Satde-Montaison*Campgne-16/17	11.833L	Satde-semis*Profondeur-0-20	18.423B
Satde-Montaison*Campgne-17/18	14.736H	Satde-semis*Profondeur-20-40	18.938A
Satde-Montaison*Campgne-18/19	22.842B		
Satde-Plein tallage*Campgne-16/17	13.567I		
Satde-Plein tallage*Campgne-17/18	21.359C		
Satde-Plein tallage*Campgne-18/19	20.836D		
Satde-semis*Campgne-16/17	17.360G		
Satde-semis*Campgne-17/18	20.708D		
Satde-semis*Campgne-18/19	18.231F		

Tableau 3. Valeurs moyennes de l'azote minéral du sol des différents stades de blé, dans la région de Constantine, sous l'effet des facteurs (Traitements et campanes), test fischer au seuil 5 %.

Effet moyen		Semis	Tallage	Début montaiso n	Mi- montaiso n	Floraison	Maturité
Traitement	D3	11.38ab	14.924a	5.731a	12.411a	8.124 b	13.436a
	D2	11.32ab	13.564 b	5.738a	11.314 b	13.198a	12.440 b
	D1	11.43a	13.564 b	4.566 b	8.508c	8.069 b	8.409c
	T	11.07 b	12.789c	5.637a	5.170d	4.541c	6.218d
Pr > F Significatif		0.040 *	< 0,0001 ***				
Année	2017-2018	12.00a	14.882a	6.121a	10.191a	9.323a	10.993a
	2018-2019	11.99a	14.684a	5.947 b	9.703 b	9.029 b	10.720 b
	2016-2017	9.91 b	11.495 b	6.121c	8.158c	7.098c	8.663c
Pr > F Significatif		< 0,0001 ***					
Traitement*Année	Trt- T*Année-16-17	9.83C	11.00A	4.41 E	4.01J	3.58F	5.00G
	Trt- T*Année-17-18	12.00A	14.01A	6.50A	6.00H	5.00 E	7.00F
	Trt- T*Année-18-19	11.38B	13.34B	6.00B	5.50I	5.04 E	6.65F
	Trt-D1*Année-16-17	9.83C	11.44B	3.35F	7.20G	6.70D	7.03F
	Trt-D1*Année-17-18	12.00A	14.70BC	5.00D	9.26F	9.00C	9.19 E
	Trt-D1*Année-18-19	12.47A	14.26BC	5.33C	9.05F	8.50C	9.00 E
	Trt-D2*Année-16-17	10.00C	11.66BC	4.49 E	10.00 ^E	11.25B	10.72D
	Trt-D2*Année-17-18	12.00A	14.67C	6.48A	12.11C	14.26A	13.43B
	Trt-D2*Année-2018-2019	11.96A	14.36D	6.23 AB	11.83C	14.07A	13.16B

	Trt-D3*Année-16-17	10.00C	11.86D	4.48 E	11.41D	6.85D	11.89C
	Trt-D3*Année-17-18	12.00A	16.14D	6.49A	13.39A	9.02C	14.34A
	Trt-D3*Année-18-19	12.14A	16.76D	6.21B	4.01B	8.50C	14.06A
	Pr > F	0.027	0.009	0.016	0.004	0.000	0.119
	Significatif	*	**	*	**	***	NS

Tableau 4. Valeurs moyennes de l'azote minéral du sol des différents stades de blé, dans la région de Sétif, sous l'effet des facteurs (Traitements et campanes), test fischer au seuil 5 %.

Effet moyen		Semis	Tallage	Début montaison	Mi- montaison	Floraison	Maturité
Traitement	T	10.793 b	12.474c	5.332a	5.118c	4.500c	5.967d
	D1	11.241a	13.107 b	4.254 b	8.102 b	7.867 b	8.177c
	D2	11.213a	13.448 b	5.422a	12.259a	12.882a	12.064 b
	D3	11.213a	14.767a	5.511a	12.120a	7.663 b	13.104a
Pr > F		0.006	< 0,0001				
Significatif		*	***	***	***	***	***
Année	2018-2019	11.990a	14.000 b	5.623a	9.344 b	8.718 b	10.273 b
	2017-2018	11.500 b	14.657a	5.784a	10.785a	9.122a	10.707a
	2016-2017	9.813c	11.690c	3.983 b	8.070 b	6.845c	8.504c
Pr > F		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0.002	< 0,0001	< 0,0001
Significatif		***	***	***	**	***	***
Traitement*Année	Trt- T*Année-16-17	9.50D	11.24 ^E	4.16C	4.00A	3.50A	5.00A
	Trt- T*Année-17-18	11.50BC	13.67BC	6.10A	6.09AB	5.00A	6.90A
	Trt- T*Année-18-19	11.38C	12.50D	5.73A	5.26ABC	5.00B	6.00B
	Trt-D1*Année-16-17	9.75D	11.64DE	3.21D	7.12ABC	6.55C	6.83B
	Trt-D1*Année-17-18	11.50BC	14.27BC	4.88B	8.79ABC	8.89C	9.00C

Trt-D1*Année-18-19	12.47A	13.40C	4.66BC	8.39BCD	8.15C	8.69D
Trt-D2*Année-16-17	10.D	11.80DE	4.23C	9.90BCDE	10.99C	10.60 E
Trt-D2*Année-17-18	11.50BC	14.53B	6.04A	15.30CDE	13.89D	12.85 E
Trt-D2*Année-2018-2019	11.967ABC	14.00B	5.98A	11.57DEF	13.76D	12.73F
Pr > F	0.034	0.001	0.726	0.445	0.055	0.227
Significatif	*	**	NS	NS	*	NS

Tableau 5. Valeurs moyennes de la matière sèche des différents stades de blé, dans la région de Constantine, sous l'effet des facteurs (Traitements et campanes), test fisher au seuil 5 %.

Effet moyen		Tallage	Début montaison	Mi- montaison	Floraison	Maturité
Traitement	D3	6.10A	20.41A	33.39A	42.32A	41.97A
	D2	6.15A	17.82B	31.63B	40.35B	39.91B
	D1	6.26A	13.6C	24.85C	34.44C	34.05C
	T	6.1A	10.3D	16.02D	22.71D	22.10D
Pr > F		0.157	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Significatif		NS	***	***	***	***
Année	2017-2018	6.03B	15.83A	29.36A	37.66A	37.32A
	2018-2019	6.45A	15.95A	28.39B	37.11B	36.58B
	2016-2017	6.05B	14.92B	21.67C	30.10C	29.62C
Pr > F		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Significatif		***	***	***	***	***
ent*An née	Trt -T*Année-16/17	6.00C	10.01G	11.41J	16.51G	16.00G
	Trt -T*Année-17/18	6.00C	10.33G	17.02I	26.03F	25.13F

Trt -T*Année-18/19	6.56AB	10.75 GC	19.64H	25.58F	25.16F
Trt -D1*Année-16/17	6.03C	12.28F	20.90G	30.85 ^E	30.33 ^E
Trt -D1*Année-17/18	6.10C	14.02 ^E	27.09F	37.30C	37.16C
Trt -D1*Année-18/19	6.66A	14.75D	26.57F	35.17D	34.66D
Trt -D2*Année-16/17	6.20C	17.75C	26.46F	35.58D	35.00D
Trt -D2*Année-17/18	6.01C	17.50C	35.50B	42.70B	42.58B
Trt -D2*Année-18/19	6.26BC	18.21C	32.93D	42.76B	42.16B
Trt -D3*Année-16/17	6.00C	19.66B	27.92 ^E	37.44C	37.16C
Trt -D3*Année-17/18	6.01C	21.50A	37.83A	44.60A	44.41A
Trt -D3*Année-18/19	6.30BC	20.08E	34.43C	44.92A	44.33A
Pr > F	0.052	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Significatif	*	***	***	***	***

Tableau 6. Valeurs moyennes de la matière sèche pour les différents stades de blé, dans la région de Constantine, sous l'effet des facteurs (Traitements et campanes), test fischer au seuil 5 %.

Effet moyen		Tallage	Début montaison	Mi- montaison	Floraison	Maturité
Traitement	D3	6,21 ab	19,79a	34,16 a	41,89a	41,14 a
	D2	6,12 b	17,61 b	32,14 b	39,65 b	38,86 b
	D1	6,32 a	13,47c	23,85c	33,36c	32,47c
	T	6,15 ab	9,82d	15,69d	22,21d	21,63d
Pr > F		0.037		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Significatif		*		***	***	***
Année	2017-2018	6,32a	16,01a	30,89a	41,25a	40,01a
	2018-2019	6,21 a	15,64a	27,51 b	35,77 b	35,25 b
	2016-2017	6,06 b	13,86 b	20,97c	25,81c	25,33c

Pr > F		0.001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Significatif		**	***	***	***	***
Traitement* Année	Trt -T*Année-16/17	6,13bc	8,68 h	10,28 j	14,48 j	14,00 k
	Trt -T*Année-17/18	6,16bc	10,20 g	19,48 h	27,250 h	26,41 i
	Trt -T*Année-18/19	6,16bc	10,58 g	17,31 i	24,91 i	24,50 j
	Trt -D1*Année-16/17	6,03bc	11,66 f	18,90 h	25,58 i	25,00 j
	Trt -D1*Année-17/18	6,66 a	14,417 e	27,08 f	40,33d	38,76 ^e
	Trt -D1*Année-18/19	6,26 bc	14,333 e	25,57 g	34,17e	33,66 f
	Trt -D2*Année-16/17	6,10 bc	16,783 d	26,08 g	30,43 g	30,00 h
	Trt -D2*Année-17/18	6,03 bc	18,467 c	37,60 b	47,43 b	46,10 b
	Trt -D2*Année-18/19	6,23 bc	17,583 c	32,75d	41,10d	40,50d
	Trt -D3*Année-16/17	6,00 c	18,333 c	28,63e	32,75 f	32,33 g
	Trt -D3*Année-17/18	6,43 ab	20,963 a	39,43a	50,00 a	48,75a
	Trt -D3*Année-18/19	6,20 bc	20,083 b	34,43c	42,92 c	42,33c
	Pr > F		0.004	0.019	< 0,0001	< 0,0001
Significatif		**	*	***	***	***

Tableau 7. Valeur moyennes de l'absorption et l'assimilation de l'azote par le blé aux différents stades de développement, dans la région de Constantine, sous l'effet des facteurs (Traitements et campanes), test fisher au seuil 5 %.

Effet moyen		Tallage	Début montaison	Mi- montaison	Floraison	Maturité Totale	Grains	Paille
Traitement	T	6.043 b	42.431d	60.414d	48.038c	55.387d	17.573d	37.813d
	D1	6.044 b	58.414c	98.250c	120.268 b	94.379c	29.486c	64.893c
	D2	7.431a	81.859 b	120.152 b	138.816a	145.976a	39.940a	106.036a
	D3	7.484a	84.057a	129.012a	150.639a	129.377 b	34.907 b	94.470 b

Pr > F		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Significatif		***	***	***	***	***	***	***
Année	2018-2019	7.414a	76.980 b	124.738 b	133.288a	133.649 b	35.023 b	98.627 b
	2017-2018	7.649a	80.265a	128.388a	132.948a	138.945a	37.590a	101.355a
	2016-2017	5.189 b	42.826c	52.746c	77.085 b	46.244c	18.817c	27.428c
Pr > F		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Significatif		***	***	***	***	***	***	***
Traitement* Année	Trt -T*Année-16/17	6,000 c	10,010 g	11,417 j	16,517 g	16,000 g	6,000 c	10,010 g
	Trt -T*Année-17/18	6,000 c	10,333 g	17,023 i	26,030 f	25,133 f	6,000 c	10,333 g
	Trt -T*Année-18/19	6,567 ab	10,750 g	19,647 h	25,583 f	25,167 f	6,567 ab	10,750 g
	Trt -D1*Année-16/17	6,033 c	12,280 f	20,900 g	30,857 e	30,333 e	6,033 c	12,280 f
	Trt -D1*Année-17/18	6,100 c	14,020 e	27,097 f	37,307 c	37,167 c	6,100 c	14,020 e
	Trt -D1*Année-18/19	6,667 a	14,750 d	26,577 f	35,173 d	34,667 d	6,667 a	14,750 d
	Trt -D2*Année-16/17	6,200 c	17,750 c	26,467 f	35,587 d	35,000 d	6,200 c	17,750 c
	Trt -D2*Année-17/18	6,010 c	17,500 c	35,500 b	42,703 b	42,583 b	6,010 c	17,500 c
	Trt -D2*Année-18/19	6,267 bc	18,217 c	32,933 d	42,767 b	42,167 b	6,267 bc	18,217 c
	Trt -D3*Année-16/17	6,000 c	19,667 b	27,923 e	37,440 c	37,167 c	6,000 c	19,667 b
	Trt -D3*Année-17/18	6,010 c	21,500 a	37,833 a	44,603 a	44,417 a	6,010 c	21,500 a
	Trt -D3*Année-18/19	6,300 bc	20,083 b	34,437 c	44,923 a	44,333 a	6,300 bc	20,083 b
Pr > F		0.024	< 0,0001	< 0,0001	0.007	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Significatif		*	***	***	**	***	***	***

Tableau 8. Valeur moyennes de l'absorption et l'assimilation de l'azote par le blé aux différents stades de développement, dans la région de Sétif, sous l'effet des facteurs (Traitements et campanes), test fisher au seuil 5 %.

Effet moyen		Tallage	Début montaison	Mi-montaison	Floraison	Maturité	Grains	Paille
Traitement	T	5.427c	41.086d	60.038d	53.162d	54.051c	16.827d	37.224d
	D1	5.898 b	57.257c	97.516c	119.233c	92.483c	28.443c	64.040c
	D2	6.907a	80.500 b	118.494 b	142.914 b	143.376a	38.823a	104.552a
	D3	6.860a	83.029a	127.652a	149.382a	127.138 b	33.862 b	93.276 b
Pr > F		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Significatif		***	***	***	***	***	***	***
Année	2018-2019	6.925a	75.740 b	123.820 b	131.186 b	131.731 b	34.203 b	97.528 b
	2017-2018	6.900a	78.626a	127.126a	136.958a	136.554a	36.333a	100.221a
	2016-2017	4.993 b	42.038c	51.829c	80.376c	44.501c	17.931c	26.570c
Pr > F		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Significatif		***	***	***	***	***	***	***
Traitement*Année	Trt -T*Année-16/17	6,133 bc	8,680 h	10,283 j	14,483 j	14,000 k	6,133 bc	8,680 h
	Trt -T*Année-17/18	6,167 bc	10,200 g	19,480 h	27,250 h	26,410 i	6,167 bc	10,200 g
	Trt -T*Année-18/19	6,167 bc	10,583 g	17,313 i	24,917 i	24,500 j	6,167 bc	10,583 g
	Trt -D1*Année-16/17	6,033 bc	11,667 f	18,900 h	25,580 i	25,000 j	6,033 bc	11,667 f
	Trt -D1*Année-17/18	6,667 a	14,417 e	27,080 f	40,333 d	38,767 e	6,667 a	14,417 e
	Trt -D1*Année-18/19	6,267 bc	14,333 e	25,577 g	34,173 e	33,667 f	6,267 bc	14,333 e
	Trt -D2*Année-16/17	6,100 bc	16,783 d	26,083 g	30,433 g	30,000 h	6,100 bc	16,783 d
	Trt -D2*Année-17/18	6,033 bc	18,467 c	37,600 b	47,433 b	46,107 b	6,033 bc	18,467 c

Trt -D2*Année-18/19	6,233 bc	17,583 c	32,750 d	41,100 d	40,500 d	6,233 bc	17,583 c
Trt -D3*Année-16/17	6,000 c	18,333 c	28,633 e	32,757 f	32,333 g	6,000 c	18,333 c
Trt -D3*Année-17/18	6,433 ab	20,963 a	39,437 a	50,003 a	48,757 a	6,433 ab	20,963 a
Trt-D3*Année-18/19	6,200 bc	20,083 b	34,437 c	42,923 c	42,333 c	6,200 bc	20,083 b
	0.001 **	< 0,0001 ***					

Tableau 9. Valeur moyennes des différents paramètres de l'absorption et l'assimilation de l'azote par le blé, dans la région de Constantine, sous l'effet des facteurs (Traitements et campanes), test fisher au seuil 5 %.

Effet moyen		CAU %	IRN %	EUA q/kg
Traitement	D3	35.90c	30,34 d	3,26 a
	D2	61.02a	31,33 c	3,17 a
	D1	37.99c	32,92 a	3,39 a
	T	44.97 b	32,42 b	3,27 a
Pr > F Significatif		< 0,0001***	< 0,0001***	0.937 NS
Année	2017-2018	59.61a	27,85 b	4,60 a
	2018-2019	57.62a	27,12 c	3,05 b
	2016-2017	17.68 b	40,29 a	2,17 c
Pr > F Significatif		< 0,0001 ***	< 0,0001***	< 0,0001 ***
Région * Année	Trt T*Camp16/17	44.97d	36,41 d	3,27 bcd
	Trt T*Camp17/18	44.97d	30,58 e	3,27 bcd
	Trt T*Camp18/19	44.97d	30,27 ef	3,27 bcd
	Trt D1*Camp16/17	6.74 ^e	39,12c	1,94 d
	Trt D1*Camp17/18	55.56c	30,16 ef	4,75 a

Trt D1*Camp18/19	51.66cd	29,48 f	3,48 bcd
Trt D2*Camp16/17	9.65 ^e	43,57 a	1,76 d
Trt D2*Camp17/18	90.04a	25,910 g	3,29 bc
Trt D2*Camp18/19	83.36 b	24,52 h	2,98 d
Trt D3*Camp16/17	9.36 ^e	42,07 b	1,72 d
Trt D3*Camp17/18	47.87d	24,77 h	3,08 bc
TrtD3*Camp18/19	50.49cd	24,19 h	2,74 cd
Pr > F Significatif	< 0,0001 ***	< 0,0001***	0,004***

Tableau 10. Valeur moyennes des différents paramètres de l'absorption et l'assimilation de l'azote par le blé, dans la région de Sétif, sous l'effet des facteurs (Traitements et campanes), test fischer au seuil 5 %.

Effet moyen		CAU %	IRN %	EUA q/kg
Traitement	D3	36,65 d	29,99 d	2,93 b
	D2	59,57 a	31,14 c	2,82 b
	D1	38,432c	32,49 a	3,19 a
	T	44,88 b	31,81 b	2,983 b
Pr > F Significatif		< 0,0001***	< 0,0001 ***	0.006 **
Année	2017-2018	59,20 a	27,37 b	3,56 a
	2018-2019	57,69 b	26,84 c	3,30 b
	2016-2017	17,75 c	39,87 a	2,08 c
Pr > F Significatif		< 0,0001 ***	< 0,0001 ***	< 0,0001 ***
Région * Année	Trt T*Camp16/17	44,88 g	35,58 d	2,98 c
	Trt T*Camp17/18	44,88 g	29,89 e	2,98 c
	Trt T*Camp18/19	44,88 g	29,95 e	2,98 c
	Trt D1*Camp16/17	7,13 i	38,85 c	1,99 d
	Trt D1*Camp17/18	54,77 c	29,64 e	4,03 a

	Trt D1*Camp18/19	53,39 d	28,99 f	3,56 b
	Trt D2*Camp16/17	9,37 h	43,48 a	1,8 e
	Trt D2*Camp17/18	86,75 a	25,32 g	3,67 b
	Trt D2*Camp18/19	82,59 b	24,63 h	3,42 bc
	Trt D3*Camp16/17	9,62 h	41,56 b	1,53 de
	Trt D3*Camp17/18	50,42 e	24,63 h	3,57 b
	TrtD3*Camp18/19	49,91 f	23,78 i	3,25 bc
	Pr > F Significatif	< 0,0001 ***	< 0,0001 ***	< 0,0001 ***

Tableau11. Valeurs moyennes du rendement de grains et de paille, composantes du rendement et Indice de récolte, dans la région de Constantine, sous l'effet des facteurs (région, traitement et année).

Effet moyen		Grains	Paille	Total	IR%	PMG	Epi/m ²	Grains/ épi
Traitement	T	32.00d	30.75d	62.76d	49.63 b	40.11a	124.37d	21.66d
	D1	38.49c	31.86c	70.35c	53.22a	39.86 b	174.35c	27.44c
	D2	40.34 b	33.48 b	73.82 b	53.17a	39.69c	177.85 b	34.11 b
	D3	41.42a	34.51a	75.94a	53.22a	39.20d	185.61a	36.66a
Pr > F Significatif		< 0,0001 ***	0.404 NS	< 0,0001 ***				
Année	2018-2019	46.74a	34.37a	81.12a	57.52a	41.80a	244.46a	34.66a
	2017-2018+	45.87 b	34.09 b	79.96 b	57.26 b	39.69 b	128.15 b	32.08 b
	2016-2017	21.58c	29.48c	51.07	42.16c	37.66c	124.01c	23.16c
Pr > F Significatif		< 0,0001 ***	0.198 NS	< 0,0001 ***	0.013 *	< 0,0001 ***	< 0,0001 ***	< 0,0001 ***
ment* Année	Trt-T*Année-16-17	18.13I	27.83H	45.96I	39.44F	38.01F	117.41F	16.00I
	Trt-T*Année-17-18	38.65 E	32.01D	70.66 E	54.69C	40.01D	122.83 E	23.00G

Trt-T*Année-18-19	39.24 E	32.41D	71.65 E	54.76C	42.31A	132.87CD	26.00F
Trt-D1*Année-16-17	21.53H	28.67G	50.20H	42.88 E	37.84F	123.19 E	20.66H
Trt-D1*Année-17-18	46.01D	33.23C	79.24D	58.05B	39.58 ^E	124.75 E	29.00 E
Trt-D1*Année-18-19	47.94C	33.67C	81.61C	58.74A	42.15A	275.11B	32.66D
Trt-D2*Année-16-17	22.61G	30.10F	52.72B	42.90 E	37.55G	126.93DE	30.66 E
Trt-D2*Année-17-18	49.07B	35.23B	84.31B	58.20B	39.68 E	128.35DE	35.33C
Trt-D2*Année-18-19	49.33B	35.10B	84.43F	58.42AB	41.85B	278.26B	36.33C
Trt-D3*Année-16-17	24.05F	31.34 E	55.39AB	43.42D	37.23H	128.52DE	25.33F
Trt-D3*Année-17-18	49.76AB	35.88A	85.64A	58.10B	39.49 ^E	136.68C	41.00B
Trt-D3*Année-18-19	50.46A	36.31A	86.78A	58.14B	40.88C	291.62A	43.66A
Pr > F	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0.007	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Significatif	***	***	***	**	***	***	***

Tableau12. Valeurs moyennes du rendement de grains et de paille, composantes du rendement et Indice de récolte, dans la région de Sétif, sous l'effet des facteurs (région, traitement et année).

Effet moyen		Grains	Paille	Total	IR%	PMG	Epi/m ²	Grains/épi
Traitement	D'	20.547d	29.098d	49.644d	40.991d	41.341a	276.278a	17.667d
	D1	25.619c	30.931c	56.550c	44.910c	40.796 b	279.383a	19.778c
	D2	30.959 b	32.144 b	63.103 b	48.869 b	40.642 b	586.430a	22.444 b
	D3	33.097a	33.512a	66.609a	49.567a	40.142c	299.306a	25.000a
Pr > F	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0.404	< 0,0001
Significatif	***	***	***	***	***	***	NS	***
Année	2018-2019	28.257 b	30.786c	59.043 b	47.459 b	41.534a	539.224a	21.167 b

	2017-2018	31.947a	32.102a	64.048a	49.626a	41.277 b	322.886a	23.750a
	2016-2017	22.463c	31.377 b	53.839c	41.167c	39.380c	218.938a	18.750c
	Pr > F	< 0,0001	0.198	< 0,0001	0.013	< 0,0001	0.226	< 0,0001
	Significatif	***	NS	***	*	***	NS	***
Traitement*Année	Trt-T*Année-16-17	15.24I	28.18G	43.42H	35.10G	39.80B	212.32A	15.66G
	Trt-T*Année-17-18	24.45F	29.91 E	54.36F	44.97CD	41.66B	306.25A	19.33DE
	Trt-T*Année-18-19	21.94G	29.20F	51.14G	42.90E	42.56A	310.25A	18.00F
	Trt-D1*Année-16-17	20.32H	31.14D	51.47G	39.49F	39.47 E	216.46A	18.33 EF
	Trt-D1*Année-17-18	32.09C	31.71C	63.81C	50.30B	41.41B	315.92A	21.33C
	Trt-D1*Année-18-19	24.43F	29.93 E	54.37F	44.93CD	41.50B	305.77A	19.66D
	Trt-D2*Année-16-17	25.76 ^E	32.13BC	57.89 E	44.49D	39.33 E	221.39A	20.33CD
	Trt-D2*Année-17-18	34.86B	32.62B	67.48B	51.66A	41.32B	321.00A	25.66B
	Trt-D2*Année-18-19	32.25C	31.68C	63.93C	50.45B	41.27B	1216.89A	21.33C
	Trt-D3*Année-16-17	28.52D	34.05A	62.57D	45.58C	38.91F	225.56A	20.66CD
	Trt-D3*Année-17-18	36.38A	34.16A	70.54A	51.57A	40.70C	348.37A	28.66A
	Trt-D3*Année-18-19	34.39B	32.32B	66.71B	51.54A	40.80C	323.97A	25.66B
		Pr > F	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0.002	0.443
	Significatif	***	***	***	***	**	NS	***

Tableau 13. Valeurs moyennes de la chlorophylle des feuilles (lecture SPAD), dans la région de Constantine, sous l'effet des facteurs (région, traitement et année).

Effet moyen		Stade B	Mi-montaison	Floraison
Traitement	D3	35,82 a	42,16 ab	41,18 a
	D2	34,25 b	42,90a	39,84 b
	D1	30,61c	41,53 b	38,74c
	T	28,84d	40,35 c	36,18d

Pr > F		< 0,0001	0.001	< 0,0001	
Significatif		*	**	***	
Année	2017-2018	34,23 a	44,47 a	42,00a	
	2018-2019	33,26 b	43,36 b	41,22a	
	2016-2017	29,65c	37,37c	33,74 b	
Pr > F		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	
Significatif		***	***	***	
Traitement*Année	Trt- T*Année-16-17	26,51 e	35,78 d	31,14 ^e	
	Trt- T*Année-17-18	30,36 d	43,50 ab	38,96c	
	Trt- T*Année-18-19	29,65 d	41,77 b	38,43c	
	Trt-D1*Année-16-17	29,96 d	37,48 cd	33,82d	
	Trt-D1*Année-17-18	31,10 d	44,13 ab	41,40 b	
	Trt-D1*Année-18-19	30,78 d	42,98 ab	40,99 b	
	Trt-D2*Année-16-17	31,17 d	38,40 c	34,51d	
	Trt-D2*Année-17-18	36,43 bc	45,60 a	42,80 ab	
	Trt-D2*Année-2018-2019	35,15 c	44,72 a	42,21 b	
	Trt-D3*Année-16-17	30,96d	37,84 cd	35,48 d	
	Trt-D3*Année-17-18	39,03a	44,66 a	44,83 a	
	Trt-D3*Année-18-19	37,49 ab	43,98 ab	43,23 ab	
	Pr > F		0.001	0.97	0.87
	Significatif		**	NS	NS

Tableau 14. Valeurs moyennes de la chlorophylle des feuilles (lecture SPAD), dans la région de Sétif, sous l'effet des facteurs (région, traitement et année).

Effet moyen		Stade B	Mi-montaison	Floraison
Traitement	D3	35,67 a	41,73 a	40,55 a
	D2	34,00 b	42,46 a	39,31 b
	D1	30,19c	41,27 ab	38,36 b
	T	28,53d	40,14 b	35,60c
Pr > F		< 0,0001	0.001	< 0,0001
Significatif		*	**	***
Année	2017-2018	33,98 a	44,05 a	41,62 a
	2018-2019	32,94 b	43,03 a	40,77 a
	2016-2017	29,38c	37,11 b	32,98 b
Pr > F		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Significatif		***	***	***
Traitement*Année	Trt- T*Année-16-17	25,95 e	35,52 b	30,04 ^e
	Trt- T*Année-17-18	30,13 d	43,23 a	38,70 c
	Trt- T*Année-18-19	29,50 d	41,66 a	38,08 c
	Trt-D1*Année-16-17	29,66 d	37,31 b	33,18 d
	Trt-D1*Année-17-18	30,83 d	43,80a	41,16 b
	Trt-D1*Année-18-19	30,09 d	42,70a	40,75 b
	Trt-D2*Année-16-17	30,70 d	38,05 b	33,93 d
	Trt-D2*Année-17-18	36,24 bc	44,98a	42,30ab
	Trt-D2*Année-2018-2019	35,07 c	44,34a	41,71 b
	Trt-D3*Année-16-17	31,20d	37,58 b	34,78 d

Trt-D3*Année-17-18	38,70a	44,18a	44,33 a
Trt-D3*Année-18-19	37,12 b	43,43a	42,54 ab
Pr > F	0.001	0.970	0.874
Significatif	**	NS	NS

**Tableau 15. Paramètres de l'absorption et de l'assimilation de l'azote du blé dur dans la région de Constantine.
Matrice de corrélation (Pearson).**

Variables	Tallage	deb mont	mi mont	floraison	matur tot	matur grain	matur paille	CAU %	IRN %	EUA q/kg
Tallage	1	0.860	0.834	0.681	0.808	0.801	0.805	0.701	-0.732	0.500
deb mont	0.860	1	0.975	0.913	0.962	0.951	0.959	0.854	-0.775	0.631
mi mont	0.834	0.975	1	0.910	0.969	0.952	0.968	0.877	-0.851	0.690
floraison	0.681	0.913	0.910	1	0.889	0.914	0.877	0.833	-0.628	0.660
matur tot	0.808	0.962	0.969	0.889	1	0.981	0.999	0.948	-0.845	0.683
matur grain	0.801	0.951	0.952	0.914	0.981	1	0.970	0.963	-0.751	0.713
matur paille	0.805	0.959	0.968	0.877	0.999	0.970	1	0.938	-0.864	0.671
CAU %	0.701	0.854	0.877	0.833	0.948	0.963	0.938	1	-0.749	0.670
IRN %	-0.732	-0.775	-0.851	-0.628	-0.845	-0.751	-0.864	-0.749	1	-0.558
EUA q/kg	0.500	0.631	0.690	0.660	0.683	0.713	0.671	0.670	-0.558	1

**Tableau 16. Paramètres de l'absorption et de l'assimilation de l'azote du blé dur dans la région de Sétif.
Matrice de corrélation (Pearson).**

Variables	Tallage	deb mont	mi mont	floraison	matur tot	matur grain	matur paille	CAU %	IRN %	EUA q/kg
Tallage	1	0.814	0.798	0.673	0.812	0.793	0.813	0.728	-0.752	0.566
deb mont	0.814	1	0.973	0.952	0.961	0.953	0.958	0.858	-0.758	0.758
mi mont	0.798	0.973	1	0.935	0.969	0.953	0.967	0.888	-0.845	0.859
Floraison	0.673	0.952	0.935	1	0.906	0.939	0.892	0.852	-0.611	0.800
matur tot	0.812	0.961	0.969	0.906	1	0.983	0.999	0.954	-0.839	0.838
matur grain	0.793	0.953	0.953	0.939	0.983	1	0.973	0.968	-0.748	0.845
matur paille	0.813	0.958	0.967	0.892	0.999	0.973	1	0.945	-0.858	0.831
CAU %	0.728	0.858	0.888	0.852	0.954	0.968	0.945	1	-0.753	0.868
IRN %	-0.752	-0.758	-0.845	-0.611	-0.839	-0.748	-0.858	-0.753	1	-0.751
EUA q/kg	0.566	0.758	0.859	0.800	0.838	0.845	0.831	0.868	-0.751	1

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,05$

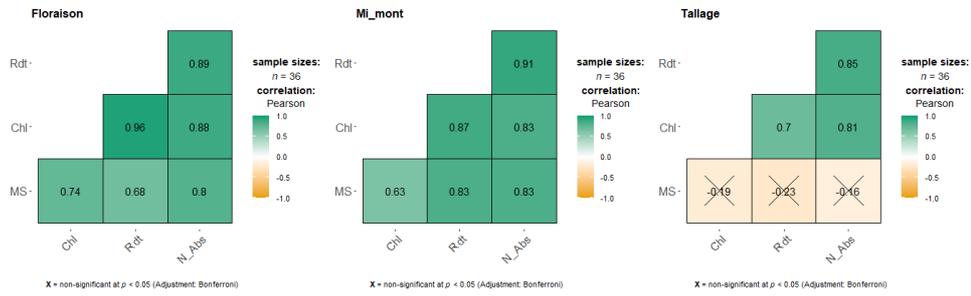


Figure1. Matrice de corrélation MS, chlorophylle et rendement pour les trois stades de mesure.

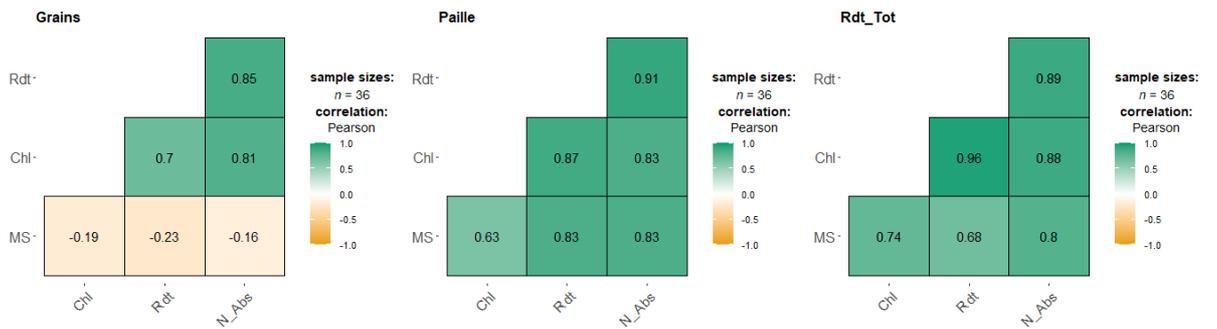


Figure2. Matrice de corrélation MS, chlorophylle et rendement pour les différentes parties de blé dur.

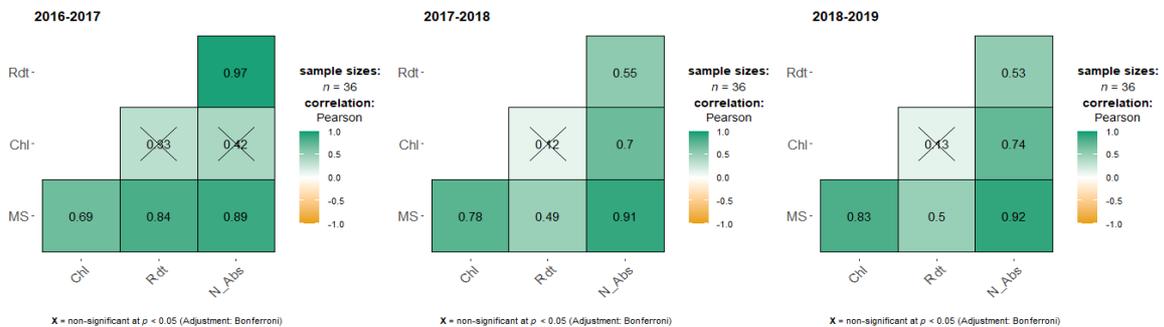


Figure3. Matrice de corrélation MS, chlorophylle et rendement pour les différentes années.

Summary

As part of the search for tools for better management of nitrogen fertilization of crops, we have set ourselves the following objectives:

- Verification and analysis of the response to nitrogen fertilization of durum wheat under rainfed conditions in two semi-arid regions Setif and Constantine
- Evaluation of nitrogen nutrition indicators.

Adjusting nitrogen inputs to the needs of the crop under study to ensure better profitability for the farmer while reducing losses and adverse effects on the environment.

To achieve these objectives, we installed a durum wheat trial (Waha variety) in the two ITGC stations in the two semi-arid regions of Setif and Constantine. It is a complete random block device with three blocks and four doses of nitrogen divided into three inputs: the 1st fraction includes a contribution of mono ammonium phosphate (MAP: 12-52-00) as starter fertilizer applied at a rate of 100 kg ha⁻¹ at sowing. The second fraction consists of an intake of 1/3 of 46 units of N at the 1 cm ear tillering stage (stage A) and finally a third fraction representing 2/3 (30.6 uN) of the total dose provided at the run-up stage (stage B).

. During the cycle, we tracked growth, nitrogen assimilation and yield development. Chlorophyll measurements were made at the early run, mid-run and flowering stages.

The average yield obtained for wheat is 41.42 q/ha for the Constantine region and 33.09q/ha for the Setif region. The yield obtained from the 100kg urea/ha treatment is the best compared to other treatments, it represents 70% and 58% of the potential yield, respectively for the Constantine and Setif site.

The good climatic conditions of the two wet years (2nd and 3rd year) unlike the dry year (1st year) favored an assimilation of N and a significant growth, however a low efficiency of use of N and grain production, the response of the crop to nitrogen fertilization was weak; The optimal dose of inputs is 100 kg of fertilizer/ha.

The mean EUA values are 2.8 for all doses combined for the Setif zone and 2.71 for the Constantine zone.

EUA is significantly correlated with all nitrogen uptake parameters at different stages of cultivation. It is significantly and negatively correlated with DRI.

On the other hand, the N absorbed by the tissues of the plant at mid-run is less well correlated with the chlorophyll number. The sampling date with the best correlation coefficients is the early run stage (stage B) and flowering.

The optimal dose calculated varies from 100 to 150 kg of fertilizer/ha, depending on the region. The latter depends on several parameters.

Keywords : Durum wheat, nitrogen nutrition, nitrogen fertilization, decision support tool, Nitrogen use efficiency (EUA).

ملخص:

كجزء من البحث عن أدوات لتحسين إدارة التسميد النيتروجيني للمحاصيل ، حددنا لأنفسنا الأهداف التالية :

- التحقق وتحليل الاستجابة للتسميد النيتروجيني للقمح القاسي تحت الظروف البعلية في منطقتين شبه جافتين سطيف وقسنطينة
- تقييم مؤشرات التغذية النيتروجينية.

تعديل مدخلات النيتروجين لاحتياجات المحصول قيد الدراسة لضمان ربحية أفضل للمزارع مع تقليل الخسائر والآثار الضارة على البيئة.

ولتحقيق هذه الأهداف، قمنا بتركيب تجربة القمح القاسي (صنف الواحة) في محطتي ITGC في منطقتي سطيف وقسنطينة شبه القاحلتين. إنه جهاز كتلة عشوائية كاملة مع ثلاث كتل وأربع جرعات من النيتروجين مقسمة إلى ثلاثة مدخلات: يتضمن الجزء الأول مساهمة من فوسفات الأمونيوم الأحادي (MAP: 12-52-00) كسماد بادئ يطبق بمعدل 100 كجم هكتار⁻¹ عند البذر. يتكون الجزء الثاني من تناول 3/1 من 46 وحدة من N في مرحلة حراثة الأذن 1 سم (المرحلة A) وأخيراً جزء ثالث يمثل 2/3 (30.6 uN) من الجرعة الإجمالية المقدمة في مرحلة التحضير (المرحلة B).

. خلال الدورة ، تتبعنا النمو واستيعاب النيتروجين وتطوير الغلة. تم إجراء قياسات الكلوروفيل في المراحل المبكرة والمتوسطة والمزهرة.

ويبلغ متوسط المحصول الذي تم الحصول عليه من القمح 41.42 ف لكل هكتار لمنطقة قسنطينة و 33.09 ف لكل هكتار لجهة سطيف. العائد الذي تم الحصول عليه من معالجة 100 كجم يوريا / هكتار هو الأفضل مقارنة بالعلاجات الأخرى ، فهو يمثل 70٪ و 58٪ من المحصول المحتمل ، على التوالي لموقع قسنطينة وسطيف.

الظروف المناخية الجيدة للسنتين الرطبتين (السنة 2 و 3) على عكس السنة الجافة (st1 سنة) فضلت استيعاب N ونمو كبير ، ولكن كفاءة منخفضة في استخدام N وإنتاج الحبوب ، كانت استجابة المحصول للتسميد النيتروجيني ضعيفة ؛ الجرعة المثلى من المدخلات هي 100 كجم من السماد / هكتار.

ويبلغ متوسط قيم EUA 2.8 لجميع الجرعات مجتمعة لمنطقة سطيف و 2.71 لمنطقة قسنطينة.

يرتبط EUA بشكل كبير مع جميع معلمات امتصاص النيتروجين في مراحل مختلفة من الزراعة. يرتبط ارتباطاً كبيراً وسلبياً ب DRI.

من ناحية أخرى ، فإن N الذي تمتصه أنسجة النبات في منتصف المدى أقل ارتباطاً برقم الكلوروفيل. تاريخ أخذ العينات مع أفضل معاملات الارتباط هو مرحلة التشغيل المبكر (المرحلة ب) والإزهار.

تتراوح الجرعة المثلى المحسوبة من 100 إلى 150 كجم من السماد / هكتار ، حسب المنطقة. هذا الأخير يعتمد على عدة معايير. **الكلمات المفتاحية:** القمح القاسي ، التغذية النيتروجينية ، التسميد النيتروجيني ، أداة دعم القرار ، كفاءة استخدام النيتروجين (EUA).