

Modélisation de la plasticité du blé dur en réponse à la variabilité climatique et à la fertilisation azotée.

Auteur : Crauwels, Damien

Promoteur(s) : Dumont, Benjamin; 12622

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences agronomiques, à finalité spécialisée

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/24255>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

MODELISATION DE LA PLASTICITE DU BLE DUR EN REONSE A LA VARIABILITE CLIMATIQUE ET A LA FERTILISATION AZOTEE

CRAUWELS DAMIEN

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

ANNEE ACADEMIQUE 2024-2025

CO-PROMOTEURS : BENJAMIN DUMONT ET RODRIGO MEZA

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

MODELISATION DE LA PLASTICITE DU BLE DUR EN REONSE A LA VARIABILITE CLIMATIQUE ET A LA FERTILISATION AZOTEE

CRAUWELS DAMIEN

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

ANNEE ACADEMIQUE 2024-2025

CO-PROMOTEURS : BENJAMIN DUMONT ET RODRIGO MEZA

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier mes co-promoteurs. Tout d'abord, M. Dumont qui m'a proposé ce sujet, mais m'a également donné au travers de ses cours l'intérêt pour la phytotechnie. Je tiens également à le remercier pour son suivi et ses conseils judicieux tout au long de ce travail. Un grand merci également à Rodrigo Meza de m'avoir transmis une partie de son savoir concernant le blé dur ainsi que pour sa bonne humeur, sa motivation et son aide dans la réalisation des mesures et la rédaction de ce travail.

Je tiens également à remercier Benjamin Van Der Verren pour ses conseils et son aide précieuse dans la prise de mesures. Je remercie également l'ensemble des membres du CRA-W qui ont donné de leur temps pour les nombreuses prises de mesures.

Merci à Christophe pour le temps passé à relire mes codes ainsi que pour ses conseils statistiques.

Merci aux collègues TFEistes pour les bons moments passés ensemble que ce soit au bureau ou plus régulièrement à l'AG. Un merci tout particulier à ceux qui m'ont aidé pour réaliser les biomasses et les LAI (Alex, Gaëtan, Tobias, Erwan, Lola et Valère). Grace à vous, ce fût plus rapide mais surtout bien plus amusant. Merci aux membres du kot-eau (Krack, Tob, Lola, Gaga, Alex et Ani) qui aura très mal porté son nom tout au long de l'année, mais m'aura permis de passer bon nombre de soirées mémorables. Merci à mes fidèles collègues de travaux de groupe (Marylène, Babeth et Alex) avec qui j'ai suivi la quasi-totalité de mes cours de Master.

Un grand merci à Monsieur Lamarche dont l'omniprésence dans ses remerciements est proportionnelle au nombre de bons moments passés ensemble que ce soit en cours, autour d'un verre, en chapi ou à réaliser des LAI.

Enfin, merci à ma famille, tout particulièrement mes parents qui m'ont donné l'opportunité de réaliser mes études à Gembloux, pour m'avoir toujours soutenu et cru en moi.

Résumé

Le blé dur (*Triticum turgidum ssp. durum*) occupe une place stratégique dans l'industrie alimentaire en raison de son utilisation pour la production de pâtes et de couscous. Cette culture, adaptée au climat méditerranéen, n'est pas encore cultivée en Belgique. Les essais mis en place par le CRAW visent à développer la filière en Belgique dans les années à venir. L'évolution du climat tend à permettre la bonne conduite de la culture dans nos régions. La fertilisation azotée constitue l'un des principaux leviers permettant d'optimiser la culture et sa rentabilité. Elle permet d'optimiser les rendements et surtout d'obtenir la qualité requise par les industriels. En plus de cela, la fertilisation doit être adaptée en fonction de l'écophysiologie de la plante et aussi des conditions climatiques. Dans un contexte où les intrants sont onéreux et où leur utilisation doit être raisonnée pour limiter l'impact environnemental, l'identification de la dose optimale et des schémas de fractionnement adapté est un enjeu majeur.

L'étude a été conduite à Gembloux dans un contexte climatique marqué par un printemps chaud et sec. Douze modalités de fertilisation ont été testées : onze avec des apports entre 180 et 240 unités/ha et une modalité témoin non fertilisée. Les mesures étaient principalement portées sur le rendement et ses composantes, avec une analyse approfondie en séparant les épis en quatre catégories selon leur taille.

Les résultats montrent que la modalité non fertilisée enregistre un rendement inférieur de 50% environ aux autres modalités, confirmant le rôle essentiel de l'azote dans la productivité. Parmi les modalités fertilisées, les différences pour le rendement sont faibles tout comme pour les composantes du rendement, suggérant un niveau de fertilisation déjà proche ou supérieur à l'optimum. L'analyse détaillée des composantes indique que les différences s'expliquent principalement par la proportion d'épis de grande taille, tandis que la densité d'épis total et la fertilité des épis au sein des catégories d'épis est stable entre les modalités. Pour les onze modalités fertilisées, les teneurs en protéines dépassent le seuil de 13,5% exigé par les industriels. L'ajout d'un apport supplémentaire d'azote à l'épiaison n'a pas permis d'améliorer significativement ce paramètre.

En conclusion, dans ce contexte, les apports de 180 unités offrent des performances équivalentes aux apports supérieurs. De plus, la limitation des apports d'azote permet de bénéficier d'un moindre cout de production et d'un impact environnemental réduit.

Abstract

Durum wheat (*Triticum turgidum* ssp. *durum*) occupies a strategic place in the food industry due to its use in the production of pasta and couscous. This crop, adapted to the Mediterranean climate, is not yet cultivated in Belgium. The trials set up by CRAW aim to develop the sector in Belgium in the upcoming years. Climate change tends to allow the proper management of the crop in our regions. Nitrogen fertilization constitutes one of the main levers for optimizing the crop and its profitability. It makes it possible to optimize yields and, above all, to obtain the quality required by the industry. In addition, fertilization must be adapted according to the ecophysiology of the plant and also to climatic conditions. In a context where inputs are expensive and where their use must be reasoned to limit the environmental impact, identifying the optimal dose and suitable fractionation schemes is a major challenge.

The study was carried out in Gembloux in a climatic context marked by a warm and dry spring. Twelve fertilization modalities were tested: eleven with inputs between 180 and 240 units/ha and one unfertilized control modality. The measurements were mainly focused on yield and its components, with an in-depth analysis separating the ears into four categories according to their size.

The results show that the unfertilized modality records a yield approximately 50% lower than the other modalities, confirming the essential role of nitrogen in productivity. Among the fertilized modalities, the differences in yield are small, as are those in the yield components, suggesting a fertilization level already close to or above the optimum. The detailed analysis of the components indicates that the differences are mainly explained by the proportion of large ears, while the total ear density and ear fertility within the ear categories are stable between modalities. For the eleven fertilized modalities, protein contents exceed the 13.5% threshold required by the industry. The additional application at heading, which was intended to increase protein content in the relevant modalities, did not significantly improve this parameter.

In conclusion, under these conditions, applications of 180 units provide performance comparable to higher inputs. Furthermore, limiting nitrogen supply helps reduce production costs and lowers environmental impact.

Table des matières

1. Introduction	13
2. Etat de l'art	14
2.1. Le blé dur (<i>Triticum turgidum ssp. durum</i>).....	14
2.1.1. Origine	14
2.1.2. Production.....	14
2.1.3. Ecophysiologie	14
2.1.4. Qualité de la graine	16
2.2. Contraintes environnementales et variabilité climatique	16
2.2.1. Facteurs abiotiques	17
2.2.2. Facteurs biotiques	19
2.3. Gestion des pratiques	20
2.3.1. Travail du sol.....	21
2.3.2. Choix variétal	21
2.3.3. Date et densité de semis	21
2.3.4. Lutte intégrée	22
2.3.5. Fertilisation azotée	22
3. Objectifs	23
4. Méthodologie.....	23
4.1. Site expérimental	23
4.2. Conditions climatiques	24
4.3. Itinéraire technique	26
4.4. Caractéristiques de la variété	27
4.5. Facteurs étudiés	27
4.6. Dispositif de l'essai	28
4.7. Observations et paramètres mesurés	29
4.7.1. Stades phénologiques.....	30
4.7.2. Teneur en azote dans le sol	30
4.7.3. Biomasses sèches	30
4.7.4. Indice de surface foliaire (LAI).....	31
4.7.5. Densité d'épis.....	32
4.7.6. Longueur des épis, nombre d'épillets et nombre de grains.....	33
4.7.7. Densité de grains	33
4.7.8. Analyse infrarouge	33
4.7.9. Rendement.....	34

4.7.10.	Nombre de grains et poids de mille grains (PMG)	34
4.7.11.	Teneur en protéines du grain	34
5.	Analyse des données	35
6.	Résultats.....	36
6.1.	Tests de significativité des facteurs.....	36
6.2.	Biomasses	39
6.3.	Indice de surface foliaire (LAI).....	39
6.3.1.	Stade 30 et 32.....	39
6.3.2.	Stade 39.....	39
6.3.3.	Stade 65.....	41
6.4.	Rendement et ses composantes.....	43
6.4.1.	Rendement.....	43
6.4.2.	Densité d'épis.....	43
6.4.3.	Fertilité des épis	44
6.4.4.	Densité de grains	46
6.4.5.	Corrélation entre les composantes de rendement et le niveau de fertilisation azotée	46
6.5.	Teneur en protéines du grain	47
6.6.	Récapitulatif des composantes de rendement.....	48
6.7.	Rendement et ses composantes par catégorie d'épis	49
6.7.1.	Différenciation des épis	49
6.7.2.	Synthèse des résultats du test ANOVA par catégorie d'épis	52
6.7.3.	Rendements estimés par catégorie	52
6.7.4.	Densité d'épis par catégorie	55
6.7.5.	Fertilité des épis par catégorie.....	58
6.7.6.	PMG par catégorie	59
6.7.7.	Densité de grains par catégorie	59
7.	Discussion.....	62
7.1.	Rendement et composantes	62
7.2.	Protéines.....	62
7.3.	Indice de surface foliaire (LAI).....	63
7.4.	Biomasses	63
7.5.	Catégories d'épis	64
8.	Conclusion et perspectives.....	65
9.	Bibliographie	66
10.	Annexes	74

Table des figures

Figure 1. Gain de rendement moyen apporté par les fongicides - Essais Blé dur en Méditerranée - Rhône-Alpes. (Arvalis, 2024f).....	19
Figure 2. Carte Numérique des sols de Wallonie de l'essai Fertilisation - Blé dur (WalOnMap, 2025).	24
Figure 3. Quantités de précipitations pour le printemps 2025 à Uccle. (IRM, 2025).	25
Figure 4. Température moyenne journalière pour le printemps 2025 à Uccle. (IRM, 2025).	25
Figure 5. Durée d'insolation pour le printemps 2025 à Uccle. (IRM, 2025).	25
Figure 6. Température moyenne journalière pour le mois de juin 2025 à Uccle. (IRM, 2025).	25
Figure 7. Quantités journalières des précipitations pour le mois de juin 2025 à Uccle. (IRM, 2025).....	25
Figure 8. Comportement face aux maladies et caractéristiques physiologiques de la variété Anvergur (Livre Blanc Céréales, 2023).	27
Figure 9. Mise en place pour les prélèvements. (Photo D. Crauwels).	31
Figure 10. Prélèvement des biomasses au champ. (Photos D. Crauwels).....	31
Figure 11. Lavage des biomasses. (Photo D. Crauwels).....	31
Figure 12. Dé coupe de la partie racinaire. (Photo D. Crauwels).....	32
Figure 13. Collage des feuilles sur le papier adhésif. (Photos D. Crauwels)	32
Figure 14. Mesure de la longueur des épis. (Photo D. Crauwels)	33
Figure 15. Broyeur Cyclotec (Photo D. Crauwels).	34
Figure 16. Poudre après broyage des biomasses (Photo D. Crauwels)	34
Figure 17. Analyseur proche infrarouge NIRS DS3 (Photo D. Crauwels).	34
Figure 18. Boxplot de la biomasse des épis au stade 87.	39
Figure 19. Boxplot du LAI de la F1 au stade 39.....	40
Figure 20. Boxplot du LAI de l'ensemble des feuilles au stade 39.....	40
Figure 21. Boxplot du LAI des feuilles hors F1 et F2 au stade 39.....	40
Figure 22. Boxplot du LAI des feuilles F2 au stade 65.	41
Figure 23. Boxplot du LAI des feuilles F1 au stade 65.	41
Figure 24. Boxplot du LAI des tiges au stade 65.	41
Figure 25. Boxplot du LAI de l'ensemble des feuilles au stade 65.....	41
Figure 26. Boxplot du LAI des feuilles hors F1 et F2 au stade 65.	42
Figure 27. Boxplot du rendement.	43
Figure 28. Boxplot de la densité d'épis au stade 65.	44
Figure 29. Boxplot de la densité d'épis au stade 75.	44
Figure 30. Boxplot du nombre d'épillets par épi au stade 75.	45
Figure 31. Boxplot du nombre de grains par épi au stade 75.	45
Figure 32. Boxplot de la densité de grains au stade 75.....	46
Figure 33. Corrélations entre les composantes du rendement, le rendement et la dose d'azote totale.....	47

Figure 34. Boxplot de la teneur en protéines des grains récoltés.....	48
Figure 35. Quartiles et moyennes des catégories d'épis.....	49
Figure 36. Arbre de décision pour le classement des épis.....	50
Figure 37. Histogramme des fréquences cumulées de la longueur des épis avec les valeurs seuils.....	51
Figure 38. Boxplot du rendement estimé pour les grands épis.....	53
Figure 39. Boxplot du rendement estimé pour les épis moyens.....	53
Figure 40. Boxplot du rendement estimé pour les petits épis.....	54
Figure 41. Boxplot du rendement total estimé au stade 87.....	54
Figure 42. Boxplot de la densité des grands épis au stade 87.....	55
Figure 43. Boxplot de la densité des épis moyens au stade 87.....	56
Figure 44. Boxplot de la densité des petits épis au stade 87.....	56
Figure 45. Boxplot de la densité d'épis totale au stade 87.....	57
Figure 46. Boxplot de la fertilité de l'ensemble des épis au stade 87.....	58
Figure 47. Boxplot du PMG total.....	59
Figure 48. Boxplot de la densité de grains des épis moyens au stade 87.....	60
Figure 49. Boxplot de la densité de grains des grands épis au stade 87.....	60
Figure 50. Boxplot de la densité de grains des petits épis au stade 87.....	61
Figure 51. Densité de grains totale au stade 87.....	61

Table des tableaux

Tableau 1. Itinéraire technique pour l'année 2024-2025	26
Tableau 2. Modalités de l'essai en 2025	28
Tableau 3. Variables mesurées.....	29
Tableau 4. Packages utilisés lors de l'analyse statistique.....	35
Tableau 5. Résultats du test Anova sur l'ensemble des variables analysées.	36
Tableau 6. Tableau récapitulatif des résultats du test Anova pour les composantes de rendements au stade 75.....	49
Tableau 7. Catégorisation des épis.....	51
Tableau 8. Tableau récapitulatif des résultats du test Anova pour les composantes de rendements et le rendement estimé au stade 87 par catégorie d'épis.....	52

1. Introduction

D'ici 2100, selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), le territoire belge devrait subir une augmentation de la température moyenne située entre +0,7°C et +5°C (Climat.be, 2025). Cette augmentation sera essentiellement due à des hivers plus doux, mais aussi plus humides. Les conséquences de ce réchauffement causé par l'homme depuis la révolution industrielle sont déjà observables. En effet, entre 1980 et 2020, la température annuelle moyenne a augmenté de 1,9°C en Belgique (climat.be, 2025). Les années 2020 et 2022 sont d'ailleurs les deux années les plus chaudes jamais enregistrées. Ce réchauffement entraîne une intensification des phénomènes météorologiques extrêmes, tels que les vagues de chaleur, les sécheresses et les précipitations intenses. (Hansen *et al.*, 2012 ; Stott, 2016).

En Belgique, le climat permet d'expliquer à lui seul entre 60 et 74 % de la variabilité des rendements agricoles (Gobin, 2010). Plusieurs études ont tenté de déterminer l'impact réel du réchauffement sur les niveaux de production. Malgré des différences dans les résultats obtenus, un constat commun se dégage. La variabilité interannuelle risque d'augmenter fortement avec le réchauffement climatique (Abrha *et al.*, 2012 ; Gobin, 2010 ; climat.be, 2025). Le climat deviendra donc plus incertain avec une augmentation de la fréquence des aléas climatiques tels que les sécheresses, les vagues de chaleur ou les pluies extrêmes. Cela se répercuteira indéniablement sur les revenus des agriculteurs. Face à ce problème, la diversification est l'une des pistes à suivre. En effet, la diversification des cultures permet de diminuer les risques liés aux aléas climatiques et à la volatilité des marchés (Terres Inovia, 2023). De plus, cela favorise une meilleure répartition de la charge de travail, une diminution des intrants et l'ouverture à de nouveaux débouchés.

Le blé dur (*Triticum turgidum ssp. durum*) figure parmi les cultures d'avenir qui pourraient permettre de mieux répondre à l'évolution du climat belge. Pour l'instant, cette culture est inexistante sur le sol belge. L'introduction de la culture pourrait pourtant répondre à la demande croissante en blé dur, tout en réduisant la dépendance aux importations. Le blé dur est adapté aux hivers doux et aux étés secs (CRAW, 2023b). Or, historiquement, le climat belge, plus humide et sujet au gel, ne permettait pas son développement. Toutefois, dans le contexte actuel, avec des hivers moins rudes et des périodes estivales plus sèches, l'introduction du blé dur dans les rotations est envisageable. Les essais réalisés par le Centre wallon de Recherches agronomiques (CRA-W) vont dans ce sens. (CRAW, 2023a ; Livre Blanc Céréales, NDb). Ces essais sont particulièrement importants car ils permettront de définir les bases de la fertilisation de la culture dans les conditions pédoclimatiques belges. Une fertilisation adaptée est essentielle afin de garantir des niveaux de rendements corrects et de limiter les pertes dans l'environnement. Ce travail contribue à l'acquisition des connaissances agronomiques nécessaires à la mise en place de la culture du blé dur en Belgique.

2. Etat de l'art

2.1. Le blé dur (*Triticum turgidum ssp. durum*)

2.1.1. Origine

La domestication des premiers blés a eu lieu il y a environ 10 000 ans et a permis à l'homme de se sédentariser. Les premières céréales cultivées sont l'engrain, l'orge et l'amidonner sauvage (Shewry, 2009). Elles sont originaires du sud-est de la Turquie d'après leur génétique. Le blé dur est un blé tétraploïde (BBAA) contrairement au blé tendre qui est hexaploïde (BBAADD). Leurs génomes A proviennent de leur ancêtre commun, *Triticum urartu*. Le génome B, qui les compose, serait probablement dérivé du génome S de l'épilogue faux-épeautre, *Aegilops speltoides* (Nair, 2019). L'hybridation de ces deux génomes a donné naissance aux blés tétraploïdes. A partir de l'amidonner cultivé, *Triticum turgidum diccon*, tétraploïde de génome BBAA, une mutation naturelle menant à l'obtention d'un grain nu a donné naissance au blé dur, *Triticum turgidum ssp. durum*. La seconde hybridation menant au blé tendre a eu lieu entre un blé tétraploïde cultivé et le génome D provenant de l'égilope de Tausch, *Aegilops tauschii* (Cavalet-Giorsa et al., 2024 ; Nair, 2019). Ce génome D a permis au blé tendre de s'adapter aux hivers froids et aux étés humides tandis que le blé dur est plus adapté aux hivers doux et aux étés secs typiques du climat méditerranéen.

2.1.2. Production

A l'échelle de l'Europe, le blé dur est cultivé sur 2,07 millions d'hectares, loin derrière l'orge et le blé tendre qui occupent les deux premières places avec respectivement 10,35 et 20,24 millions d'hectares cultivés (European Commission, 2025). La production moyenne de l'Union européenne des 5 dernières années s'élève à 7,5 millions de tonnes pour un rendement moyen de 3,43 T/ha. La production de blé dur européen se concentre autour du bassin méditerranéen. L'Italie est le principal producteur européen avec 3,5 millions de tonnes en 2024. La France occupe la deuxième place avec 1,2 millions de tonnes et l'Espagne complète le podium avec 690 000 tonnes produites en 2024.

A l'heure actuelle, la culture de blé dur est quasi inexistante en Belgique. Pourtant, durant la saison 2023/2024, la Belgique a importé un total de 74 744 tonnes de blé dur (Eurostat, 2025). La filière de transformation existe et le potentiel de valorisation est présent sur le sol belge avec des marques comme Saubry notamment (CRAW, 2023a).

2.1.3. Ecophysiologie

Le blé dur (*Triticum turgidum ssp. durum*) est une céréale monocotylédone de la famille des Poacées. Tout comme le blé tendre (*Triticum aestivum L.*) communément appelé froment en Belgique, le blé dur fait partie du genre *Triticum*. Il s'agit d'une plante annuelle avec une inflorescence en épi terminal. Son développement est similaire à

celui du froment. La plage de semis est assez large allant de la mi-octobre à décembre voire janvier (sauf variétés de printemps). A la différence du froment, le blé dur a un faible besoin de vernalisation. Cela signifie que la plante se développe fortement lors d'automne et d'hiver doux, ce qui la rend plus vulnérable aux gelées printanières. A l'inverse, si l'hiver est rude, le développement de la plante sera nettement réduit (Arvalis, 2024).

Après la levée, la plante va commencer à émettre des feuilles tous les 100 degrés-jours en moyenne. Dès le stade 3 feuilles, le tallage débute à l'aisselle de la 1^{ère} feuille du maître brin. Lorsque la 4^e feuille est étalée, la deuxième talle se développe au niveau de la 2^{ème} feuille du maître brin et ainsi de suite. Des talles secondaires peuvent également apparaître à l'aisselle des feuilles des talles primaires. Ce phénomène se termine en fin d'hiver avec en moyenne 3 tiges développées par plante. Dans un même temps, l'organe racinaire se développe (Arvalis, 2017).

Après l'hiver, la montaison débute. La plante prend de la hauteur grâce à l'allongement des entre-nœuds qui composent sa tige. A la sortie de l'épi, la fécondation et la floraison ont lieu en quelques jours. La production se tourne alors progressivement vers les grains au détriment des organes végétatifs (Arvalis, 2017).

Le rendement final de la plante est le résultat de l'action de plusieurs composantes (Lenoir, 2024). Ces composantes sont les suivantes.

- *Le nombre d'épis par m²* exprime la densité d'épis. Celle-ci est fonction de la densité de plantes ainsi que de la capacité de tallage et la capacité de montée en épi des talles formées.
- *Le nombre de grains par épis* se rapporte à la fertilité des épis.
- *Le poids d'un grain (P1G)* qui descend directement du poids de mille grains (PMG).
- *La densité de grain* qui correspond au produit de la densité d'épis et de la fertilité des épis

A partir de ces composantes, le rendement peut être calculé en suivant une des deux équations suivantes (Lenoir, 2024).

$$\text{Rendement} = \text{Densité d'épis} \times \text{fertilité des épis} \times \text{P1G}$$

$$\text{Rendement} = \text{Densité de grains} \times \text{P1G}$$

Ces composantes de rendement varient en fonction du génotype propre à chaque variété, ce qui entraîne des différences d'expression des gènes associés aux composantes. Par exemple, dans une étude en conditions méditerranéenne, il a été démontré que l'épi principal peut contribuer à plus de 80 % du rendement total (Elhani et al., 2007). Dans ce cas, la capacité de tallage, qui devrait favoriser la densité d'épis, a peu d'impact sur la production finale. En conditions de déficit hydrique, les génotypes à fort tallage tendent d'ailleurs à produire des talles non productives qui entrent en compétition pour l'eau, réduisant ainsi le rendement (Arduini et al., 2018).

2.1.4. Qualité de la graine

Mondialement, les trois quarts du blé dur produit sert à la production de pâtes (Arvalis, 2021). Comme son nom l'indique, le blé dur à un grain plus dur que le blé tendre. Par un processus de mouture, il est réduit en semoule qui sera utilisée pour la production de pâtes et de couscous (Sissons, 2008). L'intérêt du blé dur pour la confection de pâtes réside dans les caractéristiques de sa graine. Comme dit précédemment, le grain est dur mais également vitreux. Cela signifie qu'il donnera plus de semoule et moins de farine lors du processus de transformation. De plus, la teneur en protéines est supérieure à celle d'un froment. Une bonne teneur en protéines (supérieure à 13,5%) permet, d'une part, d'assurer la ténacité des pâtes pour qu'elles soient fermes et élastiques et, d'autre part, de limiter le taux de mitadinage (Arvalis, 2021).

La couleur est également un critère à prendre en compte. Grâce à leur teneur en caroténoïdes plus élevée, les grains de blé dur ont un aspect plus jaunâtre que les grains de froment ce qui donne la couleur jaune caractéristique des pâtes. Deux autres critères font partie des exigences des industriels. Premièrement, le taux de mitadinage qui doit être inférieur à 20-25%. Le mitadinage correspond à l'apparition d'une portion farineuse dans l'albumen du grain. Ce phénomène se traduit par une production de moins de semoule et plus de farine. Le mitadinage a lieu lors d'épisodes pluvieux après la maturité des grains (CRAW, 2023b). Deuxièmement, les mouchetures sont redoutées par les industriels. La moucheture correspond à des zones de colorations foncées sur les grains qui se retrouvent dans les produits finis. Elle est favorisée par les précipitations entre le stade épiaison et grain laiteux (CRAW, 2023b). Dans une moindre mesure, le blé dur étant peu dormant, il faut faire attention à la germination sur pied. Celle-ci peut avoir lieu si une période de pluie arrive après la maturité. Tout comme pour le mitadinage, il est donc préférable de récolter avant les pluies si le grain est à maturité. (Arvalis, 2021 ; CRAW, 2023b).

2.2. Contraintes environnementales et variabilité climatique

Le blé dur est une culture essentielle dans les régions arides et semi-arides, notamment dans le bassin méditerranéen (Grosse-Heilmann *et al.*, 2024). Historiquement, sa présence dans ces zones s'explique par sa bonne adaptation à la forte variabilité interannuelle des précipitations qui restent faibles, mais également par une bonne tolérance aux vagues de chaleur en fin de cycle végétatif (Martínez-Moreno *et al.*, 2022). Malgré cette adaptation, dans des conditions méditerranéennes, le facteur le plus limitant pour le rendement du blé dur reste la temporalité et la faiblesse des pluies qui expliquent environ 75% de la variabilité du rendement (Toscano *et al.*, 2012). L'azote arrive en second facteur (Toscano *et al.*, 2012). D'après López-Bellido *et al.* (1996), en dessous de 450 mm de pluie durant la période culturale, la plante ne répond pas à la fertilisation azotée.

En Belgique, les précipitations ne constituent généralement pas un facteur limitant grâce à un climat tempéré et une pluviométrie annuelle aux alentours des 910mm/an (KMI, 2025). En revanche, la température moyenne et le nombre de jours

d'ensoleillement sont plus faibles qu'en région méditerranéenne or, ce sont des facteurs primordiaux pour produire un blé dur de qualité.

Actuellement, les projections climatiques pour l'horizon 2100 sont plutôt pessimistes. En effet, les émissions actuelles se rapprochent du scénario le plus pessimiste du GIEC concernant l'évolution des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ce scénario prévoit une augmentation de la température moyenne annuelle de 5°C d'ici 2100, avec une augmentation plus forte en hiver qu'en été. Les hivers deviendraient plus doux mais également plus humides. Une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes comme les fortes précipitations, les vagues de chaleur et la sécheresse est également prévue. Par exemple, d'après ce scénario, à partir de 2050, il y aurait au minimum une vague de chaleur par été (IRM, 2025).

Les conséquences du réchauffement climatique impactent l'ensemble de la planète. Les études portant sur l'impact du changement climatique sur le blé dur dans les régions arides et semi-arides présentent des résultats contrastés. D'un côté, une amélioration potentielle des rendements est envisagée grâce à l'effet fertilisant de l'élévation de la concentration atmosphérique en CO₂ (Grosse-Heilmann *et al.*, 2024). D'un autre côté, une réduction des rendements est redoutée en raison de la fréquence accrue des aléas climatiques, notamment les sécheresses prolongées et les vagues de chaleur pendant les phases critiques du développement (Grosse-Heilmann *et al.*, 2024). Une augmentation de la variabilité interannuelle des rendements semble inévitable. La production se situe en grande partie dans des régions semi-arides où les périodes de sécheresse et les vagues de chaleur seront de plus en plus fréquentes. Les zones de production pourraient diminuer de 19% d'ici 2050 et de moitié à l'horizon 2100 (Ceglar *et al.*, 2021). Cela concerne essentiellement la région méditerranéenne et l'Amérique du Nord. A l'inverse, des régions pourraient devenir adaptées à la culture en Russie, en Europe centrale et en Europe occidentale (Ceglar *et al.*, 2021). C'est le cas de la Belgique notamment. En effet, l'évolution du climat belge vers des hivers plus doux et des étés plus chauds pourrait ouvrir la voie pour la culture du blé dur. La production de cette céréale réduirait la dépendance du pays envers les régions productrices qui sont confrontées à des conditions de plus en plus extrêmes et incertaines (CRAW, 2023a).

Dans ce contexte, il est intéressant de s'attarder sur les différents facteurs qui influencent la productivité des zones cultivées. Ces facteurs peuvent être regroupés en deux catégories, les facteurs abiotiques et les facteurs biotiques.

2.2.1. Facteurs abiotiques

La plage de température optimale de la culture évolue durant son cycle de vie. Une température de 5°C est le minimum pour la croissance de la plante (FAO, 2025). Une température moyenne entre 15 et 20°C est optimum pour le tallage, mais une température de 10°C est suffisante. Il en va de même pour la montaison. Il faut idéalement plus de 15°C pour la floraison et minimum 18-20°C pour la maturation du grain (Grosse-Heilmann *et al.*, 2024 ; FAO, 2025). Des températures extrêmes peuvent nuire significativement aux rendements. Les effets dus aux températures

extrêmes dépendent de l'intensité, mais aussi de la durée et du stade de la culture lorsqu'ils surviennent.

La plupart des variétés de blé dur sont considérées comme peu résistantes au froid. La culture peut tout de même être plantée avant l'hiver mais elle est alors plus sujette à des dégâts dus aux périodes de gel tardives puisqu'elle sera plus avancée. Ces gelées vont entraîner une stérilité florale en réduisant le nombre de grains par épi et, in fine, le rendement. Cette stérilité résulte du froid intense, des dégâts des gelées sur les organes floraux ainsi que de la dessiccation (Beres *et al.*, 2020). Les variétés allemandes et polonaises sont les plus tolérantes au froid parmi les variétés testées au CRAW (Livre Blanc Céréales, 2024).

Les phases les plus sensibles aux fortes chaleurs sont la phase de remplissage et la floraison (Chaparro-Encinas *et al.*, 2021). Le stress thermique altère la fluidité des membranes et perturbe l'activité enzymatique, ce qui va nuire aux processus de respiration, de photosynthèse, ainsi que les processus associés (Broccanello *et al.*, 2023). Il affecte également l'assimilation de l'eau, l'absorption et la diffusion des nutriments dans la plante. Ces perturbations diminuent la viabilité du pollen, compromettent la synthèse de l'amidon et réduisent le remplissage du grain, ce qui se traduit in fine par une diminution du rendement. D'après Liu *et al.* (2016, cité par Broccanello *et al.*, 2023), une température supérieure à 31°C durant la période de floraison entraîne une perte brute du rendement de 24%.

L'eau est une ressource cruciale pour la croissance et le développement du blé dur. D'après la FAO, les besoins en eau du blé dur sont situés entre 450 et 650 mm en fonction du climat et de la durée du cycle (FAO, 2025). Dans de nombreux cas où les précipitations sont insuffisantes, l'irrigation permet d'obtenir de meilleurs rendements (Houria, 2012). Dans la pratique, cette solution reste peu utilisée. En effet, le prélèvement d'eau pour l'irrigation n'est pas toujours possible car l'eau, bien que disponible, est réservée à d'autres usages (Zhang et Oweis, 1999). Au-delà de la pluviométrie totale, la disponibilité en eau durant les différents stades de croissance de la plante est importante (Zhang et Oweis, 1999). Les stades les plus sensibles s'étendent de l'élongation de la tige jusqu'au gonflement de l'épi, suivis par la floraison et le remplissage du grain (Zhang et Oweis, 1999). La demande en eau augmente progressivement à mesure que les stades avancent pour atteindre son pic à la floraison (Khadka *et al.*, 2020). Le blé dur présente une bonne adaptabilité à la sécheresse comparé aux autres céréales néanmoins, il peut connaître des effets fortement négatifs en cas de stress hydrique (De Vita & Taranto, 2019). D'après de nombreuses études, la sécheresse est le facteur abiotique le plus à risque pour la culture du blé dur (Ben-Amar *et al.*, 2020 ; Toscano *et al.*, 2012).

A l'inverse, un excès d'eau peut également s'avérer problématique. Un sol saturé en eau empêche la bonne oxygénation des racines et les asphyxie dans le pire des cas (Grosse-Heilmann *et al.*, 2024). De plus, des précipitations plus importantes sont souvent associées à un ensoleillement plus faible et des températures moins élevées créant donc également un contexte défavorable à la culture.

Le type de sol a également un impact sur la croissance de la plante. Une étude italienne a démontré que, dans des conditions météorologiques similaires, un sol limono-argileux permettait d'obtenir de meilleurs rendements, mais également des concentrations en azote et en phosphore plus élevées à la floraison et à maturité par rapport à un sol limono-sableux (Masoni et al, 2007).

2.2.2. Facteurs biotiques

Les stress biotiques désignent les effets négatifs causés par d'autres organismes vivants tels que champignons, virus, adventices ou insectes.

Les maladies fongiques sont une des principales causes de perte de rendement du blé dur (Beres et al, 2020). Les maladies courantes dans nos régions sont la fusariose, la septoriose, la rouille jaune, la rouille brune, l'oïdium ainsi que l'helminthosporiose (Arvalis, 2021 ; Livre Blanc Céréales, 2024).

La fusariose sur épi est causée par un complexe de plusieurs espèces des genres *Fusarium spp* et *Microdochium spp*. Elle apparaît essentiellement lors d'épisodes pluvieux entre l'épiaison et la floraison. Les pertes peuvent être supérieures à 2t/ha (Arvalis, SDc).

L'oïdium (*Blumeria graminis*) est une maladie qui peut être présente tout au long du cycle de la culture. Les pertes de rendements sont souvent inférieures à 10% sauf lors d'années favorables à la maladie dans les variétés très sensibles (Arvalis, SDb). Le développement de la rouille jaune (*Puccinia striiformis*) est favorisé lors de printemps frais et humides (Arvalis, SDa). La fréquence d'années à forte pression de la maladie est faible, mais les pertes peuvent aller jusqu'à 70% du rendement lors de ces années. De manière générale, les essais menés par Arvalis dans le sud de la France durant les 20 dernières années montrent en moyenne un écart de rendement de 16% entre les parcelles traitées aux fongicides et les parcelles non traitées (Figure 1).

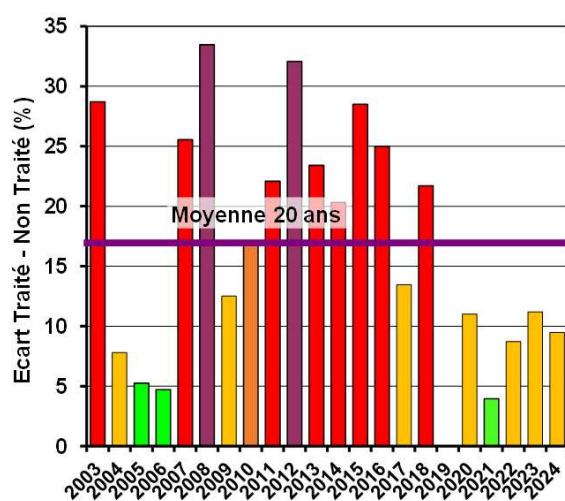


Figure 1. Gain de rendement moyen apporté par les fongicides - Essais Blé dur en Méditerranée - Rhône-Alpes. (Arvalis, 2024f)

En plus d'impacter les rendements, certaines maladies peuvent affecter grandement la qualité des grains. C'est notamment le cas de la fusariose sur épi qui impacte

négativement le rendement en semoule, le poids des grains et également la couleur des pâtes qui seront produites (Dexter *et al.*, 1997). De plus, une des souches de la fusariose (*F. graminearum*) produit des mycotoxines qui altèrent la qualité de la récolte voire la rendent inéligible aux marchés (Haile *et al.*, 2019).

La maîtrise des populations d'adventices en blé dur est un enjeu de productivité et de qualité. Les adventices rentrent en compétition avec la plante pour la lumière, le prélèvement de l'eau et des nutriments. Cette concurrence sur les ressources réduit la productivité de la culture. En plus de cela, les adventices peuvent servir de zones refuges pour les ravageurs ou les maladies. L'augmentation de la densité de plante est également un facteur influençant le développement de maladie. Enfin, les graines de certaines adventices, notamment des graminées, peuvent venir polluer les récoltes et diminuer la qualité de celle-ci (Arvalis, 2023).

Parmi les nombreux ravageurs qu'on peut retrouver dans la culture, certains ont une nuisibilité très importante lors de stades spécifiques de la culture.

En début de cycle, les limaces peuvent être particulièrement problématiques. En effet, elles se nourrissent des germes et des jeunes pousses provoquant des pertes de plants, voire une destruction totale de la culture (Arvalis, 2021). En début de cycle, on retrouve également les pucerons et les cicadelles. Les pucerons sont problématiques car ils peuvent être vecteur de la jaunisse nanisante de l'orge (JNO), un virus qui provoque le jaunissement des plantes et une hauteur réduite. Habituellement, les pertes se chiffrent entre 10 et 30%. La cicadelle peut également être vecteur de virus. Elle peut transmettre le virus du nanisme du blé. Les dégâts occasionnés sur la culture sont similaires à ceux de la JNO mais avec une sévérité prononcée. Les pertes de rendement peuvent donc atteindre 50% (Arvalis, 2021).

Lors de la phase de remplissage des grains, les deux principaux ravageurs sont les pucerons et la cécidomyie orange. Ces deux insectes vont attaquer les grains ce qui va induire des pertes de rendement, mais également de la qualité. Les pucerons sur épi prélèvent la sève, réduisant donc les apports pour le grain. Les grains touchés ont un poids de mille grains (PMG) diminué. La cécidomyie orange pond ses œufs au niveau des épillets. Les larves se nourrissent directement des grains. Le rendement et la qualité sont diminuées par des grains mangés, déformés et souvent moisis par surinfection des zones touchées (Arvalis, 2021).

2.3. Gestion des pratiques

Face aux contraintes environnementales et à la variabilité climatique, les pratiques culturales ont un rôle crucial à jouer dans l'adaptabilité et la réussite de la culture. L'optimisation des itinéraires techniques a pour objectif de limiter les stress et elle offre également des solutions adaptables aux conditions pédoclimatiques rencontrées.

Les principaux leviers mobilisables sont le choix variétal, la date de semis, la densité de semis, la gestion de la fertilisation, le travail du sol, ainsi que la protection phytosanitaire raisonnée.

2.3.1. Travail du sol

Le travail du sol réduit et le semis direct sont des pratiques de plus en plus répandues car elles permettent de réduire les coûts de mécanisation liés aux nombreux passages. Dans le cas du blé dur, l'impact du semis direct sur les rendements est contrasté. D'après De Vita *et al.* (2024), le semis direct permet d'obtenir des rendements supérieurs lorsque les pluies sont inférieures à 300 mm dus à une plus faible évaporation et une meilleure disponibilité de l'eau. En revanche, lorsque l'eau est disponible en suffisance, le travail conventionnel mène à des résultats supérieurs en termes de quantité et de qualité (De Vita *et al.*, 2007 ; Colecchia *et al.*, 2015). Une autre étude italienne met en avant l'importance du précédent cultural sur l'intérêt d'un travail du sol réduit, mais conclut que le travail conventionnel reste plus lucratif (Ercoli *et al.*, 2017).

2.3.2. Choix variétal

Le choix variétal est une étape clé dont dépend la conduite de la culture et sa rentabilité. Il vise à la fois à assurer le rendement, limiter les risques et assurer les débouchés (Livre Blanc Céréales, NDa). L'objectif est de trouver le compromis idéal entre performances agronomiques et performances technologiques afin de maximiser le prix de revient. Les deux premiers critères sont le rendement et la teneur en protéines. L'augmentation des rendements est généralement liée à une dilution de la protéine ce qui renforce l'importance de ces deux critères (Arvalis, 2024e). En plus de la protéine, d'autres critères de qualité ont leur importance. Le taux de mitadinage, le taux de moucheture et le temps de chute de Hagberg notamment (Livre Blanc Céréales, 2023).

La résistance aux différentes maladies est également un point d'attention, le choix d'une variété résistante permet d'assurer une meilleure récolte les années à risques et parfois de réduire le nombre de traitements fongicides sur la saison. Il en va de même pour la hauteur et la tolérance à la verse. Les variétés qui sont plus sujettes à la verse nécessitent généralement l'emploi d'un régulateur. Enfin, la tolérance au froid est un critère primordial dans nos régions afin que la culture puisse survivre et se développer correctement durant l'hiver (Arvalis, 2019).

2.3.3. Date et densité de semis

Contrairement au froment, le blé dur a un faible besoin de vernalisation et un développement très rapide lors d'automne et d'hiver doux. Il est donc préférable de ne pas le semer trop tôt afin de limiter les risques liés aux gels printaniers (Arvalis, 2024a). La date idéale dépend de la précocité de la variété et des conditions climatiques rencontrées mais elle se situe généralement entre fin octobre et fin novembre (Arvalis, 2024a). Les densités de semis dépendent de la date et des conditions pédoclimatiques mais elles se situent généralement entre 250 et 350 grains/m² (Arvalis, 2024a). Dans les essais réalisés par le CRAW, la densité de semis se situe autour de 350 grains/m². Ce chiffre est plus élevé qu'en froment car les variétés testées, notamment des variétés françaises, ont une capacité de tallage faible (Livre Blanc Céréales, 2023). La densité de semis peut donc être adaptée en fonction des cas. Une densité plus

faible diminue la pression de maladie et le risque de verse dû à l'allongement des tiges (Livre Blanc Céréales, NDc).

2.3.4. Lutte intégrée

Afin de limiter la propagation des maladies, de nombreux leviers existent. On peut citer le choix de la rotation, la dose d'azote appliquée, le travail du sol, la date de semis, la densité de semis et surtout, le choix variétal (Arvalis, 2024c). Lorsque la présence de maladie est avérée et présente un risque pour la récolte, il est conseillé de traiter à l'aide de produits phytosanitaires. Dans nos régions, la protection phytosanitaire est généralement répartie en deux traitements qui ont lieu à la dernière feuille et à l'épiaison (Arvalis, 2024b). Un troisième traitement peut être réalisé durant la montaison en cas de forte pression de maladies précocement. La protection de l'épi est indispensable afin de contrôler la fusariose des épis et de maintenir un niveau de mycotoxines faible (Arvalis, 2024b). La date de l'application "dernière feuille" est à raisonner en fonction de la pression et de l'année. Lors d'années à faible pressions de maladies ou sur des variétés peu sensibles aux maladies foliaires, ce traitement peut être évité.

2.3.5. Fertilisation azotée

L'azote est le principal nutriment influençant les rendements en blé (Ehdaie & Waines, 2001 ; Ierna *et al.*, 2016 ; Livre Blanc Céréales, NDb). Il joue également un rôle important pour la qualité du blé dur (Arvalis, 2021 ; CRAW, 2023b ; Garrido-Lestache *et al.*, 2006 ; Lenoir, 2024). Plusieurs études ont démontré l'impact de l'azote dans la qualité des grains récoltés que ce soit pour la teneur en protéines, la vitrosité ou encore le mitadinage (Garrido-Lestache *et al.*, 2005 ; Arvalis, 2021)

L'objectif de la fertilisation azotée est de maximiser le rendement en jouant sur la plasticité des composantes. En Belgique, pour le froment, l'apport est généralement fractionné en 3 passages aux stades : tallage, redressement et dernière feuille. Ces apports assurent un grand nombre de grains, mais pas le poids de ceux-ci. Il a été démontré que le rendement en froment est essentiellement fonction du nombre de grains et pas du poids des grains (Lenoir, 2024). De manière générale, augmenter le nombre de grains mène d'ailleurs à une diminution du poids de ceux-ci (Lenoir, 2024). L'augmentation du rendement des céréales est généralement négativement corrélée avec la teneur en protéines dû au phénomène de dilution (Rharrabti *et al.*, 2001a ; Rharrabti *et al.*, 2001b).

En France, le blé dur est fertilisé à raison de 200 unités/ha qui sont généralement divisées en 4 apports (Guillaume *et al.*, 2016). Un premier apport a lieu au stade tallage, celui-ci vise à favoriser le développement des talles. Un second apport est réalisé au début de la phase de redressement afin d'assurer qu'un maximum de talles montent en épis et deviennent productifs. Le troisième apport n'a presque aucun impact sur le nombre d'épis, il vise à augmenter la fertilité de ces derniers, c'est-à-dire le nombre de grains par épi. Celui-ci doit être réalisé au stade dernière feuille. Un apport trop hâtif pourrait favoriser l'apparition de tardillons nuisant au rendement tandis que si l'apport est réalisé trop tard il perd en efficacité. (Livre Blanc Céréales,

2017a). Le quatrième apport a lieu vers la floraison. Celui-ci ne vise plus à améliorer le rendement mais la teneur en protéines. Il s'agit d'un critère primordial en blé dur. (Guillaume et al., 2016 ; Livre Blanc Céréales, 2025).

3. Objectifs

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer l'impact de la dose d'azote et des différents schémas de fractionnements sur l'écophysiologie du blé dur, et plus particulièrement sur les composantes du rendement.

Au cours de la saison, lors des mesures réalisées au stade 65, une forte variabilité de taille a été observée parmi les épis prélevés. Ce phénomène avait déjà été constaté les années précédentes. Pourtant, il n'est pas documenté dans la littérature scientifique. Face à ce constat, il a été décidé d'intégrer cet aspect dans cette étude en tant qu'objectif secondaire. Le but est de déterminer si cette variabilité au niveau de la taille des épis est impactante sur le rendement, ainsi que l'influence de la fertilisation azotée sur la taille des épis.

Pour ce faire, une première série de mesures a été réalisée au stade 75 (Voir Point 4.7.6). Ces mesures ont permis de définir les catégories d'épis (Voir Point 6.7.1) afin d'analyser le phénomène et de pouvoir répondre aux questions posées ci-dessus.

4. Méthodologie

4.1. Site expérimental

La présente étude se base sur les essais de fertilisation du blé dur réalisés depuis 2019 par le CRAW. Pour l'année culturelle 2024-2025, le champ d'essai se situe Rue de Repeumont à Gembloux ($50,57904^{\circ}\text{N}$; $4,73548^{\circ}\text{E}$) (Figure 2). Le semis a été réalisé le 23 octobre 2024 sur un précédent lin. Le sol est homogène sur toute la parcelle d'essai et correspond à un sol limoneux à horizon B textural tacheté et de phase à horizon A mince (WalOnMap, 2025). Une analyse du sol a permis de déterminer les reliquats azotés dans le sol de la parcelle. Le reliquat est de 28,79 Kg/ha sur l'horizon 0-90 cm.



Figure 2. Carte Numérique des sols de Wallonie de l'essai Fertilisation - Blé dur (WalOnMap, 2025).

4.2. Conditions climatiques

La Belgique a un climat tempéré océanique fortement influencé par la proximité de la mer (Climat.be, 2025a). Les masses d'eau ont une inertie thermique élevée, elles absorbent et rendent la chaleur lentement. Ce phénomène permet une atténuation des extrêmes climatiques, on considère donc ce climat comme doux et pluvieux en hiver tandis qu'il est relativement frais et humide en été (Climat.be, 2025a).

Les bilans climatiques de l'IRM permettent de décrire l'ensemble de la période culturelle pour la saison 2024-2025.

L'automne 2024 a été globalement chaud et humide. En effet, 275 mm sont tombés ce qui est bien plus élevé que la moyenne située à 210 mm environ. Au niveau de la température, celle-ci était légèrement supérieure aux normales de saison avec 11,8°C contre 11,2°C en moyenne. Enfin, on peut noter un faible ensoleillement avec 260 heures ce qui en fait le 3e automne le plus sombre depuis 1991 (IRM, 2025).

L'hiver a été plutôt sombre et humide avec des valeurs d'ensoleillement faibles par rapport à la normale. Au niveau des précipitations, un total de 278 mm a été mesuré sur la période hivernale ce qui est proche de la norme. En revanche, l'humidité relative était très forte avec 91% en moyenne sur la période, c'est la valeur la plus élevée jamais enregistrée. Le printemps 2025 s'est montré très sec et ensoleillé (Figure 3, 4 et 5). Les précipitations ne dépassant pas 55 mm, un record jamais vu depuis 1901 en Belgique. La température moyenne sur la période est de 11,8°C alors qu'on se situe généralement aux alentours de 10,5°C. Enfin, 688 heures d'insolation ont été mesurées contre 495 heures en moyenne. A l'instar du printemps, le début de l'été s'est montré chaud et sec comme le montrent les données de l'IRM pour le mois de juin des figures 6 et 7. Enfin, le début du mois de juillet a été plutôt sec mais sans être particulièrement chaud. Une semaine de beau temps avant la mi-juillet a permis de réaliser la récolte dans de bonnes conditions avant que le retour des pluies dans la seconde moitié du mois de juillet.

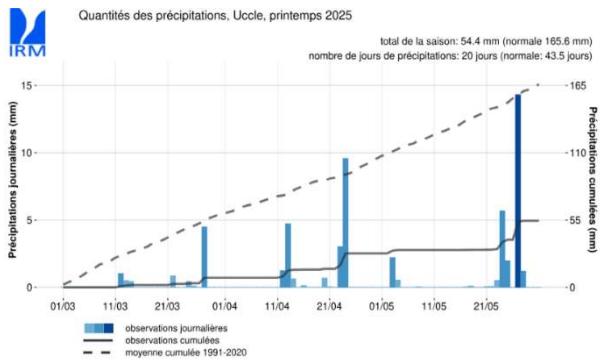


Figure 3. Quantités de précipitations pour le printemps 2025 à Uccle. (IRM, 2025).

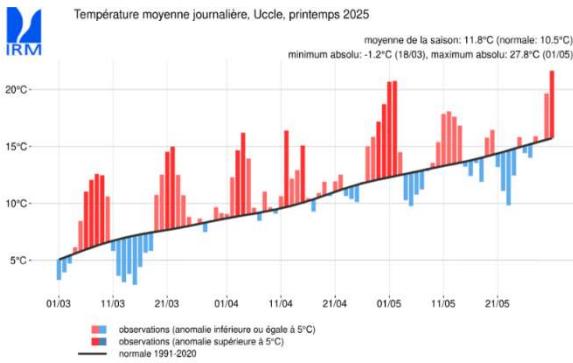


Figure 4. Température moyenne journalière pour le printemps 2025 à Uccle. (IRM, 2025).

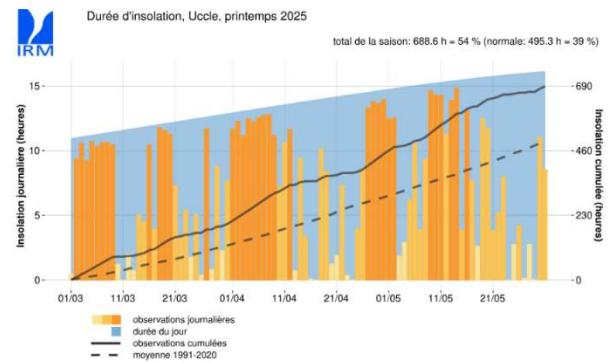


Figure 5. Durée d'insolation pour le printemps 2025 à Uccle. (IRM, 2025)

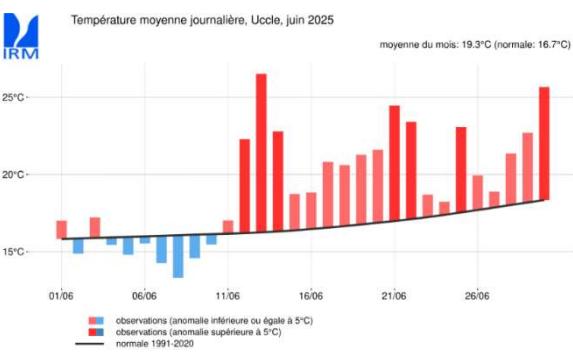


Figure 6. Température moyenne journalière pour le mois de juin 2025 à Uccle. (IRM, 2025).

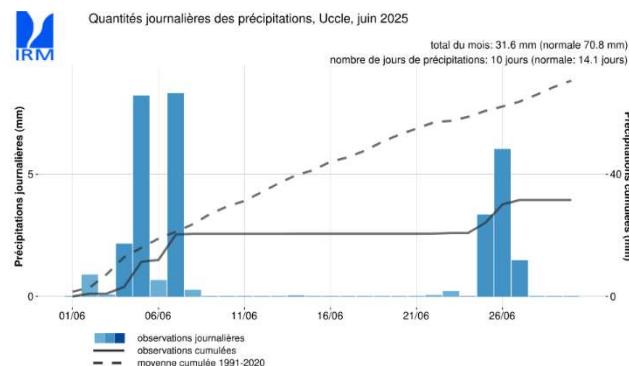


Figure 7. Quantités journalières des précipitations pour le mois de juin 2025 à Uccle. (IRM, 2025)

4.3. Itinéraire technique

Le précédent cultural de la parcelle est le lin fibre. La terre a été labourée et passée deux fois à l'aide d'une herse rotative. Le semis a été réalisé le 23 octobre à une densité de 400 grains/m². Le régulateur de croissance *Prodax* a été appliqué deux fois, le 3 avril et le 28 avril à raison de 0,5L/ha. Un herbicide a été appliqué début novembre (*Quirinus*) et deux traitements fongicides ont été réalisés le 28 avril et le 21 mai. Toutes les informations relatives à l'itinéraire technique sont reprises dans le tableau 1.

Tableau 1. Itinéraire technique pour l'année 2024-2025

Interventions		Date
Préparation du sol	Labour + herse rotative (2 fois)	22/10/2024
Semis	400 grains/m ²	23/10/2024
Herbicide	Quirinus (0,47 L/ha)	7/11/2024
Fertilisation (BBCH29)	Voir tableau 2	10/03/2025
Fertilisation (BBCH29-30)	Voir tableau 2	25/03/2025
Régulateur de croissance (1 ^{ère} application)	Prodax (0,5 Kg/ha)	3/04/2025
Fertilisation (BBCH 30)	Voir tableau 2	9/04/2025
Application du biostimulant	BLUEN (Modalité 11)	25/04/2025
Régulateur de croissance (2 ^{ème} application)	Prodax (0,5 Kg/ha)	28/04/2025
Fongicides (1 ^{ère} application)	Simveris (1 L/ha) + Aquino (1,2 L/ha)	28/04/2025
Fertilisation (BBCH 39)	Voir tableau 2	9/05/2025
Fertilisation (BBCH 51)	Voir tableau 2	16/05/2025

Fongicides (2 ^e me application)	Revystar Gold (1,5 L/ha)	21/05/2025
Récolte	/	11/07/2025

4.4. Caractéristiques de la variété

La variété utilisée cette année pour l'essai sur la nutrition azotée est la variété Anvergur. Cette variété fait partie des références en termes de rendements tout en possédant les qualités technologiques exigées par la filière (Semences de France, Nd). Elle est caractérisée par des rendements élevés et réguliers, une maturité semi-précoce, ainsi qu'une bonne résistance à la septoriose (Arvalis, SDd ; Livre Blanc Céréales, 2023). En revanche, sa tolérance au froid est plutôt limitée tout comme sa tolérance à la verse. Anvergur fait partie des variétés les plus anciennes dans les essais du CRA-W au même titre que Canailou, Casteldoux, Karur, Toscadou et Wintergold. Elles sont testées depuis le début des essais lors de la saison 2018-2019 (Livre Blanc Céréales, 2023).

Variété	Rouille jaune 1-9*	Fusariose des épis 1-9*	Fusariose des feuilles 1-9*	Oïdium 1-9*	Septoriose 1-9*
1 Anvergur	7,9	7,3	6,8	8,3	7,4

Variété	Tolérance au froid 1-9*	Capacité de tallage Nombre	Tolérance à la verse 1-9*	Hauteur cm
1 Anvergur	5,4	3,3	4,6	95

Figure 8. Comportement face aux maladies et caractéristiques physiologiques de la variété Anvergur (Livre Blanc Céréales, 2023).

4.5. Facteurs étudiés

L'essai suivi a pour but d'évaluer l'influence du fractionnement de la fertilisation azotée sur la culture de blé dur en conventionnel. Pour étudier ce facteur, il faut ajuster deux paramètres : les quantités apportées et le stade phénologique auquel l'apport à lieu. Le tableau 2 ci-dessous reprend les modalités avec leurs schémas de fertilisation respectifs pour l'année 2025.

Tableau 2. Modalités de l'essai en 2025

N° objet	BBCH 29	BBCH 29-	BBCH 30	BBCH 32	BBCH 39	BBCH 51	N Total
Date	10/03	25/03	9/04	25/04	7/05	16/05	
1	0	0	0		0	0	0
2	70	0	40		70	0	180
3	70	0	40		70	40	220
4	70	0	40		40	40	190
5	70	0	40		100	0	210
6	40	30	40		70	0	180
7	40	30	70		70	0	210
8	80	0	40		80	0	200
9	80	0	40		40	40	200
10	80	0	80		80	0	240
11	70	0	40	Blue N	70	0	180
12	40	0	70		70	0	180

Les essais sur la fertilisation azotée du blé dur sont réalisés depuis 2020 au CRAW. Lors de ces années d'essais, de nombreuses modalités ont été testées, mais également plusieurs variétés. En effet, en 2020, la variété utilisée était la variété française Miradoux, en 2022 et 2023, c'était la variété Wintergold tandis qu'en 2021, 2024 et 2025 il s'agit de la variété Anvergur. La modalité 11 a pour particularité de recevoir un apport de *BLUEN* en plus des apports d'azote. Le *BLUEN* est un biostimulant capable de transformer l'azote atmosphérique en azote assimilable pour la culture. Ce biostimulant est composé de la bactérie *Methylobacterium symbioticum SB23* (Corteva, ND). Un tableau récapitulatif avec toutes les différentes modalités testées depuis 2020 est disponible en annexe (Annexe 1).

4.6. Dispositif de l'essai

L'essai est composé de 72 parcelles. Chaque modalité est présente six fois au total dans l'essai. Pour chaque répétition (R1, R3 et R4), on retrouve donc une parcelle de prélèvement et une parcelle de récolte par modalité. Les modalités sont regroupées en 6 blocs et ont été placées aléatoirement au sein des blocs à l'exception des blocs de la répétition R1 qui sont placés dans l'ordre. Un plan de l'essai est disponible dans l'annexe 2.

4.7. Observations et paramètres mesurés

Tableau 3. Variables mesurées

	Z30	Z32	Z39	Z55*	Z65	Z75	Z89
Date prélevement	1/04 et 2/04	22/04 et 23/04	6/05 et 7/05	Non réalisé	20/05 et 21/05	24/06	08/07
LAI	X	X	X		X		
Biomasse totale	X	X	X	(X)	X		X
Biomasse Tige		X	X	(X)	X		X
Biomasse feuilles		X	X	(X)	X		X
Biomasse épis					X		X
Azote exporté total	X						
N tige		X	X	(X)	X		X
N feuille		X	X	(X)	X		X
N épis					X		X
Epis/m ²					X	X	X
Grains/épi						X	X
Longueur des épis						X	
Nombre d'épillets						X	
Rendement							X
PMG							X
Protéines							X
Rendement par catégorie							X

Légende : X : Mesure classique

X : Mesure par catégorie d'épis

4.7.1. Stades phénologiques

L'observation des stades phénologiques du blé dur a été réalisée durant toute la période de développement de la plante à l'aide de l'échelle BBCH améliorée (Annexe 3). A l'exception des stades 30 à 39, qui nécessitent de disséquer la plante afin de mesurer les distances entre différents points, les stades sont déterminés à l'aspect général de la plante.

4.7.2. Teneur en azote dans le sol

La mesure de reliquats azotés fut réalisée par prélèvements de sol à l'aide d'une sonde dans les horizons 0-30, 30-60 et 60-90 cm. Les horizons furent par la suite compilés par la somme de leur teneur respective afin d'obtenir celle de l'horizon 0-90. Ces mesures ont été réalisées le 17 janvier 2025.

4.7.3. Biomasses sèches

Les prélèvements de biomasse aérienne ont été effectués à différents stades clés : redressement (Z30 et Z32), dernière feuille (Z39), inflorescence à moitié sortie (Z55), mi-floraison (Z65) et à maturité (Z87). La biomasse a été prélevée dans des quadrats de 50 cm de long et sur une largeur de trois lignes de semis ($3 \times 12,5$ cm). Les prélèvements ont été réalisés à la main ou avec l'aide d'une bêche lorsque le sol était trop sec (Figures 9 et 10). Les plantes ont été nettoyées à l'eau afin de retirer la terre encore présente (Figure 11). Elles ont ensuite été sectionnées au niveau du plateau de tallage (Figure 12). Les plantes furent par la suite placées dans les sachets micro-perforés identifiés. Ces dernières ont été placées dans une étuve à une température de 65°C durant 7 jours. La biomasse sèche fut ensuite pesée et normalisée par la surface prélevée ($0,1875 \text{ m}^2$) afin d'estimer la biomasse de matière sèche en grammes par m^2 . Au stade 30, la biomasse totale a été pesée. A partir du stade 30, les feuilles ont été séparées des tiges au niveau de la ligule. Pour les stades 65, l'épi est également pesé séparément. Pour le stade 87, les épis sont pesés séparément et par catégorie. Le prélèvement de biomasse prévu initialement au stade 55 n'a finalement pas été réalisé. La culture se développant très rapidement, le blé dur est passé du stade 39 à 65 en une quinzaine de jours. L'intérêt d'une mesure supplémentaire à une semaine d'intervalle a été jugée peu utile pour ce travail.



Figure 9. Mise en place pour les prélevements. (Photo D. Crauwels).



Figure 10. Prélèvement des biomasses au champ. (Photos D. Crauwels)



Figure 11. Lavage des biomasses. (Photo D. Crauwels)

4.7.4. Indice de surface foliaire (LAI)

La détermination de l'indice de surface foliaire consiste à déterminer la surface verte totale des feuilles et des tiges. Cet indice est corrélé avec le rayonnement solaire capté par la plante et la production de photosynthèse. Ces deux paramètres vont influencer la production de biomasse de la plante. Pour l'analyse du LAI, les plantes sont prélevées dans leur entièreté sur une ligne de semis et sur une distance de 50 cm à côté des prélèvements de biomasse. Les plantes prélevées seront d'abord rincées à l'eau afin d'éliminer la terre qui pourrait être présente (Figure 11). Par la suite, elles sont sectionnées au niveau du plateau de tallage afin de conserver seulement la partie aérienne (Figure 12). Il faut alors détacher les feuilles à leur base et les placer bien à plat sur une feuille adhésive sans que les feuilles se superposent (Figure 13). La même opération est réalisée sur les tiges. Sur la feuille adhésive, une partie est laissée vide afin de placer une étiquette mentionnant l'objet, la répétition et le numéro de la parcelle. Une feuille blanche est finalement placée sur le papier adhésif avec les feuilles collées dessus. Les planches sont alors scannées avec une résolution de 300 DPI. Un code réalisé sur le logiciel *Octave* permet de calculer le nombre de pixels verts sur les images. On obtient alors un ratio du nombre de pixels verts sur le nombre de pixels totaux qu'on multiplie par la surface de la feuille blanche (A_4/A_3). Il reste alors à diviser la surface obtenue par la surface de prélèvement afin d'obtenir le LAI. Cette opération sera réalisée 4 fois au stade Z30, Z32, Z39 et Z65. Cette opération étant très chronophage, elle n'a été réalisée que sur 3 des 12 modalités à savoir les objets 1, 2 et 12.



Figure 12. Découpe de la partie racinaire. (Photo D. Crauwels)



Figure 13. Collage des feuilles sur le papier adhésif. (Photos D. Crauwels)

4.7.5. Densité d'épis

La densité d'épis figure parmi les données les plus importantes car elle fait partie des composantes du rendement. Cette mesure sera réalisée au stade BBCH 65 sur les prélèvements de biomasse. Deux mesures supplémentaires ont été réalisées au stade 75 et 87. Ces dernières mesures n'ont été réalisées que sur 2 lignes de 50 cm tandis que la première a été réalisée sur 3 lignes de 50 cm. Le nombre d'épis comptés sur la surface prélevée sera normalisé afin d'obtenir une densité d'épis au mètre carré.

Au stade 75 et 87, les épis ont également été séparés par catégorie afin d'obtenir la densité d'épis total et les densités d'épis par catégorie.

4.7.6. Longueur des épis, nombre d'épillets et nombre de grains

Ces 3 mesures ont été réalisée au stade 75 afin de permettre la catégorisation des épis. Des prélèvements d'une ligne de 50 cm ont été réalisés deux fois dans chaque parcelle. Par la suite, les épis ont été sectionné des plantes et catégorisés à vue d'œil dans une des quatre catégories prédéfinies (Grand, moyen, petit, tardillon). Les épis ont alors été mesurés à partir du rachis jusqu'à la pointe du dernier grain sans compter les barbes (Figure 14). Le nombre d'épilletts et de grains par épi ont été comptés manuellement dans le même temps. Toutes ces données, épi par épi, ont été encodées dans un fichier spécifique avant de calculer une moyenne des 3 mesures par parcelle ainsi que le nombre d'épis totaux et le nombre d'épis par catégorie.



Figure 14. Mesure de la longueur des épis. (Photo D. Crauwels)

4.7.7. Densité de grains

A partir des mesures réalisées sur les épis au stade 75 (Point 4.7.6), la densité d'épi pour le stade 75 a pu être calculée simplement en additionnant le nombre de grains de chaque épi par prélèvement. Ce nombre a ensuite été ramené sur une surface d'un mètre carré pour obtenir une densité de grains par mètre carré. Au stade 89, des densités par catégorie ont pu être calculée à partir du comptage de grains réalisés sur les grains battus de chaque catégorie afin de calculer le poids de mille grains (Point 4.7.10).

4.7.8. Analyse infrarouge

Ces analyses sont réalisées sur les divers prélèvements de biomasse après le séchage et la pesée de ceux-ci. Les échantillons sont d'abord réduits en poudre à l'aide d'un broyeur Foss CT 193 Cyclotec (Figures 15 et 16). La poudre est ensuite analysée à l'aide d'un analyseur proche infrarouge NIRS DS3 de la marque Foss (Figure 17). Ces analyses permettent notamment de connaître la teneur en azote. Ces

mesures ne seront pas analysées dans ce travail, mais permettent de consolider la base de données.



Figure 15. Broyeur Cyclotec (Photo D. Crauwels).



Figure 16. Poudre après broyage des biomasses (Photo D. Crauwels).



Figure 17. Analyseur proche infrarouge NIRS DS3 (Photo D. Crauwels).

4.7.9. Rendement

Les mesures de rendement ont été réalisées sur des parcelle dédiée à cette mesure uniquement. La récolte fut réalisée lorsque les grains étaient à maturité et avaient une humidité inférieure à 15% pour la plupart des parcelles. Elle fut effectuée par le CRAW à l'aide de la moissonneuse-batteuse du CRAW. Celle-ci permet de mettre les grains en sac et afin de déterminer la masse de l'échantillon. L'humidité a également été déterminée par le CRAW. Ensuite, le rendement a été normalisé à une humidité standard de 15% et convertit en tonnes par hectare.

Un deuxième rendement a été estimé par catégorie d'épis à partir des prélèvements de biomasse du stade 87. Les épis ont été battus manuellement afin de séparer les grains et de les peser.

4.7.10. Nombre de grains et poids de mille grains (PMG)

Un PMG par catégorie a été calculé. Pour cela, les grains pesés pour estimer le rendement ont été comptés à l'aide d'un compteur à grains. Ensuite, le poids obtenu a été divisé par le nombre de grains et multiplié par 1000 afin d'obtenir le poids de mille grains.

4.7.11. Teneur en protéines du grain

L'analyse de la teneur en protéines des grains a été réalisée par le département qualité du CRA-W à partir des échantillons récoltés sur les parcelles de rendements.

5. Analyse des données

En plus des variables mesurées, certaines composantes du rendement ont été calculées à posteriori à partir d'autres variables. C'est le cas des densités de grains au stade 75 et 87. Le calcul utilisé est le suivant.

$$\text{Densité de grains} = \text{Fertilité des épis} \times \text{densité d'épis}$$

Toutes les données ont été traités sur le logiciel Rstudio (version 4.4.1) ainsi qu'avec les packages repris dans le tableau 4 ci-dessous.

Tableau 4. Packages utilisés lors de l'analyse statistique.

Package	Version	Auteurs
Dplyr	1.1.4	Wickmanns <i>et al.</i> , 2023
lmerTest	3.1-3	Kuznetsova <i>et al.</i> , 2020
car	3.1-3	Fox & Weisberg, 2024
agricolae	1.3-7	Mendiburu, 2023
ggplot2	3.5.1	Wickmanns <i>et al.</i> , 2025
GGally	2.2.1	Schloerke <i>et al.</i> , 2024
ggfortify	0.4.17	Horikoshi <i>et al.</i> , 2024
multCompView	0.1-10	Graves <i>et al.</i> , 2024
DHARMa	0.4.7	Hartig, 2024
Lme4	1.1-35.5	Bates <i>et al.</i> , 2025
emmeans	1.10.5	Lenth, 2025

6. Résultats

6.1. Tests de significativité des facteurs

En premier lieu, une analyse univariée a été réalisée en fonction des différents traitements. Cependant, l'étude incluait un facteur aléatoire lié à la répétition des blocs. Pour en tenir compte, un modèle linéaire mixte (LMER) a été appliqué en amont du test ANOVA avec la formule suivante :

Variable ~ Modalité + (1|Répétition)

La modalité est considérée comme l'effet fixe (traitement) tandis que la répétition est intégrée en tant qu'effet aléatoire afin de modéliser la dépendance des observations issues d'un même bloc. Le tableau 5 ci-dessous reprend les résultats de l'ANOVA réalisée. Un premier test général a été effectué sur l'ensemble des variables, les hypothèses de normalité et d'homogénéité de la variance ont été vérifiées à l'aide des tests de Shapiro-Wilk et de Levene (Annexe 5).

L'homogénéité de la variance entre les groupes a été confirmée pour toutes les variables. Les variables EPI_TOT_Z65, BIOM_TIGE_Z87, BIOM_EPI_TOT_Z87, PMG_MOY et PMG_PETIT ne respectent pas l'hypothèse de normalité d'après le test de Shapiro. Un deuxième test de normalité a été réalisé à l'aide du package Dharma. Il permet d'analyser les résidus en les comparant à des résidus théoriques. Ce second test est plus robuste aux valeurs extrêmes. Les graphiques des résidus sont disponibles dans l'annexe 6. Etant donné que le test de Shapiro est très sensible aux écarts même faibles dans des échantillons de taille moyenne et que la distribution des résidus semble conforme à la normalité, l'hypothèse de normalité sera finalement considérée comme respectée pour les variables citées ci-dessus.

Pour chaque ANOVA effectuée, un test post-hoc a été réalisé via la fonction emmeans du package emmeans qui réalise une comparaison de moyenne marginale. Cette fonction compare les moyennes marginales des différents groupes afin de déceler des potentielles différences statistiques entre les modalités. Les lettres des groupes attribués par ce test seront toujours affichées sur les graphiques présentés par la suite.

Tableau 5. Résultats du test Anova sur l'ensemble des variables analysées.

Variables	Nom complets	P valeur	Significativité
Rendement	Rendement	5*10 ⁻¹³	***
Prot	Teneur en protéines	5*10 ⁻¹⁵	***
PHL_C15	Poids à l'hectolitre	2.8*10 ⁻⁶	***
BIOM_TOT_Z30	Biomasse totale (Z30)	0.4806	n.s.
LAI_FEUILLE_Z30	LAI des feuilles (Z30)	0.3486	n.s.
LAI_TIGE_Z30	LAI des tiges (Z30)	0.2346	n.s.
TALLE_Z30	Nombre de talles (Z30)	0.3385	n.s.
BIOM_FEUILLE_Z32	Biomasse des feuilles (Z32)	0.8388	n.s.

BIOM_TIGE_Z32	Biomasse des tiges (Z32)	0.7101	n.s.
LAI_FEUILLE_Z32	LAI des feuilles (Z32)	0.0911	n.s.
LAI_TIGE_Z32	LAI des tiges (Z32)	0.1206	n.s.
BIOM_FEUILLE_Z39	Biomasse des feuilles (Z39)	0.3953	n.s.
BIOM_TIGE_Z39	Biomasse des tiges (Z39)	0.4218	n.s.
LAI_F1_Z39	LAI des feuilles F1 (Z39)	0.0251	*
LAI_F2_Z39	LAI des feuilles F2 (Z39)	0.0749	n.s.
LAI_RESTE_Z39	LAI des feuilles sans F1 et F2 (Z39)	0.0317	*
LAI_FEUILLETOT_Z39	LAI des feuilles (Z39)	0.0337	*
LAI_TIGE_Z39	LAI des tiges (Z39)	0.1431	n.s.
BIOM_FEUILLE_Z65	Biomasse des feuilles (Z65)	0.3434	n.s.
BIOM_TIGE_Z65	Biomasse des tiges (Z65)	0.2562	n.s.
BIOM_EPI_Z65	Biomasse des épis (Z65)	0.5123	n.s.
LAI_F1_Z65	LAI des feuilles F1 (Z65)	0.0034	**
LAI_F2_Z65	LAI des feuilles F2 (Z65)	0.0119	*
LAI_RESTE_Z65	LAI des feuilles sans F1 et F2 (Z65)	0.0047	**
LAI_FEUILLETOT_Z65	LAI des feuilles (Z65)	0.0045	**
LAI_TIGE_Z65	LAI des tiges (Z65)	0.0004	***
EPI_TOT_Z65	Densité d'épis (Z65)	0.0175	*
EPI_TOT_Z75	Densité d'épis (Z75)	0.7111	n.s.
GRAND_EPI_Z75	Densité des grands épis (Z75)	0.6336	n.s.
MOY_EPI_Z75	Densité des moyens épis (Z75)	0.1616	n.s.
PETIT_EPI_Z75	Densité des petits épis (Z75)	0.6409	n.s.
TARDI_Z75	Densité des tardillons (Z75)	0.4142	n.s.
LG_EPI_Z75	Longueur des épis (Z75)	5*10 ⁻⁹	***
EPIILLET_Z75	Nombre d'épilletts par épi (Z75)	9*10 ⁻⁵	***
NBR_GRAINS_Z75	Fertilité des épis (Nombre de grains par épi) (Z75)	9*10 ⁻⁶	***
DENS_GRAINS_Z75	Densité de grains (Z75)	0.0018	**
BIOM_TIGE_Z87	Biomasse des tiges (Z87)	0.88	n.s.
BIOM_FEUILLE_Z87	Biomasse des feuilles (Z87)	0.23	n.s.
BIOM_EPI_TOT_Z87	Biomasse de l'ensemble des épis (Z87)	0.007	**
RDML_GRAND	Rendement des grands épis	0.002	**

RDML_MOY	Rendement des moyens épis	0.018	*
RDML_PETIT	Rendement des petits épis	0.072	n.s.
GRAND_EPI_Z87	Densité des grands épis (Z87)	6.22*10 ⁻⁵	***
MOY_EPI_Z87	Densité des moyens épis (Z87)	0.12	n.s.
PETIT_EPI_Z87	Densité des petits épis (Z87)	2.36*10 ⁻⁵	***
TARDI_Z87	Densité des tardillons (Z87)	0.003	**
EPI_TOT_Z87	Densité d'épis (Z87)	0.34	n.s.
FERTI_GRAND	Fertilité des grands épis (Z87)	0.059	n.s.
FERTI_MOY	Fertilité des moyens épis (Z87)	0.53	n.s.
FERTI_PETIT	Fertilité des petits épis (Z87)	0.20	n.s.
PMG_GRAND	Poids de 1000 grains des grands épis	0.28	n.s.
PMG_MOY	Poids de 1000 grains des moyens épis	0.186	n.s.
PMG_PETIT	Poids de 1000 grains des petits épis	0.59	n.s.
RDML_TOT	Rendement total estimé	2.72*10 ⁻⁵	***
FERTI_TOT	Fertilité moyenne (Z87)	0.015	*
PMG_TOT	PMG moyen	1.03*10 ⁻⁴	***
DENS_GRAND_Z87	Densité de grains pour les grands épis (Z87)	0.0027	**
DENS_MOY_Z87	Densité de grains pour les moyens épis (Z87)	0.021	*
DENS_PETIT_Z87	Densité de grains pour les petits épis (Z87)	0.014	*
DENS_Z87	Densité de grains totale (Z87)	6.21*10 ⁻⁵	***

Légende : n.s. : Non significatif ; * : <0,05 ; ** : <0,01 ; ***<0,001

6.2. Biomasses

Les biomasses mesurées au stade 30, 32, 39, 65 ne présentent aucune différence significative entre les différentes modalités. Au stade 87, il y a des différences entre les modalités pour la biomasse des épis. La figure 18 ci-dessous montre une biomasse bien faible pour la modalité 1. On retrouve la même tendance pour le rendement parcellaire qui est présenté au point 6.4.

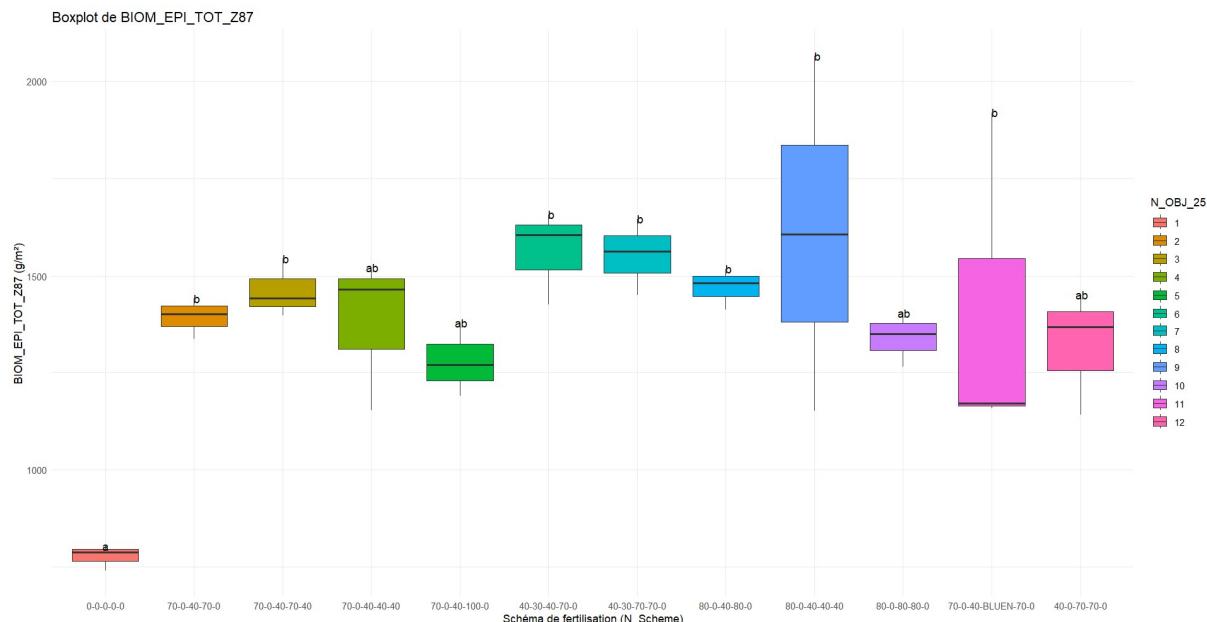


Figure 18. Boxplot de la biomasse des épis au stade 87.

Les boxplots des biomasses non présentées sont disponibles dans l'annexe 8.

6.3. Indice de surface foliaire (LAI)

Pour rappel, les indices de surface foliaire (LAI) n'ont été mesurés que sur les modalités 1, 2 et 12.

6.3.1. Stade 30 et 32

Pour le LAI total du stade 30 et les LAI des feuilles et des tiges du stade 32, le test ANOVA conclut l'absence de différence significative entre les 3 modalités.

6.3.2. Stade 39

Des différences significatives sont observables entre les objets pour les variables suivantes au stade 39 : Feuilles F1 (LAI_F1_Z39), Feuilles hors F1 et F2 (LAI_RESTE_Z39), ensemble des feuilles (LAI_FEUILLETOT_Z39). Il n'y a en revanche pas de différence pour le LAI des tiges (LAI_TIGE_Z39) et le LAI des feuilles F2 (LAI_F2_Z39). Les graphiques en boxplot ci-dessous reprennent les variables pour lesquelles des différences significatives sont observées ainsi que les groupes emmeans attribués aux différentes modalités.

Pour le LAI des feuilles F1 (Figure 19), la modalité 1 à un LAI plus faible (groupe a) que la modalité 2 (groupe b). Tandis que la modalité 12 n'est significativement différente ni de la modalité 1, ni de la modalité 12 (groupe ab). La même hiérarchie est observable pour le reste des feuilles (Figure 21). En revanche, malgré une différence significative d'après le test ANOVA, le test posthoc ne trouve pas de différence significative entre les modalités pour l'ensemble des feuilles à ce stade (Figure 20).

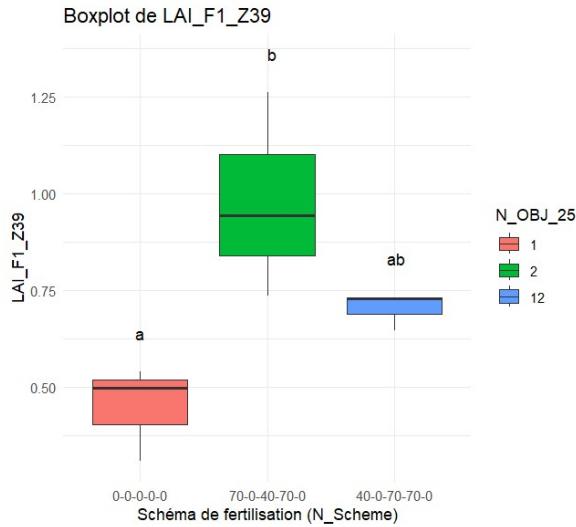


Figure 19. Boxplot du LAI de la F1 au stade 39.

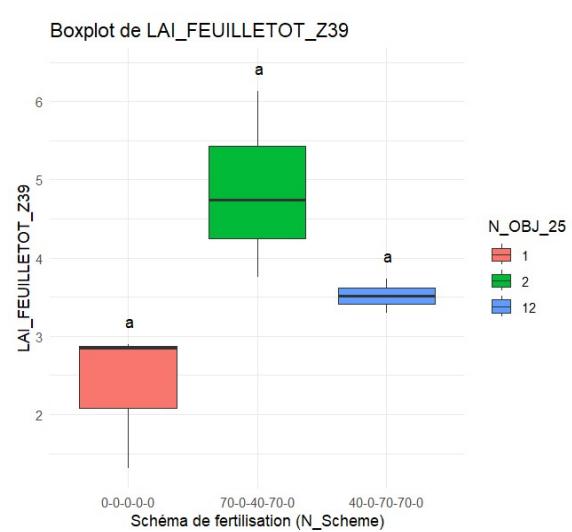


Figure 20. Boxplot du LAI de l'ensemble des feuilles au stade 39.

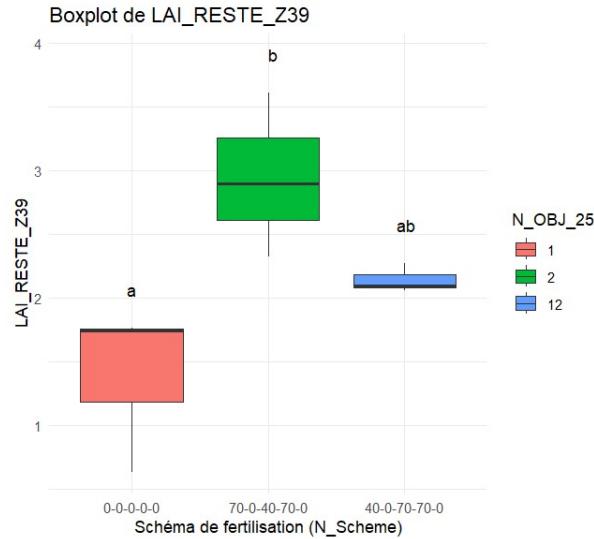


Figure 21. Boxplot du LAI des feuilles hors F1 et F2 au stade 39.

6.3.3. Stade 65

L'ensemble des LAI réalisés au stade 65 présentent des différences significatives. Sur les figures 22 à 26 ci-dessous, la même tendance se dessine pour tous les indices de surface foliaire. Premièrement, la modalité non fertilisée (Modalité 1) est toujours nettement inférieure aux deux autres modalités. Entre la modalité 2 et la modalité 12, la modalité 12 est légèrement supérieure à la modalité 2 mais les différences entre celles-ci ne sont significatives que pour le LAI des tiges (Figure 24).

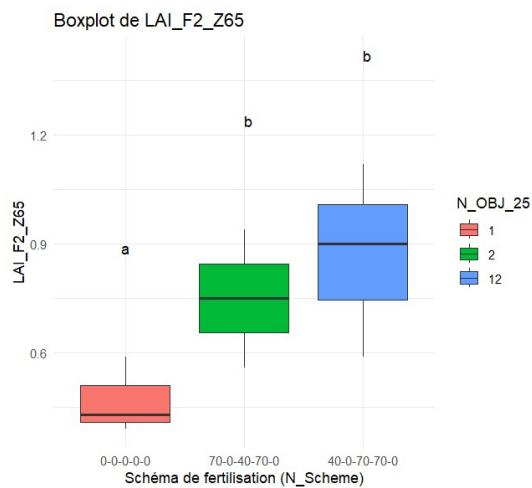


Figure 22. Boxplot du LAI des feuilles F2 au stade 65.

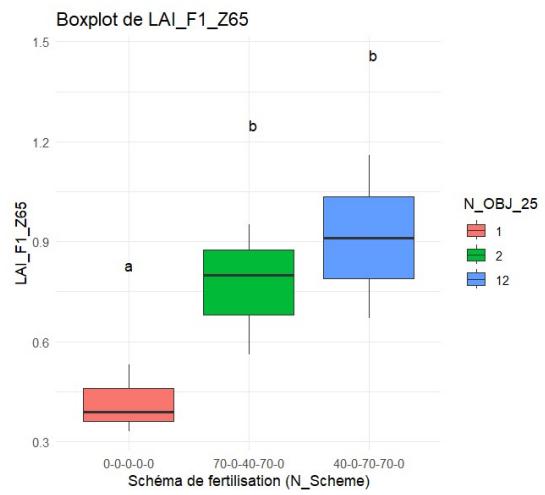


Figure 23. Boxplot du LAI des feuilles F1 au stade 65.

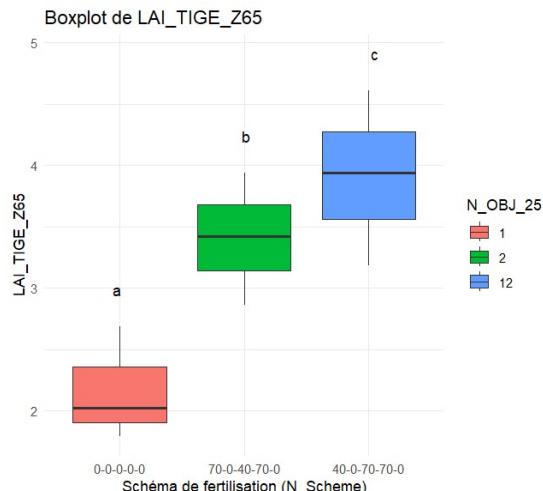


Figure 24. Boxplot du LAI des tiges au stade 65.

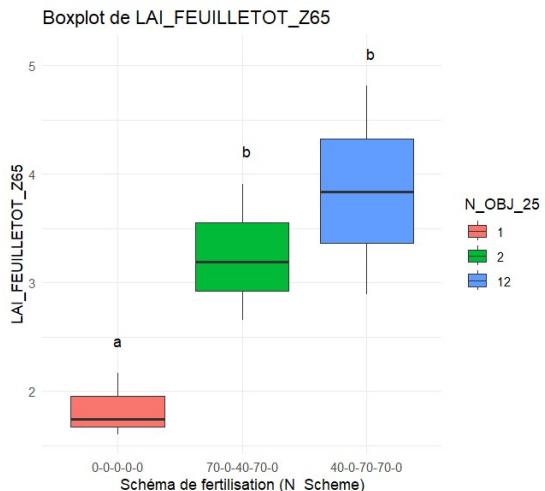


Figure 25. Boxplot du LAI de l'ensemble des feuilles au stade 65.

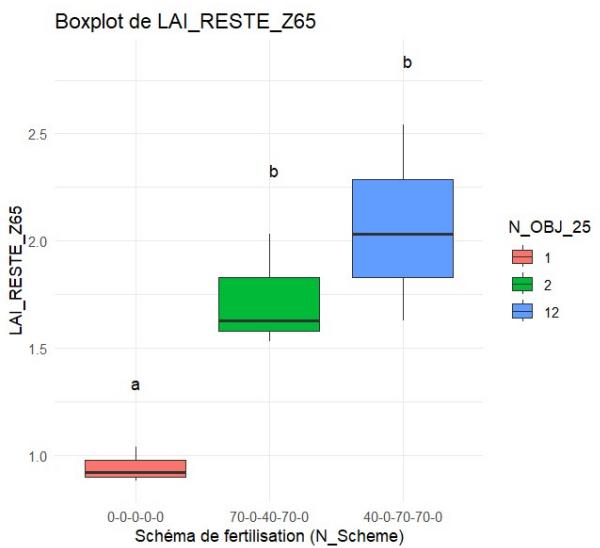


Figure 26. Boxplot du LAI des feuilles hors F1 et F2 au stade 65.

6.4. Rendement et ses composantes

6.4.1. Rendement

Les résultats du test ANOVA pour les rendements suggèrent une différence hautement significative pour cette variable. Le test emmeans permet de déterminer les modalités présentant des différences significatives entre elles.

Le graphique (Figure 27) met en avant l'écart de rendement entre la modalité sans azote (objet 1) et les autres modalités. En effet, la modalité 1 a des rendements nettement inférieurs avec environ 5,5 Tonnes par hectare, tandis que les autres objets ont des rendements proches aux alentours de 10 tonnes par hectare. Les trois modalités les plus productives sont, dans l'ordre décroissant, la modalité 10, 8 et 9.

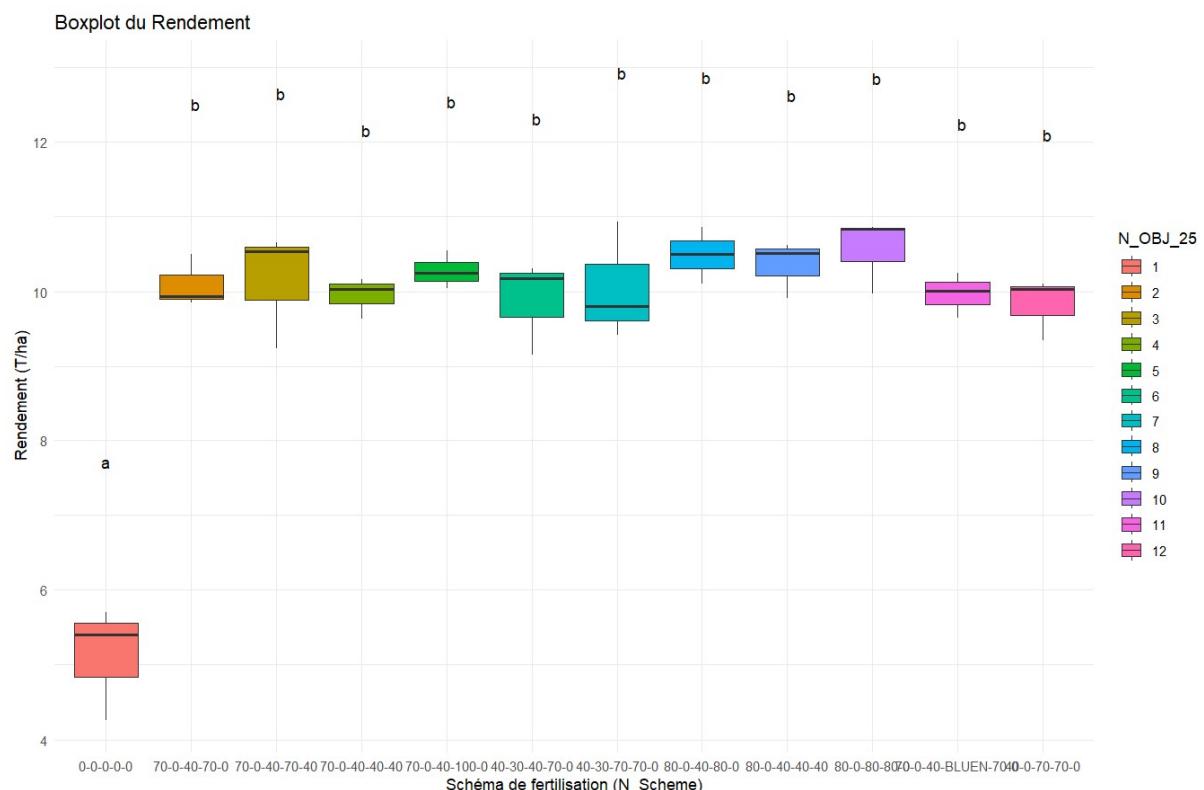


Figure 27. Boxplot du rendement.

6.4.2. Densité d'épis

La densité d'épis (nombre d'épis par m²) a été mesurée aux stades 65, 75. Au stade 65, les densités sont similaires à l'exception d'une différence notable entre l'objet 10 et 11 (Figure 28). Pour le stade 75, les densités d'épis sont comparables pour l'ensemble des objets (Figure 29). Entre le stade 65 et le stade 75, la densité d'épis a augmenté pour l'ensemble des objets.

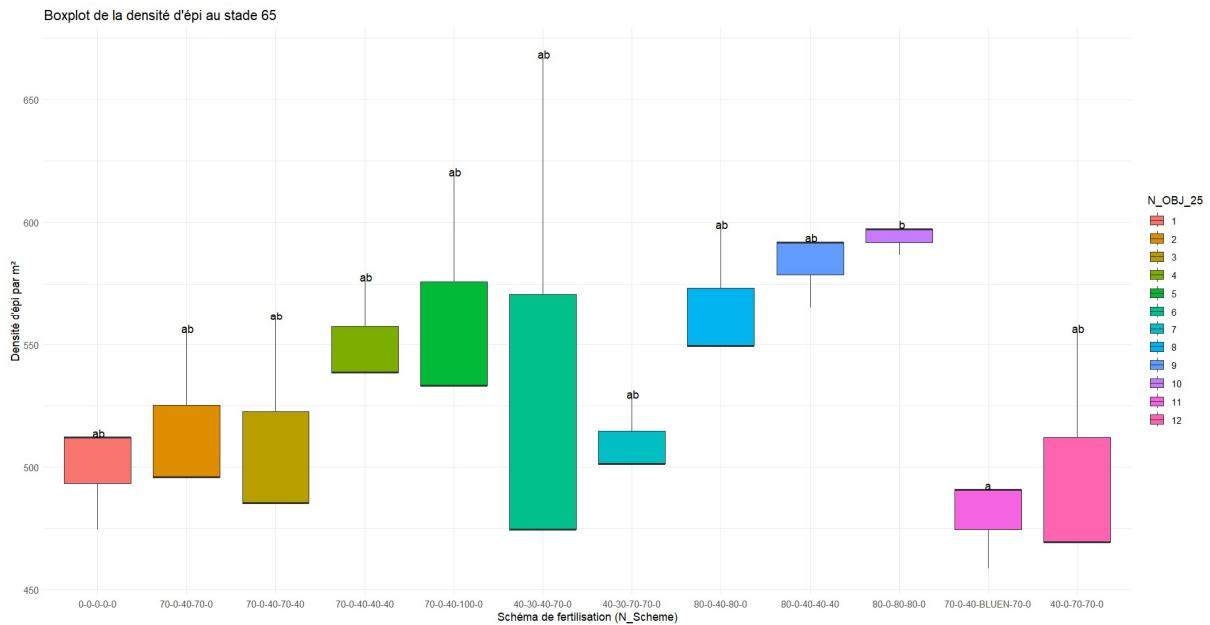


Figure 28. Boxplot de la densité d'épis au stade 65.

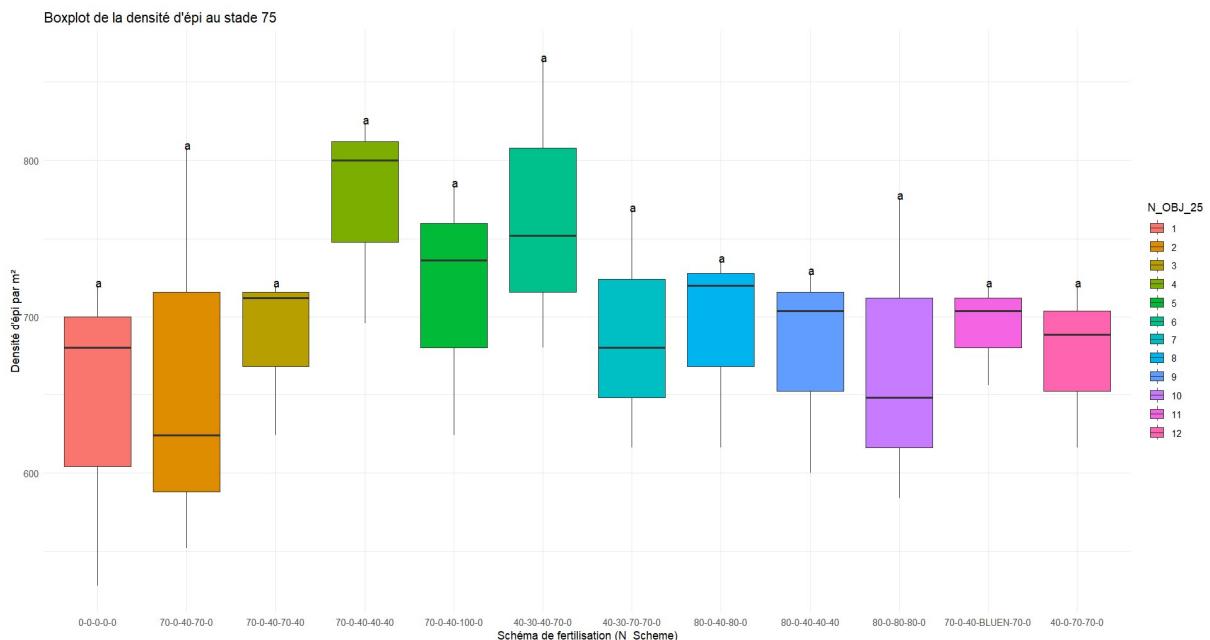


Figure 29. Boxplot de la densité d'épis au stade 75.

6.4.3. Fertilité des épis

La modalité non-fertilisée (Modalité 1) se distingue du reste des objets par un faible nombre d'épillets (Figure 30). Les autres objets sont tous similaires au niveau du nombre d'épillets par épi. Cette nette séparation entre la modalité n°1 et le reste des objets se retrouve également pour le nombre de grains par épi (Figure 31). Avec, en

plus, une différence entre l'objet 2 (b) et l'objet 8 (c) tandis que les autres modalités sont dans un groupe intermédiaire (bc) entre ces deux modalités.

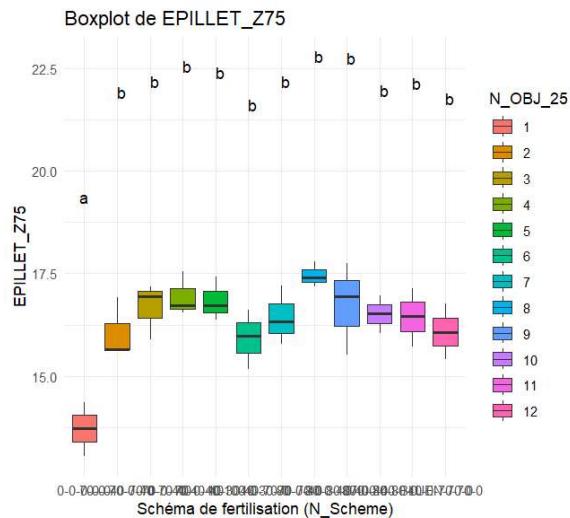


Figure 30. Boxplot du nombre d'épillets par épi au stade 75.

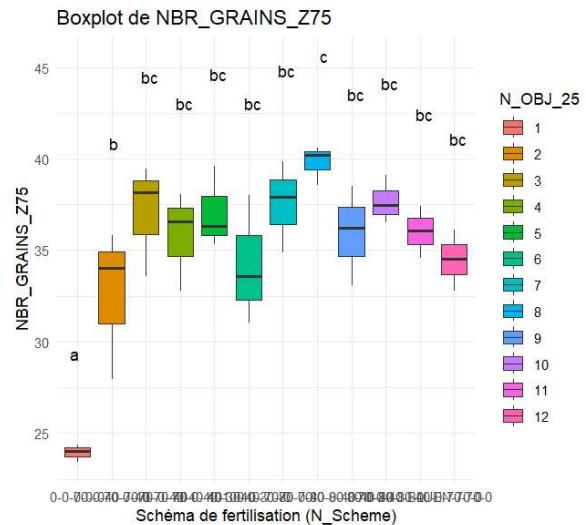


Figure 31. Boxplot du nombre de grains par épi au stade 75.

6.4.4. Densité de grains

La densité de grains a pu être calculée directement grâce aux mesures de nombres d'épis et de grains par épi réalisées au stade Z75. La figure 32 montre clairement que la modalité 1 possède la densité de grains la plus faible. A l'opposé, les modalités 3 à 11 ont des densités plus élevées, mais qui ne diffèrent pas entre-elles (groupe b). Les modalités 2 et 12 se trouvent dans le groupe intermédiaire ab. Il n'y a donc pas de différences significatives entre les modalités fertilisées (Modalités 2 à 12).

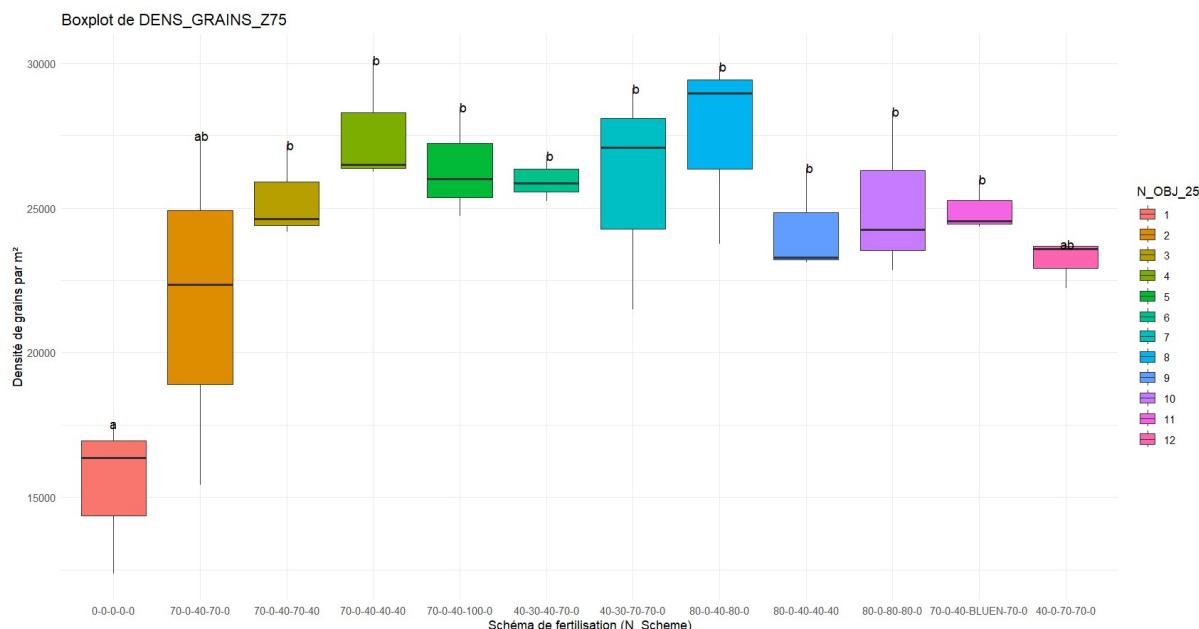


Figure 32. Boxplot de la densité de grains au stade 75.

6.4.5. Corrélation entre les composantes de rendement et le niveau de fertilisation azotée

Les corrélations entre les différentes composantes du rendement mesurées au stade 75, le rendement et la dose totale d'azote sont résumées dans la figure 32. Pour rappel, la densité de grains (DENS_GRAINS_Z75) a été calculée grâce aux variables fertilité des épis (NBR_GRAINS_Z75) et densité d'épis (EPI_TOT_Z75).

Le rendement est très fortement corrélé (93,2%) avec la dose totale d'azote. Mais également avec le nombre de grains par épi (79,5%) et la densité de grains (62,7%). En revanche, il ne semble pas y avoir de corrélation entre le rendement et la densité d'épis (9,3%). Les corrélations entre la variable dose d'azote totale et les variables densité de grains (69,8%) et nombre de grains par épi (82,8%) sont également élevées. Parmi les composantes du rendement, c'est donc la fertilité des épis qui est le plus corrélée au rendement. C'est également cette composante qui à la plus forte corrélation avec la quantité d'azote apportée (82,8%).

En plus des corrélations, des tendances entre les variables peuvent être observées sur les graphiques de la figure 33. Les relations entre la dose totale d'azote et les

autres variables confirment certains résultats antérieurs. Le rendement, la fertilité des épis (NBR_GRAINS_Z75) et la densité de grains sont nettement inférieurs pour la modalité non fertilisée. En revanche, aucune relation ne se dessine entre la dose d'azote totale et la densité d'épis comme le confirme la faible corrélation entre ces deux variables (15,6%).

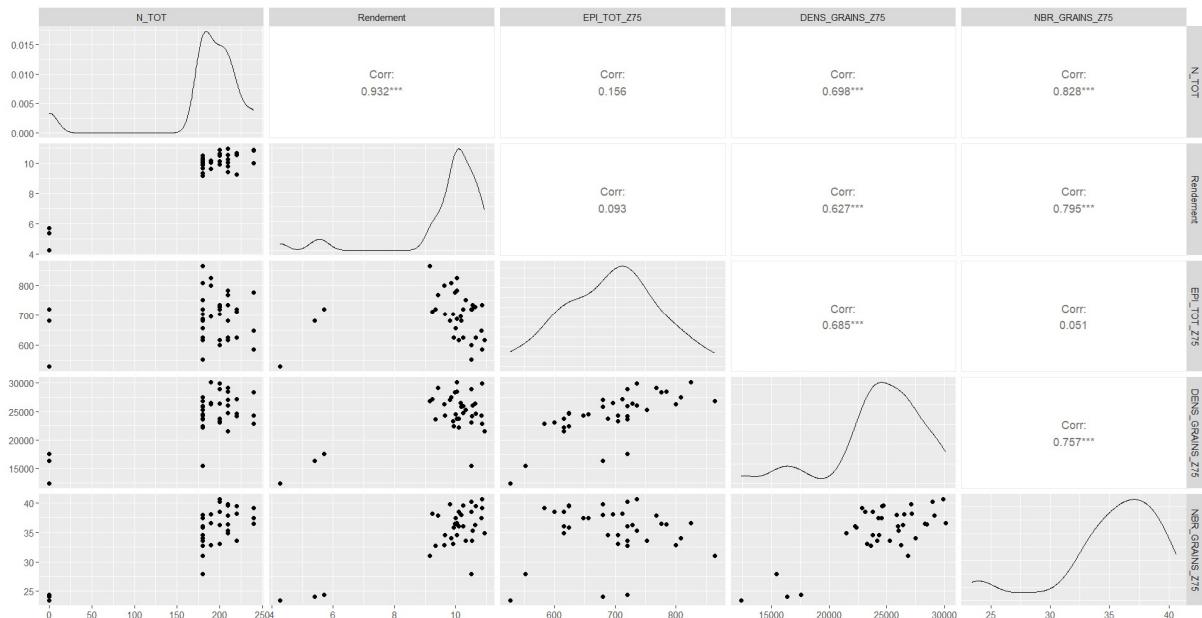


Figure 33. Corrélations entre les composantes du rendement, le rendement et la dose d'azote totale.

6.5. Teneur en protéines du grain

Le test statistique initial indique la présence de différences hautement significatives pour les teneurs en protéines. La modalité 1 possède le taux le plus faible en dessous de 11% en moyenne (Figure 34). Elle se démarque des autres modalités qui ont des teneurs plus élevées. A l'opposé, la modalité 3 a le taux le plus élevé et se retrouve également seul dans le groupe d'après le test emmeans. Les modalités qui ont reçu un complément de 40 unités d'azote à la mi-épiaison (Modalités 3,4 et 9) ont toutes les trois un taux de protéines supérieurs à 14,4 % (Annexe 7). C'est un bon taux de protéines mais ces valeurs ne se démarquent pas des valeurs pour les autres modalités fertilisées.

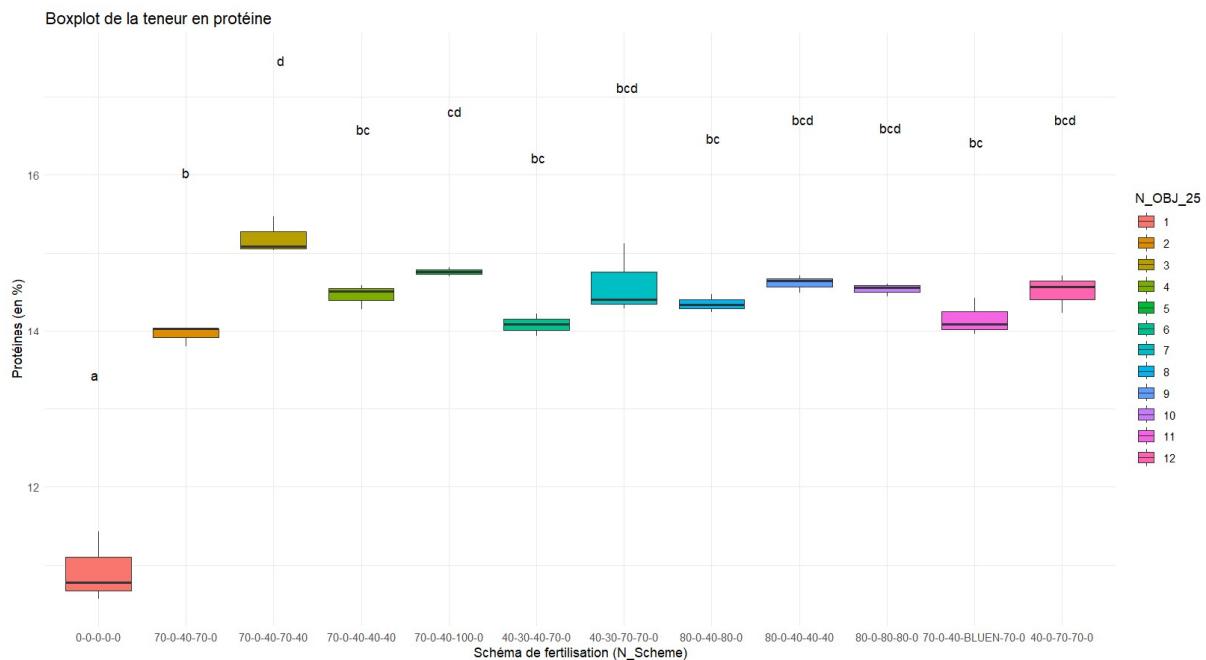


Figure 34. Boxplot de la teneur en protéines des grains récoltés.

6.6. Récapitulatif des composantes de rendement

Le tableau 6 ci-dessous résume la significativité des différentes variables par rapport à la fertilisation azotée pour les mesures prises au stade 75 ainsi que le rendement. Le PMG sera analysé dans la partie suivante car il est détaillé en fonction des catégories. Pour rappel, le rendement peut être calculé à partir des deux équations ci-dessous.

$$\text{Rendement} = \text{épi/m}^2 \times (\text{densité d'épis}) * \text{Grains/épis} (\text{Fertilité}) * \text{PMG}$$

$$\text{Rendement} = \text{Grains/m}^2 * \text{PMG}$$

Tableau 6. Tableau récapitulatif des résultats du test Anova pour les composantes de rendements au stade 75.

	Rendement	Densité d'épis (Z75)	Fertilité (Z75)	PMG	Densité de grains (Z75)
Significativité	***	n.s	***	/	**

Légende : n.s : Non significatif ; * : <0,05 ; ** : <0,01 ; *** <0,001

En résumé, il existe des différences qui sont dus aux faibles rendements de la modalité non fertilisée. L'analyse des composantes de rendement suggère que l'impact de la fertilisation a été concentré sur la fertilité des épis et pas sur leur densité. La meilleure fertilité a induit une meilleure densité de grains et a permis, in fine, d'obtenir des rendements supérieurs.

6.7. Rendement et ses composantes par catégorie d'épis

Les mesures prises au stade 87 permettent de détailler le rendement et ses composantes pour les différentes catégories d'épis décrite ci-dessous.

6.7.1. Différentiation des épis

Au stade Z75, des mesures ont été prises afin de déterminer la méthode à appliquer pour pouvoir séparer les épis. Les mesures de longueur d'épis, du nombre d'épillet et du nombre de grains par épi ont été réalisées. En parallèle, chaque épi mesuré a été placé dans une catégorie (grand, moyen, petit, tardillon) par l'observateur.

Grand		Moyen	
longueur_Epis		longueur_Epis	
Min. 1st Qu.	Median	Min. 1st Qu.	Median
6.600 8.000	8.400	5.40 7.00	7.20
Mean 3rd Qu.	Mean 3rd Qu.	Mean 3rd Qu.	Mean 3rd Qu.
8.379 8.700	8.700	7.19 7.50	7.50
Max.	Max.	Max.	Max.
10.500		9.50	
nombre_epillets		nombre_epillets	
Min. 1st Qu.	Median	Min. 1st Qu.	Median
15.0 18.0	19.0	11.00 16.00	17.00
Mean 3rd Qu.	Mean 3rd Qu.	Mean 3rd Qu.	Mean 3rd Qu.
19.2 20.0	20.0	16.66 18.00	18.00
Max.	Max.	Max.	Max.
24.0		26.00	
Nombre_grains		Nombre_grains	
Min. 1st Qu.	Median	Min. 1st Qu.	Median
0.00 45.00	49.00	0.00 29.00	33.00
Mean 3rd Qu.	Mean 3rd Qu.	Mean 3rd Qu.	Mean 3rd Qu.
48.96 53.00	53.00	33.38 37.00	37.00
Max.	Max.	Max.	Max.
72.00		63.00	
Petit		Tardillon	
longueur_Epis		longueur_Epis	
Min. 1st Qu.	Median	Min. 1st Qu.	Median
3.600 5.300	5.900	2.800 3.900	4.000
Mean 3rd Qu.	Mean 3rd Qu.	Mean 3rd Qu.	Mean 3rd Qu.
5.767 6.200	5.767	4.179 4.500	4.179
Max.	Max.	Max.	Max.
7.500		6.000	
nombre_epillets		nombre_epillets	
Min. 1st Qu.	Median	Min. 1st Qu.	Median
0.00 12.00	13.00	4.000 7.000	8.000
Mean 3rd Qu.	Mean 3rd Qu.	Mean 3rd Qu.	Mean 3rd Qu.
12.75 14.00	12.75	8.555 10.000	8.555
Max.	Max.	Max.	Max.
19.00		15.000	
Nombre_grains		Nombre_grains	
Min. 1st Qu.	Median	Min. 1st Qu.	Median
0.0 18.0	22.0	0.000 6.000	9.000
Mean 3rd Qu.	Mean 3rd Qu.	Mean 3rd Qu.	Mean 3rd Qu.
20.7 25.0	20.7	8.865 11.000	8.865
Max.	Max.	Max.	Max.
39.0		23.000	

Figure 35. Quartiles et moyennes des catégories d'épis.

Les statistiques descriptives permettent déjà de se faire une première idée des manières de séparer les catégories d'épis (Figure 35). 75% des épis catégorisés comme grand font plus de 8 cm de long, ont plus de 18 épillets et 45 grains. 50% des épis moyens se situe entre 7 et 7,5 cm de long et ont entre 29 et 37 grains. Pour les petits épis, 50% ont entre 18 et 25 grains tandis que les tardillons ont pour la plupart (75%) moins de 11 grains.

A partir des mesures prises, un arbre de décision (Figure 36) a été réalisé afin de déterminer à posteriori les longueurs seuils pour catégoriser les épis. Il a été décidé d'utiliser seulement la longueur des épis et d'écartier le nombre de grains et d'épillet car ces mesures étaient trop contraignantes et chronophages à réaliser. De plus, l'utilisation seule de la longueur des épis donne des résultats convaincants.

Arbre de décision pour classer les épis

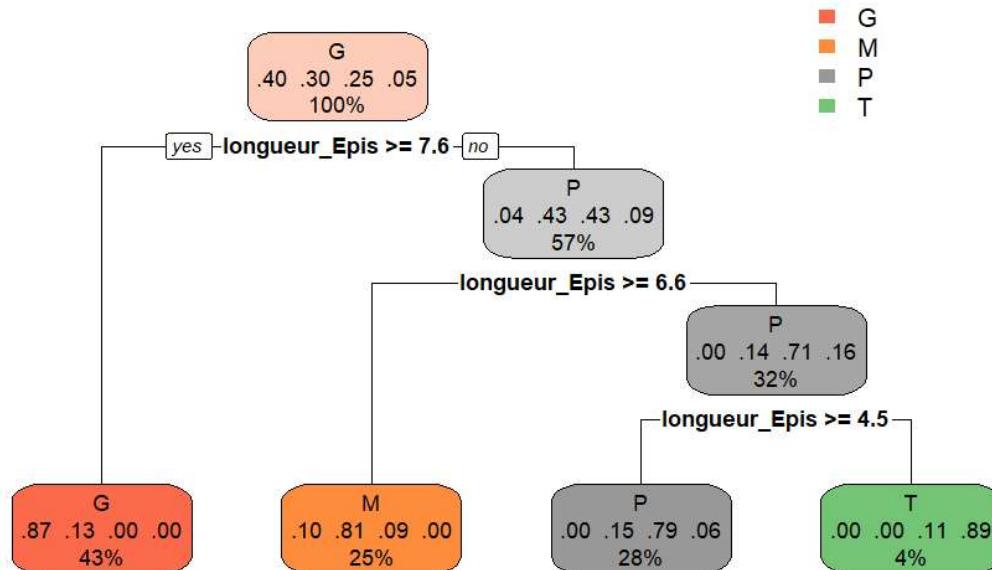


Figure 36. Arbre de décision pour le classement des épis.

L'objectif de cet arbre est uniquement d'obtenir une méthode claire et précise pour les mesures ultérieures durant l'année 2025. Cette méthode n'est pas généralisable et ne peut être appliquée dans d'autres contextes.

L'arbre ci-dessus prédit 83,2% des observations correctement. Le jeu de données avait d'abord été divisé en 2 sous-jeux car 2 observations avaient été réalisée par parcelle. Les deux jeux de données ont été utilisés un à un pour réaliser le modèle et le valider sur le deuxième jeu. Les longueurs seuils étaient similaires entre les 2 modèles et la validation sur le deuxième sous-jeu de données donnaient une précision de 82,3% et 82,4% (Annexe 4). Il a donc été décidé d'utiliser la méthode ci-dessous pour catégoriser les épis en quatre groupes (Tableau 7).

Tableau 7. Catégorisation des épis.

Type d'épi	Longueur
Grand (G)	$>= 7,6 \text{ cm}$
Moyen (M)	$7,6 \text{ cm} > M > = 6,6 \text{ cm}$
Petit (P)	$6,6 \text{ cm} > P > = 4,5 \text{ cm}$
Tardillon (T)	$4,5 \text{ cm} > T$

Ces données ayant été prises durant la saison 2025, il est impossible de déterminer l'impact de l'année sur la longueur des épis ainsi que sur les autres paramètres. C'est pourquoi, cette classification des épis n'est applicable que pour la saison actuelle.

En appliquant les longueurs cibles sur l'histogramme cumulé des fréquences, on observe que 41.2 % des épis sont catégorisés comme grands, 25.9 % comme moyens et 27.8 % comme des petits épis. Cette information pourrait être pertinente afin de déterminer les longueurs seuils dans les années ultérieures (Figure 37).

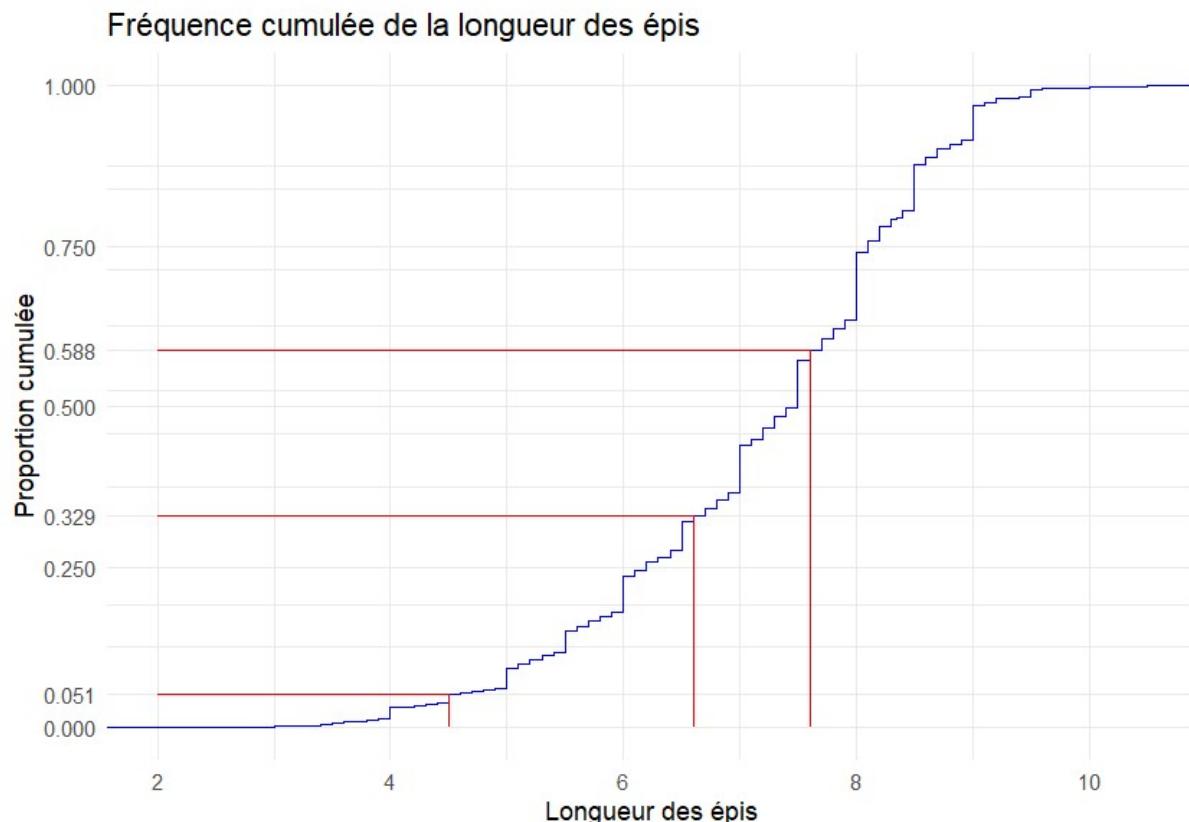


Figure 37. Histogramme des fréquences cumulées de la longueur des épis avec les valeurs seuils.

6.7.2. Synthèse des résultats du test ANOVA par catégorie d'épis

Le tableau 8 ci-dessous reprend les résultats du test ANOVA pour les mesures réalisées au stade 87 sur les composantes de rendement. La première ligne correspond au résultat pour le test des variables en rassemblant les catégories d'épis (Grand, moyen, petit). La catégorie des tardillons n'a pas été analysée à l'exception de la densité d'épis sans pour autant être comptée dans la densité d'épis totale. Ce choix a été motivé par plusieurs facteurs. Tout d'abord, lors de la séparation des épis en catégories, le nombre de tardillons s'est avéré être très faible, voire nul, dans certains échantillons. Il était donc impossible de calculer le PMG, la fertilité des épis, etc. pour toutes les modalités puisque la catégorie était parfois absente de l'échantillon. Deuxièmement, le calcul de variables sur de faibles effectifs ne permettrait pas d'obtenir des résultats fiables. Troisièmement, les tardillons correspondent à des épis généralement portés par des tiges basses et dont les grains sont minuscules. Ils sont donc plus susceptibles d'être perdus lors de la récolte. Enfin, leur faible densité combinée à un faible nombre de grains de taille minuscule les rend négligeables dans le calcul du rendement final.

Tableau 8. Tableau récapitulatif des résultats du test Anova pour les composantes de rendements et le rendement estimé au stade 87 par catégorie d'épis.

Rendement estimés		Densité d'épis	Fertilité	PMG	Densité de grains
Total	***	n.s	*	***	***
Grand	**	***	n.s	n.s	**
Moyen	*	n.s	n.s	n.s	*
Petit	n.s	***	n.s	n.s	*
Tardillons	/	**	/	/	/

Légende : n.s : Non significatif ; * : <0,05 ; ** : <0,01 ; ***<0,001

6.7.3. Rendements estimés par catégorie

Les graphiques ci-dessous représentent les rendements estimés à partir des mesures de poids réalisées sur les grains battus manuellement (Figures 38, 39 et 40). Premièrement, les valeurs estimées nous indiquent que la modalité 1 ne se comporte pas de la même manière que les autres. Pour les 11 autres modalités, les grands épis représentent entre 50 et 75% du rendement final estimé, les épis moyens représentent entre 20 et 35% tandis que les petits épis représentent seulement 5% à 20%. Pour la modalité non fertilisée, les petits épis contribuent légèrement moins que les grands au rendement final tandis que les épis moyens ne représentent qu'une faible partie de celui-ci. La modalité 1 est celle qui a le rendement en petits épis le plus élevé. Toutefois, les rendements en petits épis ne sont pas significativement différents entre les 12 modalités. La grande différence de rendement entre l'objet 1 et les autres vient de ses rendements nettement plus faibles pour les deux autres catégories d'épis.

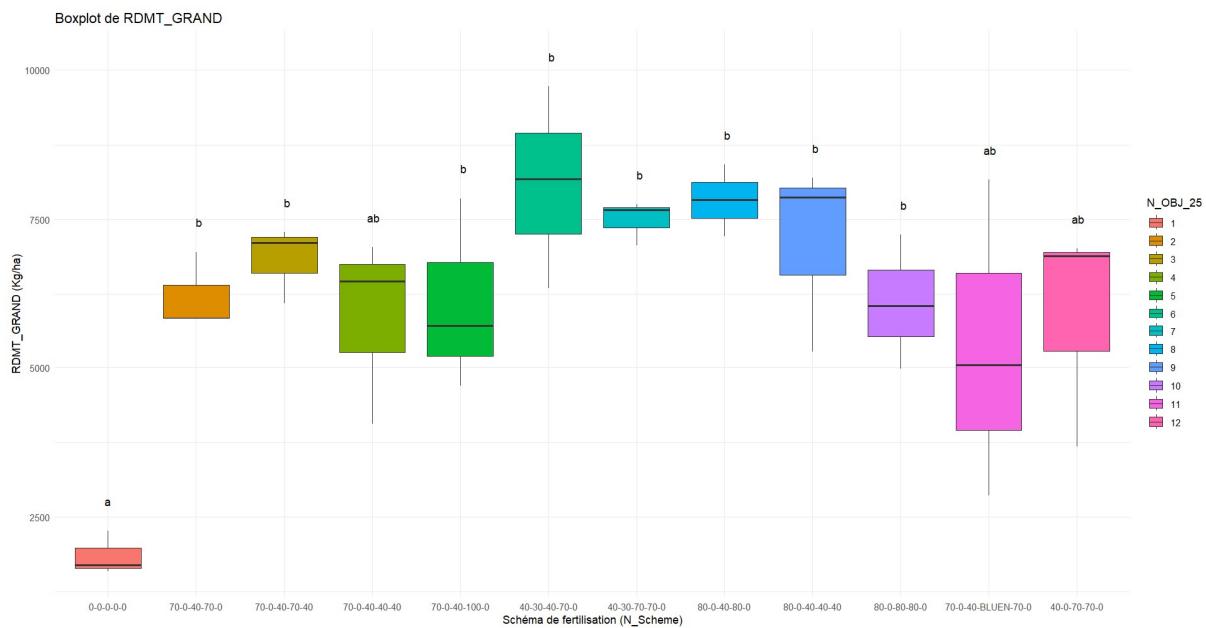


Figure 38. Boxplot du rendement estimé pour les grands épis.

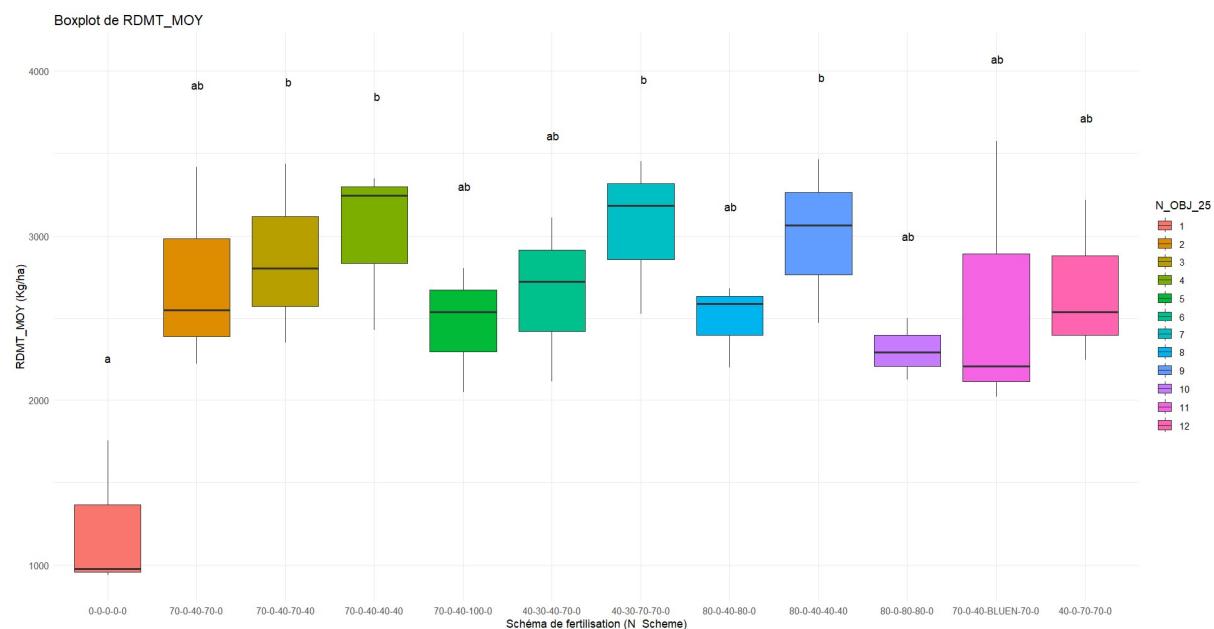


Figure 39. Boxplot du rendement estimé pour les épis moyens.

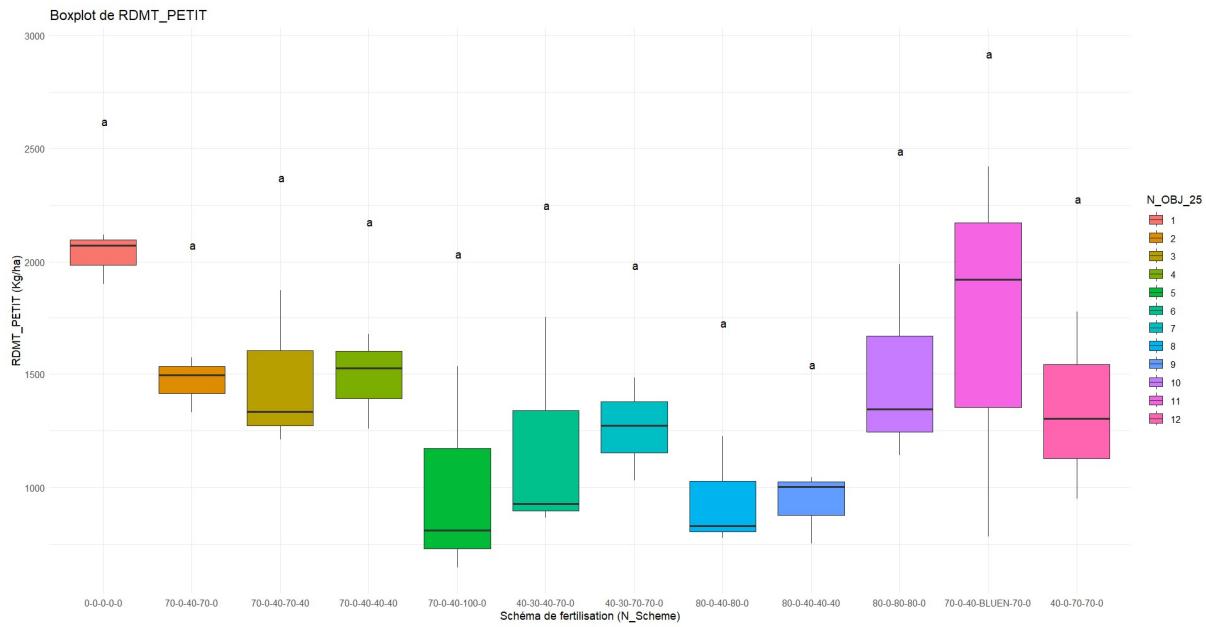


Figure 40. Boxplot du rendement estimé pour les petits épis.

A partir des estimations, un rendement total a pu être estimé (Figure 41). Des variations de 10 à 20% sont observées en comparaison aux valeurs du rendement parcellaire (Figure 27). Les groupes emmeans restent tout de même similaire. En effet, l'objet a des rendements inférieurs de moitié aux autres objets comme c'était le cas pour le rendement parcellaire.

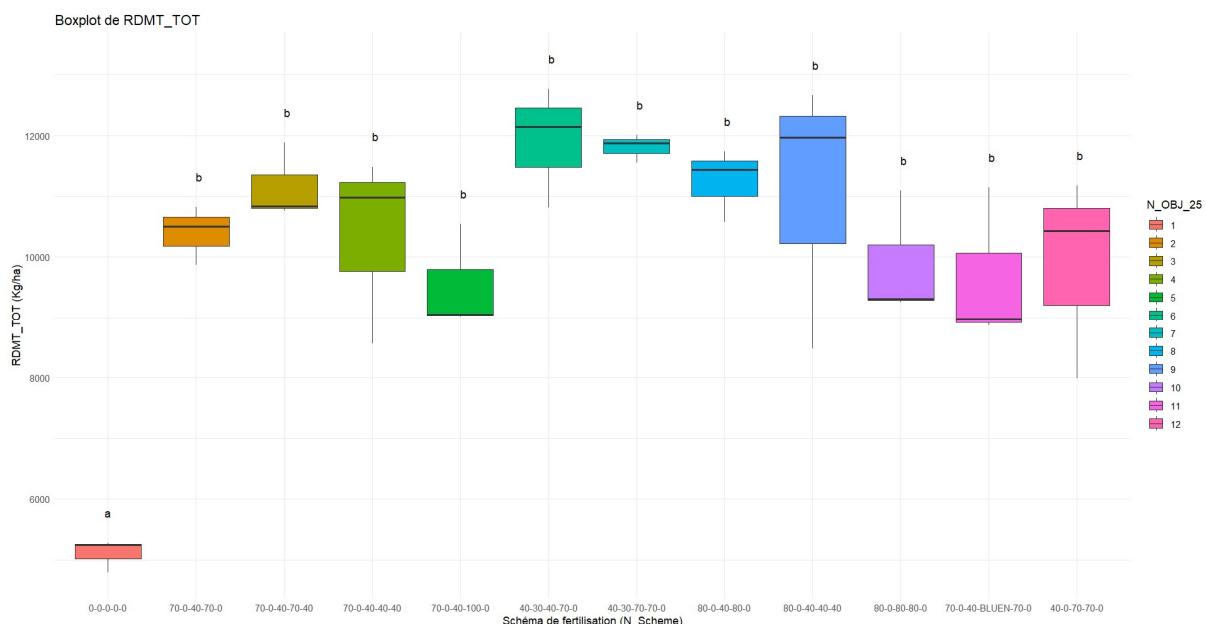


Figure 41. Boxplot du rendement total estimé au stade 87.

6.7.4. Densité d'épis par catégorie

Au stade 87, la densité d'épis totale est toujours équivalente pour les douze modalités (Figure 45). Toutefois, les densités au sein des catégories sont significativement différentes. La modalité 1 a moins de 60 grands épis/m² tandis que les autres en ont plus de 200 (Figure 42). Le constat est similaire pour les épis moyens même si le retard de la modalité 1 est moindre (Figure 43). A l'inverse, la densité de petits épis est bien plus importante pour l'objet 1 (Figure 44). Il semblerait que l'azote soit impactant au niveau de la proportion des catégories entre les modalités. La modalité 8 est celle qui possède la plus faible densité pour cette catégorie et, pour rappel, elle figure parmi les modalités aux meilleurs rendements.

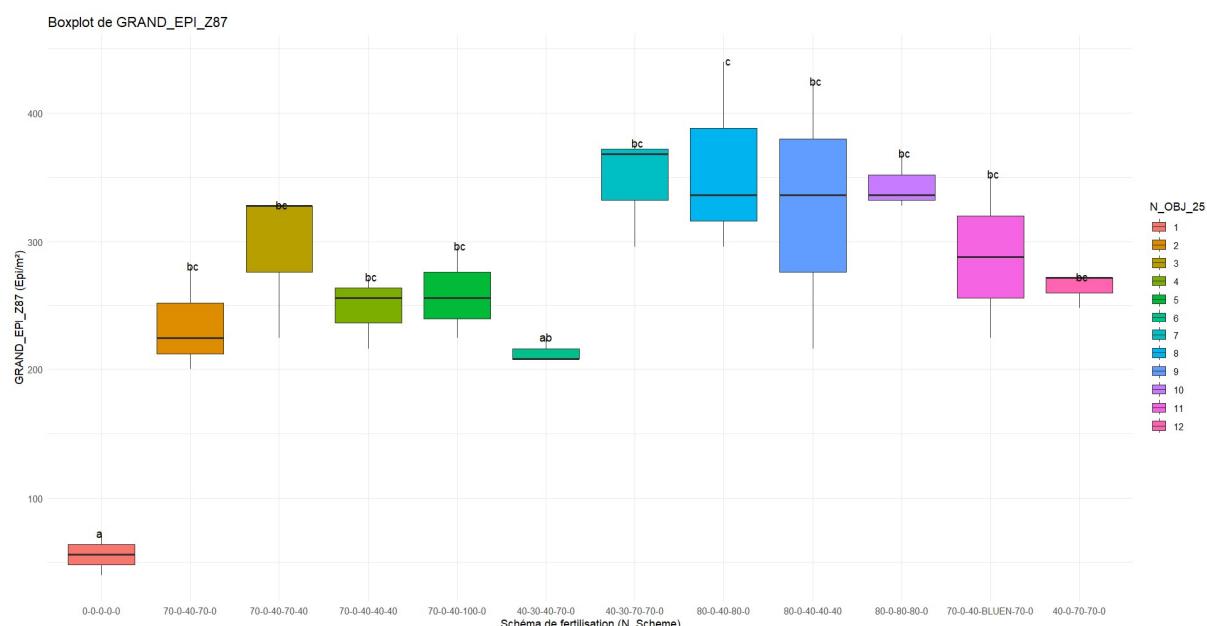


Figure 42. Boxplot de la densité des grands épis au stade 87.

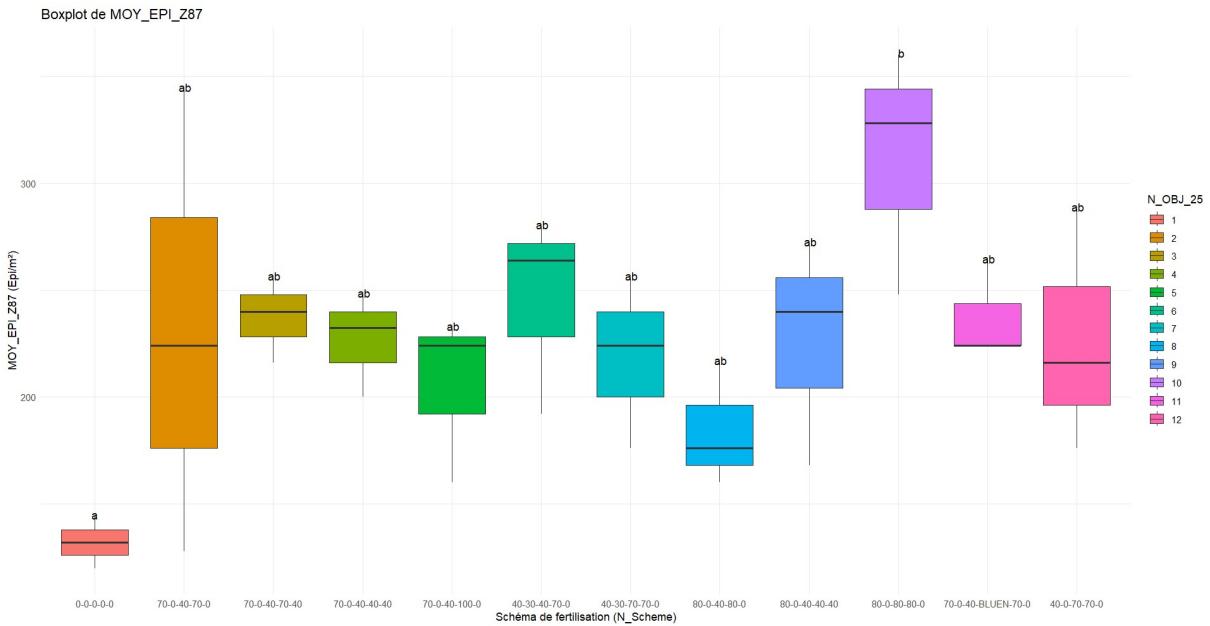


Figure 43. Boxplot de la densité des épis moyens au stade 87.

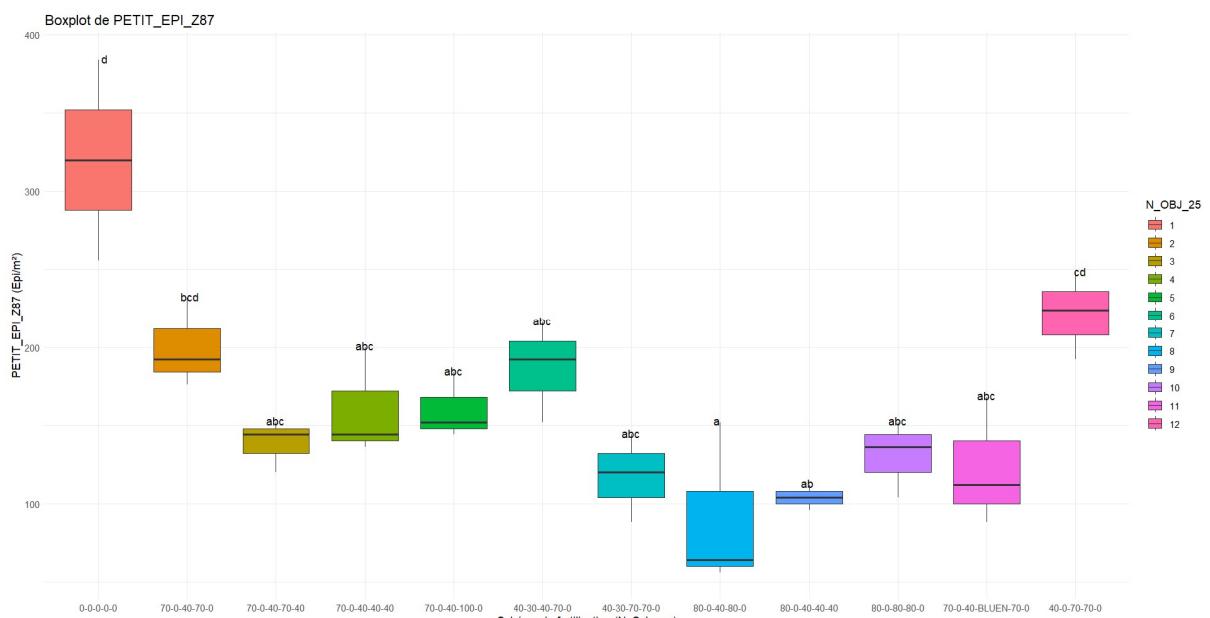


Figure 44. Boxplot de la densité des petits épis au stade 87.

Boxplot de EPI_TOT_Z87

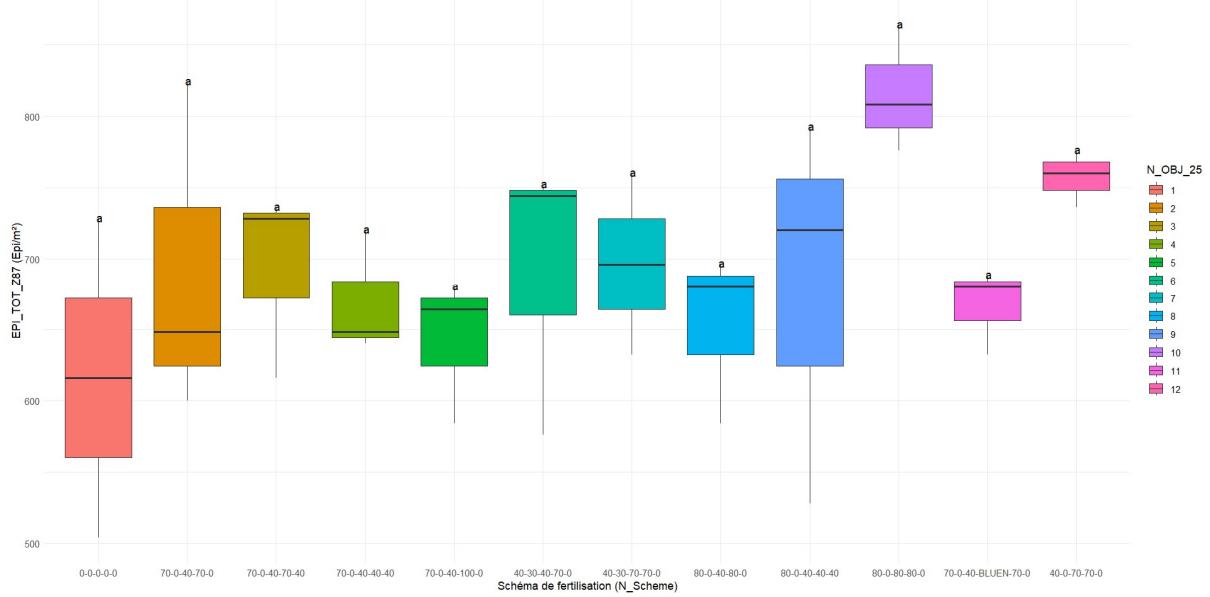


Figure 45. Boxplot de la densité d'épis totale au stade 87.

6.7.5. Fertilité des épis par catégorie

Au niveau de la fertilité des épis, aucune différence n'a été observée par catégorie entre les modalités.

En revanche, la fertilité moyenne toutes catégories confondues présente des différences significatives entre les modalités (Figure 46). Tout comme pour la fertilité au stade 75, la modalité 1 a la fertilité la plus faible. Les modalités 6,7 et 8 ont une fertilité significativement supérieure par rapport à la n°1.

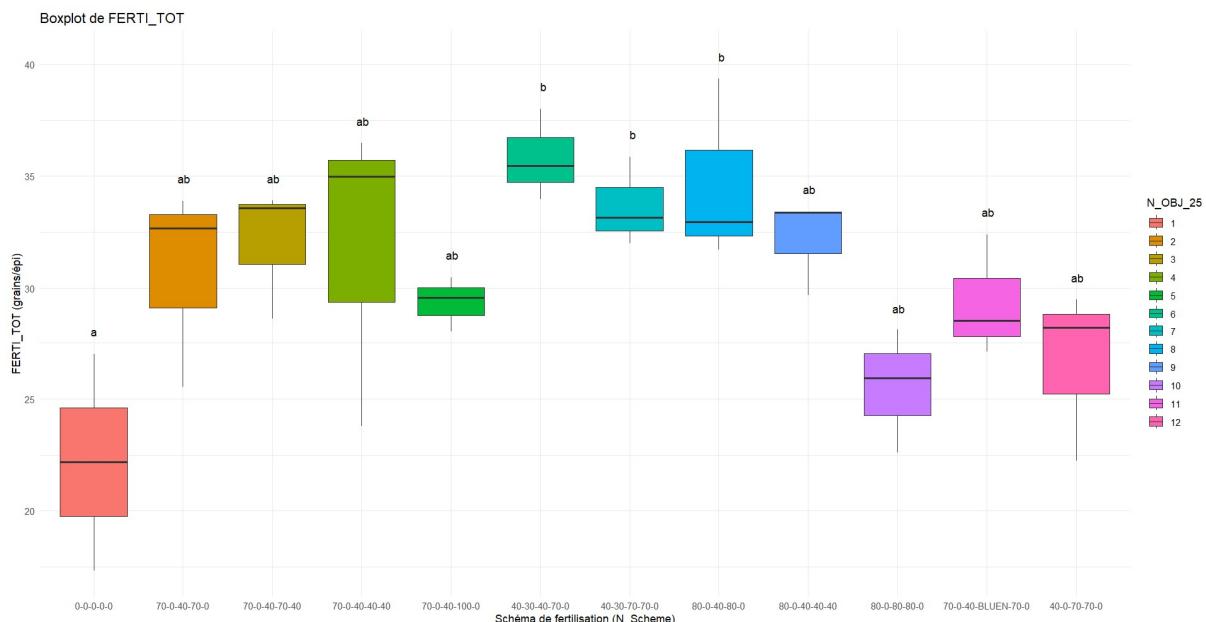


Figure 46. Boxplot de la fertilité de l'ensemble des épis au stade 87.

6.7.6. PMG par catégorie

Tout comme pour la fertilité des épis, aucune différence significative ne ressort de l'analyse statistique pour les poids de mille grains par catégorie entre les objets. Pour le PMG total (Figure 47), le PMG de l'objet 1 est significativement différent des objets 2 à 11. Tandis que ces derniers ont un PMG de 50 à 53 grammes, l'objet 1 a un PMG de seulement 46-47 grammes. Cela s'explique par de faibles différences de PMG entre les catégories d'épis qui sont accentuées par les différences de densité d'épis par catégorie entre les modalités

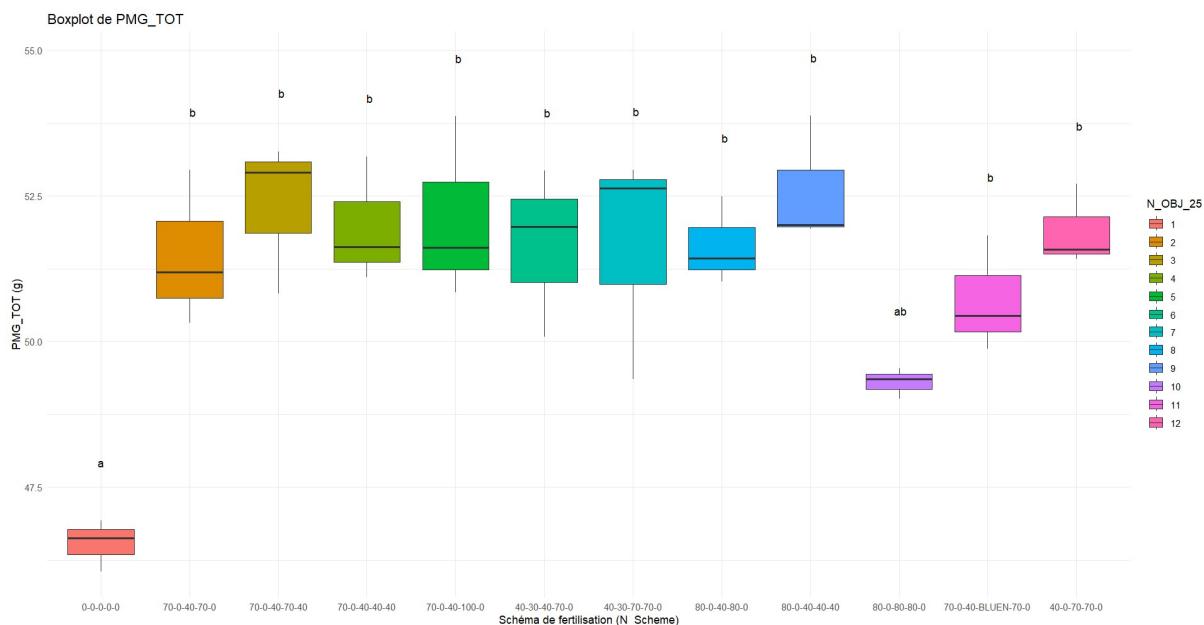


Figure 47. Boxplot du PMG total.

6.7.7. Densité de grains par catégorie

Au niveau de la densité de grains, des différences significatives étaient observées pour la densité totale ainsi que pour les 3 catégories (Tableau 8). Ces différences sont, encore une fois, liées à la modalité 1 qui se démarque par sa densité plus faible pour les grands et les moyens épis et une densité plus élevée pour la densité de grains des petits épis (Figures 48, 49 et 50). Pour les modalités fertilisées, le nombre de grains par m^2 se situe entre 10 000 et 15 000 pour les grands épis, entre 4 500 et 6 500 pour les épis moyens et entre 1 500 et 4 200 pour les petits. Les grands épis sont la part la plus importante de la densité de grains totale.

La densité de grains totale au stade 87 ne présente pas de différence significative entre les modalités fertilisées (Figure 51). La densité de grains de la modalité 1 est significativement différente et nettement inférieure aux 11 autres. En comparaison aux densités calculées au stade 75, les densités obtenues au stade 75 sont nettement plus faibles notamment pour les modalités fertilisées. La différence de méthode de calcul pourrait expliquer cette différence.

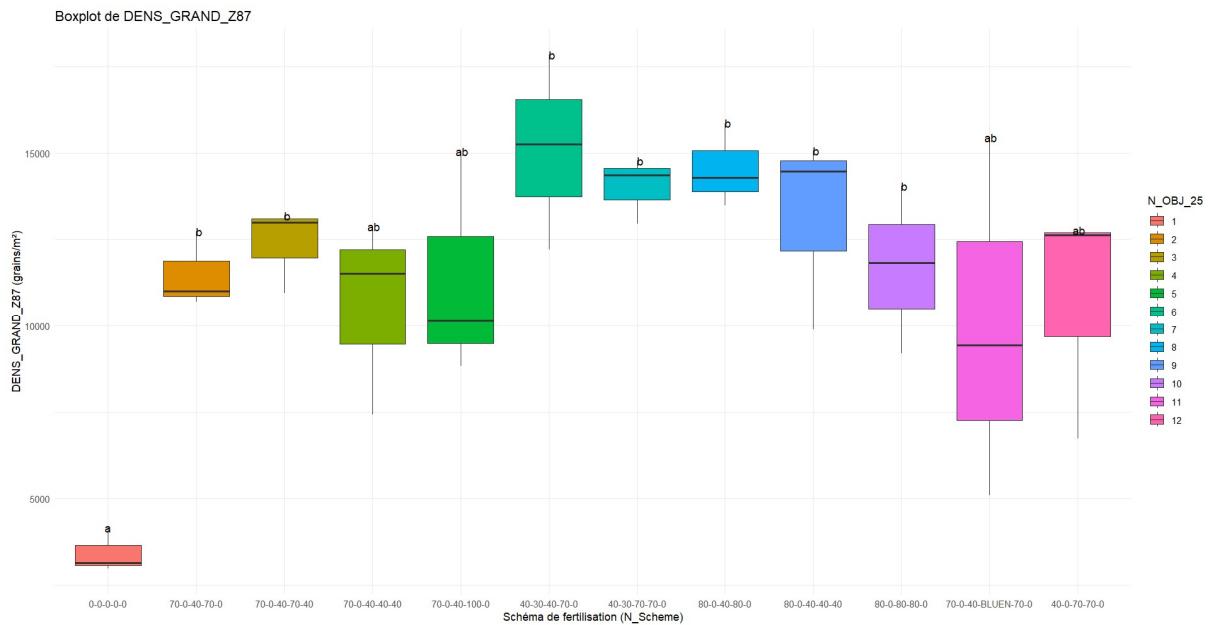


Figure 48. Boxplot de la densité de grains des grands épis au stade 87.

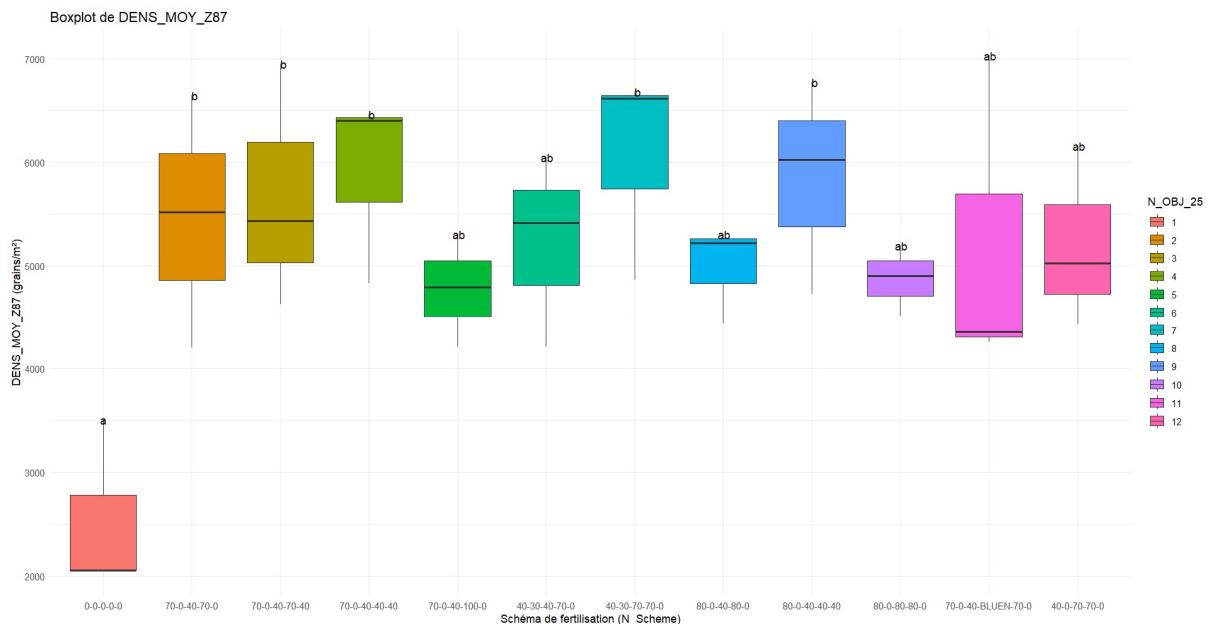


Figure 49. Boxplot de la densité de grains des épis moyens au stade 87.

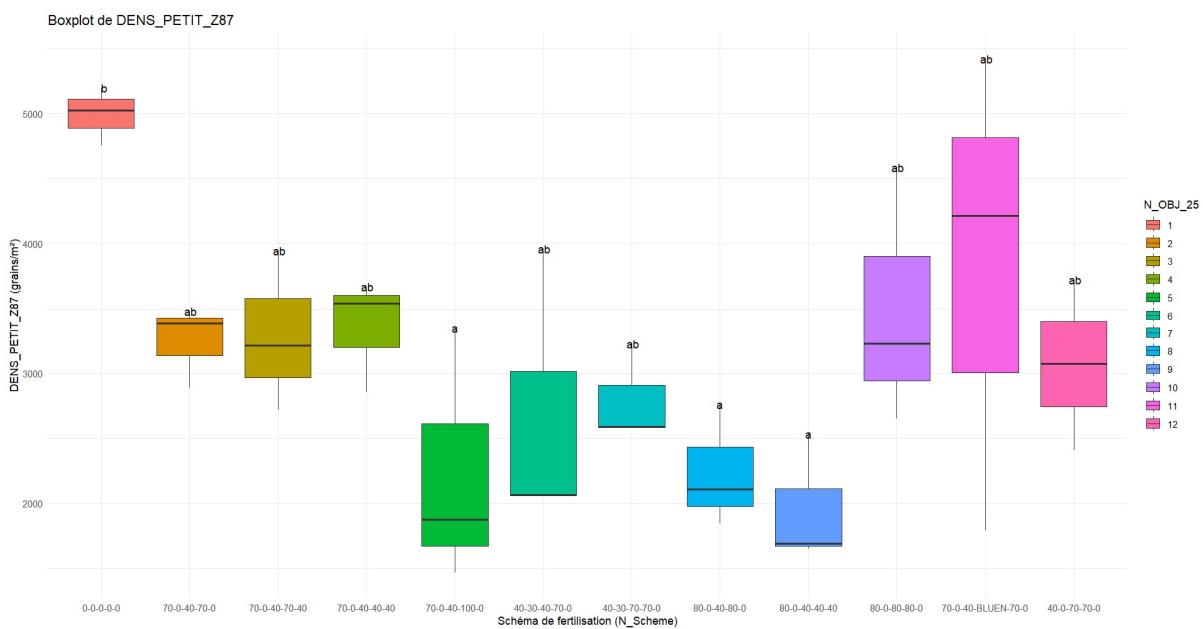


Figure 50. Boxplot de la densité de grains des petits épis au stade 87.

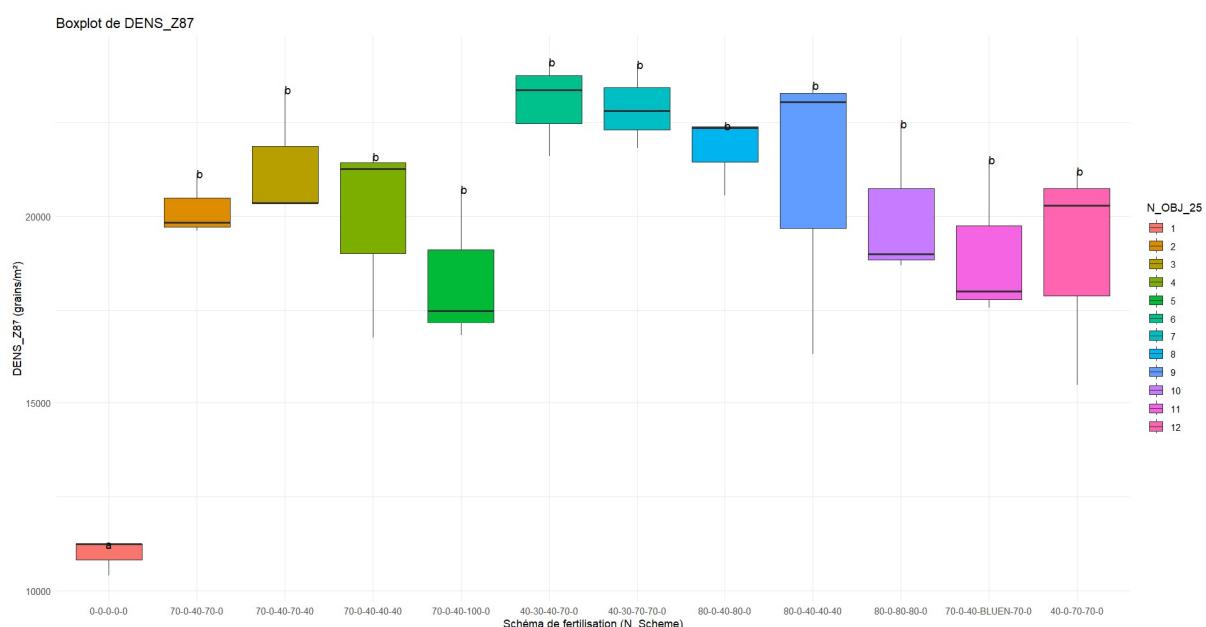


Figure 51. Densité de grains totale au stade 87.

7. Discussion

7.1. Rendement et composantes

Toutes les modalités ont des rendements similaires à l'exception de la modalité non fertilisée. Celle-ci a des rendements quasi 50% inférieurs aux autres. La corrélation entre l'apport d'azote total et le rendement est très élevée et nous permet de confirmer l'importance de l'azote pour la productivité de la culture. L'analyse des composantes permet d'expliquer la moindre productivité de la modalité 1.

Concernant la densité d'épis, malgré des différences au stade 65, toutes les modalités ont des densités d'épis similaires au stade 75. Il semble donc que l'azote n'ait pas été limitant pour le développement des épis. Il semblerait donc que l'absence de fertilisation n'ait pas été impactante pour le tallage et le redressement de ceux-ci. Les différences de densités d'épis mesurées au stade 65 sont probablement liées à de faibles différences de précocité entre les modalités ce qui expliquerait que les densités soient équivalentes au stade 75. Par ailleurs, la densité d'épis a augmenté entre ces deux stades pour l'ensemble des observations. A l'avenir, il serait judicieux de prioriser la mesure au stade 75 pour obtenir la valeur de référence de cette composante.

En revanche, la fertilité des épis a été impactée. La modalité 1 est nettement inférieure aux autres modalités pour le nombre d'épillets et le nombre de grains par épi. La combinaison du nombre de grains par épi et de la densité d'épis permet d'estimer une densité de grains. Sur cette variable, l'écart entre la modalité 1 et le reste est en conséquence élevé. En effet, la densité moyenne est de 15 400 grains/m² contre entre 21 700 et 27 600 grains/m² en moyenne pour les autres modalités. Ces résultats sont cohérents avec les travaux de Slafer *et al* (2022), où les densités varient entre 5000 et 35000 grains/m² pour la majorité des observations. Dans leur étude, les densités d'épis sont comprises entre 300 et 900 épis par m², ce qui englobe l'intervalle observé dans notre essai (600 à 800 épis/m²). Concernant la fertilité des épis, la plupart des valeurs rapportées par Slafer *et al.* (2022) se situent entre 20 et 60 grains/épi, ce qui concorde avec nos résultats (20 à 40 grains/épi).

Les corrélations fortes entre la variable rendement et la fertilité des épis ainsi que la densité de grains confirment l'importance de ces deux variables dans l'élaboration du rendement. Cela s'observe dans les résultats obtenus. En effet, la modalité 8 est celle qui possède la meilleure fertilité des épis et le 2^e plus haut rendement. A l'inverse, la modalité 10 a le rendement le plus élevé et occupe la deuxième place pour la fertilité des épis.

7.2. Protéines

Les teneurs en protéines des modalités sont assez similaires à l'exception de la modalité 1 dont la teneur est de 10,9%. Les 11 autres modalités ont des taux de protéines supérieurs à 13,95%. Ces valeurs concordent avec les teneurs en protéines observés en Italie sur le blé dur par Garrido-Lestache *et al.* (2005). Les modalités fertilisées ont donc toutes un taux de protéines supérieur à 13,5%, la norme exigée par les industriels pour le blé dur. Les modalités 3, 4 et 9 ont reçu un apport d'azote

supplémentaire de 40 unités à l'épiaison dont l'objectif était d'améliorer la teneur protéique des grains. Malgré des teneurs élevées, il n'y a pas de différences marquées par rapport aux modalités fertilisées sans ce complément à l'épiaison. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette faible variabilité entre les modalités. D'une part, les écarts d'apport total d'azote sont relativement faibles entre les modalités avec entre 180 et 240 unités. Ces niveaux étant déjà élevés, ils pourraient atténuer les effets d'un apport complémentaire à l'épiaison. D'autre part, les précipitations limitées, notamment au mois de mai, ont retardé l'assimilation de l'azote dans le sol. Cela a également pu entraîner des pertes par lessivage ou volatilisation. Cette libération tardive de l'azote dans le sol a potentiellement eu lieu à un stade trop avancé où la plante ne pouvait plus l'utiliser efficacement pour la formation des grains. Ainsi, celui-ci a été redirigé vers la synthèse de protéines au détriment du rendement. Cela suggère qu'à partir d'un certain niveau de fertilisation, la teneur en protéines tend à se stabiliser, du moins dans ce contexte climatique.

7.3. Indice de surface foliaire (LAI)

De manière générale, les résultats observés sont dans le même intervalle que les LAI observés en blé de printemps et en froment selon Kulig *et al.* (2010) et Serrano *et al.* (2000).

En début de cycle, il n'y a pas de différence significative entre les modalités 1,2 et 12 pour les indices de surface foliaire. Les différences apparaissent au stade 39. L'absence de différence au stade 30 et 32 peut être due à la date des premiers apports. Les deux premières fractions sont apportées au stade 29 et 32 mais ne sont pas directement assimilées par la plante ce qui expliquerait l'absence de différence jusqu'au stade 32 entre les 3 modalités. Par la suite, au stade 39 et 65, la modalité 1 est significativement différente pour la plupart des LAI dû à sa non-fertilisation et donc des valeurs inférieures. Au stade 39, la modalité 2 a des valeurs plus importantes sans que les différences avec la 12 soient forcément significatives. Au stade 65, c'est l'inverse. Cela peut s'expliquer par les fractionnements de ces deux modalités. La modalité 2 est fertilisée plus abondamment en début de cycle (70-0-40-70-0) tandis que la 12 est mieux fertilisée en fin de cycle (40-0-70-70-0). Elles ont toutefois le même apport total ce qui pourrait expliquer l'homogénéité des valeurs en fin de cycle et la légère amélioration de la modalité 12.

7.4. Biomasses

Durant la saison, les biomasses étaient similaires pour les tiges et les feuilles de tous les objets. Seules les biomasses d'épis au stade 87 présentent des différences significatives. Les résultats obtenus sont dans la gamme observée en froment d'après Serrano *et al.* (2000). Il semblerait qu'il n'y ait pas eu d'impact de la fertilisation sur le développement des tiges et des feuilles des plantes durant le cycle. En revanche, finalement, il y a bien une différence dans la biomasse des épis ce qui est logique et concorde avec les résultats observés pour les rendements. Ces différences seront donc discutées dans la partie abordant le rendement. Pour les biomasses au stade 30, il est logique qu'il n'y ait pas de différence puisque les mesures ont été réalisées

quelques jours après le premier fractionnement d'azote, avant que celui-ci ne soit pleinement assimilé. Par la suite, la modalité non-fertilisée a réussi à se développer assez similairement aux autres malgré un léger retard. D'une part, les reliquats azotés dans le sol étaient peut-être suffisants pour permettre le bon développement de la plante. De plus, celle-ci a pu compenser le manque d'azote par un meilleur prélèvement des ressources dû à la privation en début de cycle (Tian *et al.*, 2019). D'autre part, il est possible que la plante ait compensé par un développement racinaire accru ce qui lui a permis une meilleure exploration du profil de sol et un prélèvement plus efficace de l'azote disponible.

7.5. Catégories d'épis

La décomposition du rendement et de ses composantes par catégorie apporte des informations cruciales pour comprendre l'impact de la fertilisation azotée sur la culture du blé dur. Tout d'abord, malgré une densité totale d'épis équivalente pour l'ensemble des objets, les densités de grands épis, de petits épis et de tardillons présentent des différences significatives entre certaines modalités. La densité totale est similaire, mais les proportions entre les catégories ne le sont pas. Comme dit plutôt, il semble que l'azote n'ait pas été limitant pour le développement des épis, en revanche, il a impacté la fertilité des épis. La modalité non fertilisée n'a pas pu optimiser son rendement à partir du nombre d'épis fixés car ceux-ci comptaient moins de grains. Cela entraîne logiquement des différences dans les densités de grains par catégorie.

Ensuite, aucune différence n'est observée au sein d'une même catégorie pour la fertilité des épis et le poids de mille grains (PMG). Cette stabilité suggère que chaque catégorie conserve les mêmes caractéristiques pour ces deux variables indépendamment des modalités. En revanche, il existe bien des différences de fertilité et de PMG entre les différentes catégories. Ce point renforce la confiance attribuée à la méthode de catégorisation utilisée. Le PMG total et la fertilité totale sont, cependant, significativement différentes entre certains objets. Cela s'explique par la différence de densité d'épis par catégorie entre les objets et les différences de PMG et de fertilité entre les catégories. Par exemple, la modalité 1 a une fertilité plus faible car elle a proportionnellement plus de petits épis et que ces derniers ont une fertilité plus basse que les autres catégories.

Enfin, les rendements estimés par catégorie sont significativement différents pour les grands et les moyens épis. A nouveau, cela peut s'expliquer par la différence de densité de grains et d'épis de ces catégories entre les modalités.

8. Conclusion et perspectives

Pour conclure, les modalités fertilisées ont toutes atteint un niveau de rendement élevé. De plus, la teneur en protéines des grains pour ces onze modalités rentre largement dans les normes requises pour l'industrie alimentaire. Il est donc difficile de conseiller un fractionnement en particulier. Toutefois, dans les conditions rencontrées, il serait plus rentable d'opter pour un schéma de fertilisation à 180 unités d'azote puisque les modalités concernées (2, 6, 11 et 12) ont obtenu des résultats similaires aux modalités plus lourdement fertilisées.

Globalement, les résultats illustrent le rôle important que joue la fertilisation azotée dans la productivité du blé dur, en particulier via son effet favorable à la densité de grands épis et à la densité de grains. La modalité 1, non fertilisée, se distingue nettement par des performances inférieures sur les deux critères cités ci-dessus. Les autres modalités, fertilisées entre 180 et 240 unités/ha, présentent des écarts plus faibles, voire inexistantes, entre eux. Cela suggère un niveau de fertilisation déjà élevé pour celles-ci. L'absence de modalités avec des niveaux de fertilisations intermédiaires rend difficile l'interprétation du rendement et de ses composantes. Le manque d'information ne permet pas de déterminer si la réponse à la fertilisation est linéaire entre 0 et 180 unités ou si un plateau a déjà été atteint avant ce seuil.

Concernant le contexte climatique, le printemps chaud et sec a fortement influencé la saison. Premièrement, les maladies ont été quasi inexistantes durant tout le cycle de la culture. Dans une année humide, il aurait été intéressant d'étudier l'impact des hauts niveaux de fertilisation sur les maladies nitrophiles et leur impact sur les rendements finaux. D'autre part, l'absorption de l'azote n'a pas toujours eu lieu dans les meilleures conditions à cause des faibles pluies. Dans certains cas, il a fallu un délai de plusieurs jours, voire semaines, entre l'apport au champ et l'assimilation. Cela a pu réduire le niveau d'efficacité de certains apports notamment dû à des pertes par volatilisation. Ces observations mettent en avant l'importance de raisonner la fertilisation azotée non seulement sur base de la dose totale, mais également en fonction des conditions climatiques rencontrées. Dans ce contexte, le fait que des apports allant jusqu'à 240 unités/ha n'aient pas donné de meilleurs résultats que ceux de 180 unités constitue un enjeu majeur, tant pour la réduction des coûts de production que pour limiter l'impact environnemental de la culture.

En plus de l'étude de schéma de fertilisation à plus faible dose, une analyse individuelle des épis, plante par plante, pourrait fournir des informations supplémentaires sur la répartition des épis. Contrairement au maître-brin, produisant généralement des grands épis d'après nos observations, les épis secondaires et tertiaires présentent une grande variabilité en fertilité. L'analyse de la fertilité entre les épis appartenant à une même plante permettrait de préciser l'impact du tallage et des apports associés à ce stade sur la taille des épis et donc, in fine, sur la productivité de la culture.

9. Bibliographie

Abrha, B., Delbecque, N., Raes, D., et al. (2012). Sowing strategies for barley (*Hordeum vulgare L.*) based on modelled yield response to water with AquaCrop. *Experimental Agriculture*, **48**(2), 252-271. doi:10.1017/S0014479711001190

Arduini, I., Pellegrino, E., & Ercoli, L. (2018). Contribution of main culm and tillers to grain yield of durum wheat : Influence of sowing date and plant traits. *Italian Journal of Agronomy*, **13**(3), 1115. DOI:10.4081/ija.2018.1115

Arvalis, (2017). *Blé dur - Guide de culture*, Arvalis, Institut du végétal, Paris. https://www.arvalis.fr/sites/default/files/edition_summary/3538_2sommaire6405178012150895829_0.pdf, (08/05/2025).

Arvalis, (2021). *Guide de culture du blé dur en région Centre et Île-de-France*, Arvalis, Institut du végétal, Paris. https://www.arvalis.fr/sites/default/files/imported_files/guide_bd_def_v7601360707431890010.pdf, (08/05/2025).

Arvalis, (2024a). *Blé dur : les dates et densités de semis recommandées selon les variétés*. ARVALIS. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/ble-dur-des-rythmes-de-developpement-differents-selon-la-variete>, (12/03/2025).

Arvalis, (2024b). *Stratégie « fongicides » sur blé dur : nos préconisations pour le Centre et l'Île-de-France*. Arvalis. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/ble-dur-strategie-fongicides-centre-ile-de-france>, (05/06/2025).

Arvalis, (2024c). *Comment protéger le blé dur contre les maladies ?*. Arvalis. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/protection-du-ble-dur-contre-les-maladies#:~:text=Le%20choix%20de%20la%20rotation,risque%20de%20d%C3%A9veloppement%20des%20maladies>, (05/06/2025).

Arvalis, (2024d). *Blé dur : les dates et densités de semis recommandées selon les variétés*. Arvalis. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/ble-dur-des-rythmes-de-developpement-differents-selon-la-variete>, (05/06/2025).

Arvalis, (2019). *Choix variétal : nos préconisations*, Arvalis, Institut du végétal, Paris. https://www.arvalis.fr/sites/default/files/imported_files/guide_precio_bd_centre_idf_2019_2020_varietes6839591858240734659.pdf, (05/06/2025).

Arvalis, (2024e). *Choix variétal en blé dur : tenir compte de la qualité technologique et sanitaire*. Arvalis. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/choix-varietal-en-ble-dur-tenir-compte-de-la-qualite-technologique-et-sanitaire>, (05/06/2025).

Arvalis, (2024f). *Blé dur : comment se comportent les variétés face aux maladies en région Méditerranée ?*, Arvalis. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/ble-dur-comment-se-comportent-les-varieties-face-aux-maladies-en-region>, (05/06/2025).

Arvalis, (SDa). *Les fiches accidents – Céréales à paille – Rouille jaune*. Arvalis. https://fiches.arvalis-infos.fr/fiche_accident/fiches_accidents.php?mode=fa&type_cul=1&type_acc=4&id_a_cc=48, (05/06/2025).

Arvalis, (SDb). *Les fiches accidents – Céréales à paille – Oïdium*. Arvalis. https://fiches.arvalis-infos.fr/fiche_accident/fiches_accidents.php?mode=fa&type_cul=1&type_acc=4&id_a_cc=45-infos.fr, (05/06/2025).

Arvalis, (SDc). *Les fiches accidents – Céréales à paille – Fusariose de l'épi*. Arvalis. https://fiches.arvalis-infos.fr/fiche_accident/fiches_accidents.php?mode=fa&type_cul=1&type_acc=4&id_a_cc=51, (05/06/2025).

Arvalis, (SDd). *Fiches variétés – Anvergur*. Arvalis. https://fiches.arvalis-infos.fr/fiche_variete/fiches_varietes.php?mode=fv&id_espece=034&id_variete=8956, (16/06/2025).

Arvalis, (2023). *Désherbage du blé dur : des leviers agronomiques aux programmes herbicides*. Arvalis. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/desherbage-ble-dur-leviers-agronomiques-et-programmes-herbicides>, (16/06/2025).

Bates D., Maechler M., Bolker B. & Walker S. (2025). lme4 : Linear Mixed-Effects Models using ‘Eigen’ and S4. R package version 1.1-37. <https://cran.r-project.org/web/packages/lme4/index.html>.

Ben-Amar A., Mahboub S., Bouizgaren A., Mouradi M., Nsarellah N.E. & Bouhmadi K.E., (2020). Relationship between leaf rolling and some physiological parameters in durum wheat under water stress. AJAR, 16(7), 1061–1068, DOI:[10.5897/AJAR2020.14939](https://doi.org/10.5897/AJAR2020.14939).

Beres B.L., Rahmani E., Clarke J.M., Grassini P., Pozniak C.J., Geddes C.M., Porker K.D., May W.E. & Ransom J.K., (2020). A Systematic Review of Durum Wheat: Enhancing Production Systems by Exploring Genotype, Environment, and Management (G × E × M) Synergies. *Frontiers Plant Sciences*, 11, DOI:[10.3389/fpls.2020.568657](https://doi.org/10.3389/fpls.2020.568657).

Broccanello C., Bellin D., DalCorso G., Furini A. & Taranto F., (2023). Genetic approaches to exploit landraces for improvement of *Triticum turgidum* ssp. *durum* in the age of climate change. *Front. Plant Sci.* 14, DOI:[10.3389/fpls.2023.1101271](https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1101271).

Cavalet-Gorsa, E., González-Muñoz, A., Athiyannan, N., et al. (2024). Origin and evolution of the bread wheat D genome. *Nature*, 633, 848–855. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07808-z>

Ceglar A., Toreti A., Zampieri M. & Royo C., (2021). Global loss of climatically suitable areas for durum wheat growth in the future. *Environmental Research Letters*, **16**(10), 104049, DOI:[10.1088/1748-9326/ac2d68](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2d68).

Centre wallon de Recherches Agronomiques, (2023a). *Le blé dur, une opportunité dans la diversification de nos grandes cultures.* <https://www.cra.wallonie.be/uploads/2023/10/2023-ble-dur-une-opportunité.pdf>, (05/05/2025).

Centre wallon de Recherches Agronomiques, (2023b). *Poster : Le blé dur.* <https://www.cra.wallonie.be/uploads/2023/06/poster-ble-dur.pdf>, (05/05/2025).

Chaparro-Encinas L.A., Santoyo G., Peña-Cabriales J.J., Castro-Espinoza L., Parra-Cota F.I. & Santos-Villalobos S. de los, (2021). Transcriptional Regulation of Metabolic and Cellular Processes in Durum Wheat (*Triticum turgidum* subsp. *durum*) in the Face of Temperature Increasing. *Plants*, **10**(12), 2792, DOI:[10.3390/plants10122792](https://doi.org/10.3390/plants10122792).

Climat.be, (2025a). *Changements observés.* Klimaat | Climat. <https://climat.be/en-belgique/climat-et-emissions/changements-observees>, (12/03/2025).

Climat.be, (2025b). *Conséquences sur l'agriculture et la pêche.* Klimaat | Climat. <https://climat.be/en-belgique/climat-et-emissions/consequences/agriculture-et-peche>, (12/03/2025).

Colecchia S.A., De Vita P. & Rinaldi M., (2015). Effects of Tillage Systems in Durum Wheat under Rainfed Mediterranean Conditions. *Cereal Research Communications*, **43**(4), 704–716, DOI:[10.1556/0806.43.2015.015](https://doi.org/10.1556/0806.43.2015.015).

Corteva, (ND). Fiche produit – BlueN. <https://www.corteva.be/fr/products/cultures-autorisees/UtrishaN-BlueN.html>, (31/07/2025).

De Vita P. & Taranto F., (2019). Durum Wheat (*Triticum turgidum* ssp. *durum*) Breeding to Meet the Challenge of Climate Change. In: Al-Khayri, J.M., Jain, S.M., Johnson, D.V. eds. *Advances in Plant Breeding Strategies : Cereals: Volume 5*. Cham: Springer International Publishing, 471–524.

De Vita P., Di Paolo E., Fecondo G., Di Fonzo N. & Pisante M., (2007). No-tillage and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in southern Italy. *Soil and Tillage Research*, **92**(1), 69–78, DOI:[10.1016/j.still.2006.01.012](https://doi.org/10.1016/j.still.2006.01.012).

Dexter J.E., Marchylo B.A., Clear R.M. & Clarke J.M., (1997). Effect of Fusarium Head Blight on Semolina Milling and Pasta-Making Quality of Durum Wheat. *Cereal Chemistry*, **74**(5), 519–525, DOI:[10.1094/CCHEM.1997.74.5.519](https://doi.org/10.1094/CCHEM.1997.74.5.519).

Ehdaie, B., & Waines, J. G. (2001). Sowing date and nitrogen rate effects on dry matter and nitrogen partitioning in bread and durum wheat. *Field Crops Research*, **73**(1), 47–61. doi:10.1016/S0378-4290(01)00181-2

Elhani, S., Martos, V., Rharrabti, Y., Royo, C., & García del Moral, L. F. (2007). Contribution of main stem and tillers to durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) grain yield and its components grown in Mediterranean environments. *Field Crops Research*, **103**(1), 25–35. doi:10.1016/j.fcr.2007.05.008

Elvira Garrido-Lestache, R. J. López-Bellido, & L. López-Bellido (2005). Durum wheat quality under Mediterranean conditions as affected by N rate, timing and splitting, N form and S fertilization. *European Journal of Agronomy*, **23**(3), 265-278. doi:10.1016/j.eja.2004.12.001

Ercoli L., Masoni A., Mariotti M., Pampana S., Pellegrino E. & Arduini I., (2017). Effect of preceding crop on the agronomic and economic performance of durum wheat in the transition from conventional to reduced tillage. *European Journal of Agronomy*, **82**, 125–133, DOI:[10.1016/j.eja.2016.10.010](https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.10.010).

European Commission, (2025). Cereals statistics. https://agriculture.ec.europa.eu/data-and-analysis/markets/overviews/market-observatories/crops/cereals-statistics_en, (12/03/2025).

Eurostat, (2025). *Exportations et importations de céréales* (Eurostat/COMEXT). https://agriculture.ec.europa.eu/data-and-analysis/markets/overviews/market-observatories/crops/cereals-statistics_fr#trade. (20/05/2025)

Evans L.T. & Fischer R.A., (1999). Yield Potential: Its Definition, Measurement, and Significance. *Crop Science*, **39**(6), 1544–1551, DOI:[10.2135/cropsci1999.3961544x](https://doi.org/10.2135/cropsci1999.3961544x).

FAO, (2025). *Land & Water – Wheat*, <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/wheat/en/>, (03/06/2025).

Fox J. & Weisberg S. (2024). Car : Companion to Applied Regression. R package version 3.1-3. <https://cran.r-project.org/web/packages/car/index.html>.

Gobin, A. (2010). Modelling climate impacts on crop yields in Belgium. *Climate Research*, **44**(1), 55–68. DOI:10.3354/cr00925.

Graves S., Piepho H-P. & Selzer L. (2024). multcompView: Visualizations of Paired Comparisons. R package version 0.1-10. <https://cran.r-project.org/web/packages/multcompView/index.html>.

Grosse-Heilmann M., Cristiano E., Deidda R. & Viola F., (2024). Durum wheat productivity today and tomorrow: A review of influencing factors and climate change effects. *Resources, Environment and Sustainability*, **17**, 100170, DOI:[10.1016/j.resenv.2024.100170](https://doi.org/10.1016/j.resenv.2024.100170).

Guillaume, S., Bruzeau, C., Justes, E., Lacroix, B., & Bergez, J.-E. (2016). A conceptual model of farmers' decision-making process for nitrogen fertilization and irrigation of durum wheat. *European Journal of Agronomy*, **73**, 133–143. doi:10.1016/j.eja.2015.11.012

Haile J.K., N'Diaye A., Walkowiak S., Nilsen K.T., Clarke J.M., Kutcher H.R., Steiner B., Buerstmayr H. & Pozniak C.J., (2019). Fusarium Head Blight in Durum Wheat: Recent Status, Breeding Directions, and Future Research Prospects. *Phytopathology®* **109**(10), 1664–1675, DOI:[10.1094/PHYTO-03-19-0095-RVW](https://doi.org/10.1094/PHYTO-03-19-0095-RVW).

Hansen, J., Sato, M., & Ruedy, R. (2012). Perception of climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **109**(37), E2415–E2423. <https://doi.org/10.1073/pnas.1205276109>.

Hartig F. (2024). DHARMa : Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level/Mixed) Regression Models. R package version 0.4.7 <https://cran.r-project.org/web/packages/DHARMA/index.html>.

Horikoshi M., Tang Y., Dickey A., Grenié M., Thompson R., Selzer L., Strbenac D., Voronin K. & Pulatov D. (2024). ggfortify: Data Visualization Tools for Statistical Analysis Results. R package version 0.4.17. <https://cran.r-project.org/web/packages/ggfortify/index.html>.

Houria C., (2012). Decadal Evaluation of Durum Wheat Water Requirements to Improve Rainfed Agriculture Under Semi-Arid Conditions. *Energy Procedia*, Terragreen 2012: Clean Energy Solutions for Sustainable Environment, **18**, 896–904, DOI:[10.1016/j.egypro.2012.05.104](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.104).

Ierna, A., Lombardo, G. M., & Mauromicale, G. (2016). Yield, nitrogen use efficiency and grain quality in durum wheat as affected by nitrogen fertilization under a Mediterranean environment. *Experimental Agriculture*, **52**(2), 314–329. doi:10.1017/S0014479715000113

IRM, (2025). Le climat à l'horizon 2100. KMI. <https://www.meteo.be/fr/climat/changement-climatique-en-belgique/le-climat-a-lhorizon-2100>, (05/05/2025).

IRM, (2025). Atlas climatique. KMI. <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/atlas-climatique/cartes-climatiques/precipitations/quantites-de-precipitations/annuel>, (12/03/2025).

Khadka K., Earl H.J., Raizada M.N. & Navabi A., (2020). A Physio-Morphological Trait-Based Approach for Breeding Drought Tolerant Wheat. *Frontiers Plant Sciences*, **11**, DOI:[10.3389/fpls.2020.00715](https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00715).

Kulig, B., A. Lepiarczyk, A. Oleksy, and M. Kolodziejczyk. (2010). The effect of tillage system and forecrop on the yield and values of LAI and SPAD indices of spring wheat. *Eur. J. Agron.* **33**: 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.02.005>

Kuznetsova A., Bruun P., Haubo R. & Podenphant S. (2020). lmerTest : Test in Linear Mixed Effects Models. R package version 3.1-3. <https://cran.r-project.org/web/packages/lmerTest/index.html>.

Lenoir Arthur, (2024). Opportunité des outils numériques pour optimiser la fertilisation azotée à l'échelle d'un territoire. Thèse de doctorat. Université de Lille; Université de Liège.

Lenth, R.V. (2025). Emmeans : Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R package version 1.11.2 <https://cran.r-project.org/web/packages/emmeans/index.html>.

Livre Blanc Céréales, (2017). *Choisir sa modalité d'application*. <https://livre-blanc-cereales.be/thematiques/fumures/froment/choisir-sa-modalite-dapplication/>, (5/05/2025).

Livre Blanc Céréales, (NDa). *Choix variétal*. <https://livre-blanc-cereales.be/thematiques/variety/>, (05/06/2025).

Livre Blanc Céréales, (NDb). *Fumures*. <https://livre-blanc-cereales.be/thematiques/fumures/>, (05/05/2025).

Livre Blanc Céréales, (NDc). *Densité de semis*. <https://livre-blanc-cereales.be/thematiques/semis/densite-de-semis/>, (05/06/2025).

Livre Blanc Céréales, (2023). *Variétés en blé dur*. <https://livre-blanc-cereales.be/wp-content/uploads/2023/10/2023-09-II.7-Choix-varietal-Ble-dur.pdf>, (05/06/2025).

Livre Blanc Céréales, (2024). *Variétés en blé dur*. <https://livre-blanc-cereales.be/wp-content/uploads/2024/12/2.F-Choix-varietal-Ble-dur-couleur-1.pdf>, (03/06/2025).

Livre Blanc Céréales, (2025). *Premiers résultats en fertilisation azotée pour le blé dur*. <https://livre-blanc-cereales.be/wp-content/uploads/2025/02/5.-2025-LBFevrier-perspectives-Ferti-Ble-dur.pdf>, (05/05/2025).

López-Bellido, L., Fuentes, M., Castillo, J. E., López-Garrido, F. J., & Fernández, E. J. (1996). Long-term tillage, crop rotation, and nitrogen fertilizer effects on wheat yield under rainfed Mediterranean conditions. *Agronomy Journal*, **88**(5), 783–791. doi:10.2134/agronj1996.00021962008800050016x

Mendiburu F. (2023) agricolae : Statistical Procedures for Agricultural Research. R package version 1.3-7 <https://cran.r-project.org/web/packages/agricolae/index.html>.

Martínez-Moreno F., Ammar K. & Solís I., (2022). Global Changes in Cultivated Area and Breeding Activities of Durum Wheat from 1800 to Date : A Historical Review. *Agronomy*, **12**(5), 1135, DOI:[10.3390/agronomy12051135](https://doi.org/10.3390/agronomy12051135).

Masoni A., Ercoli L., Mariotti M. & Arduini I., (2007). Post-anthesis accumulation and remobilization of dry matter, nitrogen and phosphorus in durum wheat as affected by soil type. *European Journal of Agronomy*, **26**(3), 179–186, DOI:[10.1016/j.eja.2006.09.006](https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.09.006).

Meza, R., Van Der Verren, B., Crevits, C., Eylenbosch, D., Faux, A. M., Godin, B., Demoitié, C., Vermeulen, P., & Dumont, B. (2025). *Perspectives – Premiers résultats en fertilisation azotée pour le blé dur*. Présentation du Livre blanc, février 2025.

Nair, K. P. (2019). Utilizing Crop Wild Relatives to Combat Global Warming (1st ed.). Amsterdam : Elsevier Inc. doi:10.1016/bs.agron.2018.09.001

Rharrabti, Y., Elhani, S., Martos-Núñez, V., & García del Moral, L. F. (2001a). Protein and lysine content, grain yield, and other technological traits in durum wheat under Mediterranean conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **49**(8), 3802–3807. doi:10.1021/jf001139w

Rharrabti, Y., Villegas, D., García del Moral, L. F., Aparicio, N., Elhani, S., & Royo, C. (2001b). Environmental and genetic determination of protein content and grain yield in durum wheat under Mediterranean conditions. *Plant Breeding*, **120**(5), 381–388. doi:10.1046/j.1439-0523.2001.00628.x

Schloerke B., Cook D., Larmarange J., Briatte F., Marbach M., Thoen E., Elberg A., Toomet O., Crowley J., Hofmann H. & Wickham H. (2024). GGally : Extension of ‘ggplot2’. R package version 2.2.1. <https://cran.r-project.org/web/packages/GGally/index.html>.

Semences de France, (ND). *Fiche technique – Anvergur*. <https://www.semencesdefrance.com/produits/anvergur/>, (16/06/2025).

Serrano, L., Filella, I., & Penuelas, J. (2000). Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. *Crop Science*, **40**(3), 723–731. <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.403723x>

Shewry, P. R. (2009). Wheat. *Journal of Experimental Botany*, **60**(6), 1537–1553. doi:10.1093/jxb/erp058

Sissons, M. (2008). Role of durum wheat composition on the pasta-making qualities. *Food*, **2**(2), 75-90. Global Science Books.

Slafer, G. A., García, G. A., Serrago, R. A., & Miralles, D. J. (2022). Physiological drivers of responses of grains per m² to environmental and genetic factors in wheat. *Field Crops Research*, 285, 108593. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108593>

Stott, P. (2016). How climate change affects extreme weather events. *Science*, **352**, 1517-1518. doi:10.1126/science.aaf7271

Terres Inovia, (2023). *Allonger les rotations et diversifier les systèmes de culture*. <https://www.terresinovia.fr/-/allonger-les-rotations-et-diversifier-les-systemes-de-culture>, (12/03/2025).

Tian, Z., Liu, X., Yu, J., Gu, S., Zhang, L., Jiang, D., ... Dai, T. (2019). Early nitrogen deficiency favors high nitrogen recovery efficiency by improving deeper soil root growth

and reducing nitrogen loss in wheat. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(10), 1384–1398. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1671972>

Toscano, P., Ranieri, R., Matese, A., Vaccari, F. P., Gioli, B., Zaldei, A., Silvestri, M., Ronchi, C., La Cava, P., Porter, J. R., & Miglietta, F. (2012). Durum wheat modeling: The Delphi system, 11 years of observations in Italy. *European Journal of Agronomy*, 43, 108–118. doi:10.1016/j.eja.2012.06.003

Wickham H., François R., Henry L., Müller K., Vaughan D. (2023). dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version 1.1.4. <https://cran.r-project.org/web/packages/dplyr/index.html>.

Wickham H., Chang W., Henry L., Pedersen L.T., Takahashi K., Wilke C., Woo K., Yutani H., Dunnington D., Van den Brand T. (2025). ggplot2: Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics. R package version 3.5.2. <https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/index.html>.

Zhang H. & Oweis T., (1999). Water–yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 38(3), 195–211, DOI:[10.1016/S0378-3774\(98\)00069-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(98)00069-9).

10. Annexes

Annexe 1. Tableau récapitulatif des différentes modalités testées depuis 2020.

Annexe 2. Dispositif de l'essai fertilisation blé dur

133	1	Anvergur	233	1	Anvergur	333	3	Anvergur
134	2	Anvergur	234	2	Anvergur	334	10	Anvergur
135	3	Anvergur	235	3	Anvergur	335	6	Anvergur
136	4	Anvergur	236	4	Anvergur	336	1	Anvergur
137	5	Anvergur	237	5	Anvergur	337	7	Anvergur
138	6	Anvergur	238	6	Anvergur	338	11	Anvergur
139	7	Anvergur	239	7	Anvergur	339	4	Anvergur
140	8	Anvergur	240	8	Anvergur	340	9	Anvergur
141	9	Anvergur	241	9	Anvergur	341	2	Anvergur
142	10	Anvergur	242	10	Anvergur	342	12	Anvergur
143	11	Anvergur	243	11	Anvergur	343	8	Anvergur
144	12	Anvergur	244	12	Anvergur	344	5	Anvergur
145	6	Anvergur	245	6	Anvergur	345	4	Anvergur
146	5	Anvergur	246	5	Anvergur	346	7	Anvergur
147	4	Anvergur	247	4	Anvergur	347	1	Anvergur
148	3	Anvergur	248	3	Anvergur	348	12	Anvergur
149	9	Anvergur	249	9	Anvergur	349	6	Anvergur
150	11	Anvergur	250	11	Anvergur	350	8	Anvergur
151	1	Anvergur	251	1	Anvergur	351	3	Anvergur
152	8	Anvergur	252	8	Anvergur	352	2	Anvergur
153	10	Anvergur	253	10	Anvergur	353	11	Anvergur
154	2	Anvergur	254	2	Anvergur	354	5	Anvergur
155	12	Anvergur	255	12	Anvergur	355	10	Anvergur
156	7	Anvergur	256	7	Anvergur	356	9	Anvergur

Légende

Répétition

R1 R3 R4

Parcelle de rendement

Parcelle de prélèvement

Annexe 3. Echelle BBCH céréales

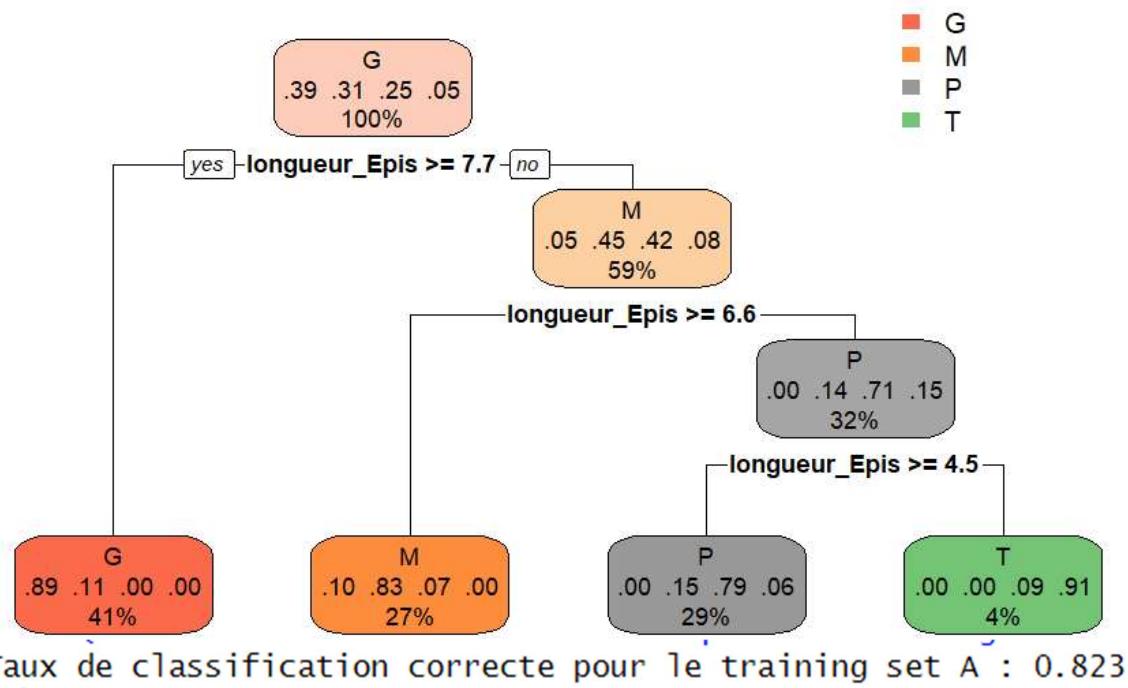
Stade principal 0	Germination, levée
00	Semence sèche (caryope sec)
01	Début de l'imbibition de la graine
03	Imbibition de la graine
05	La radicule sort de la graine
06	Élongation de la radicule, apparition des poils absorbants et développement des racines secondaire
07	Le coléoptile sort de la graine
09	Levée : le coléoptile perce la surface du sol
Stade principal 1	Développement des feuilles
10	La première feuille sort du coléoptile
11	Première feuille étalée
12	2 feuilles étalées
1.	Et ainsi de suite
19	9 ou davantage de feuilles étalées
Stade principal 2	Le tallage
20	Aucune talle visible
21	Début tallage : la première talle est visible
22	Deuxième talle visible
2.	Et ainsi de suite
29	Fin tallage
Stade principal 3	Élongation de la tige principale

	Début montaison : pseudo-tiges et talles dressées, début d'élongation du premier entre-nœud, inflorescence au plus à 1 cm au-dessus du plateau de tallage
30	Le premier nœud est au plus à 1 cm au-dessus du plateau de tallage
31	Le deuxième nœud est au plus à 2 cm au-dessus du premier nœud
32	Le troisième nœud est au plus à 2 cm au-dessus du deuxième nœud
33	Et ainsi de suite
37	La dernière feuille est juste visible, elle est encore enroulée sur elle-même
39	Le limbe de la dernière feuille est entièrement étalé, la ligule est visible
Stade principal 4	Gonflement de l'épi ou de la panicule, montaison
41	Début gonflement : élongation de la gaine foliaire de la dernière feuille
43	La gaine foliaire de la dernière feuille est visiblement gonflée
45	Gonflement maximal de la gaine foliaire de la dernière feuille
46	La gaine foliaire de la dernière feuille s'ouvre
49	Les premières arrêtes (barbes) sont visibles (pour les variétés aristées)
Stade principal 5	Sortie de l'inflorescence ou épiaison
51	Début de l'épiaison : l'extrémité de l'inflorescence est sortie de la gaine, l'épillet supérieur est visible
52	20 % de l'inflorescence est sortie
53	30 % de l'inflorescence est sortie
5.	Et ainsi de suite
59	Fin de l'épiaison, l'inflorescence est complètement sortie de la gaine

Stade principal 6	Floraison, anthèse
61	Début floraison, les premières anthères sont visibles
65	Pleine floraison, 50 % des anthères sont sorties
69	Fin floraison, tous les épillets ont fleuri, quelques anthères desséchées peuvent subsister
Stade principal 7	Développement des graines
71	Stade aqueux : les premières graines ont atteint la moitié de leur taille finale
73	Début du stade laiteux
75	Stade mi laiteux : contenu de la graine laiteux, les graines ont atteint leur taille finale mais sont toujours vertes
77	Fin du stade laiteux
Stade principal 8	Maturation des graines
83	Début du stade pâteux
85	Stade pâteux mou : contenu de la graine tendre mais sec, une empreinte faite avec l'ongle est réversible
87	Stade pâteux dur : contenu de la graine dur, une empreinte faite avec l'ongle est irréversible
89	Maturation complète : le caryopse est dur et difficile à couper en deux avec l'ongle
Stade principal 9	Sénescence
92	Sur-maturité : le caryopse est très dur, ne peut pas être marqué à l'ongle
93	Des graines se détachent
97	La plante meurt et s'affaisse
99	Produit après récolte

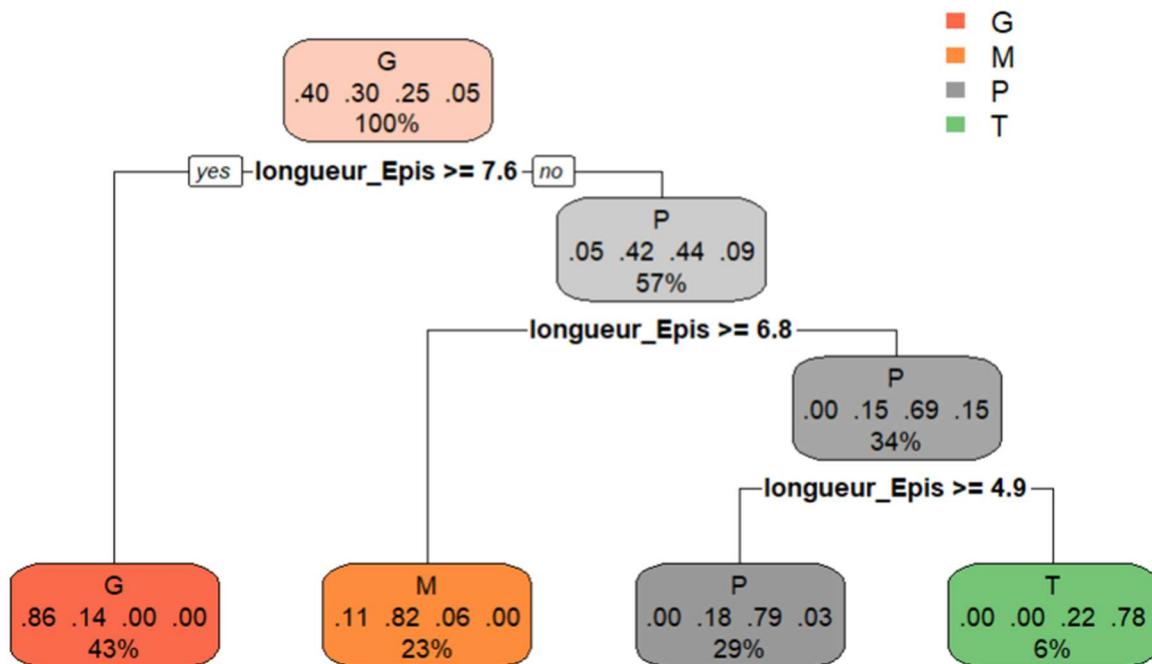
Annexe 4. Arbre de décision pour la catégorisation des épis

Arbre de décision (A) pour classer les épis



Arbre de décision sur le subset de données A.

Arbre de décision (B) pour classer les épis



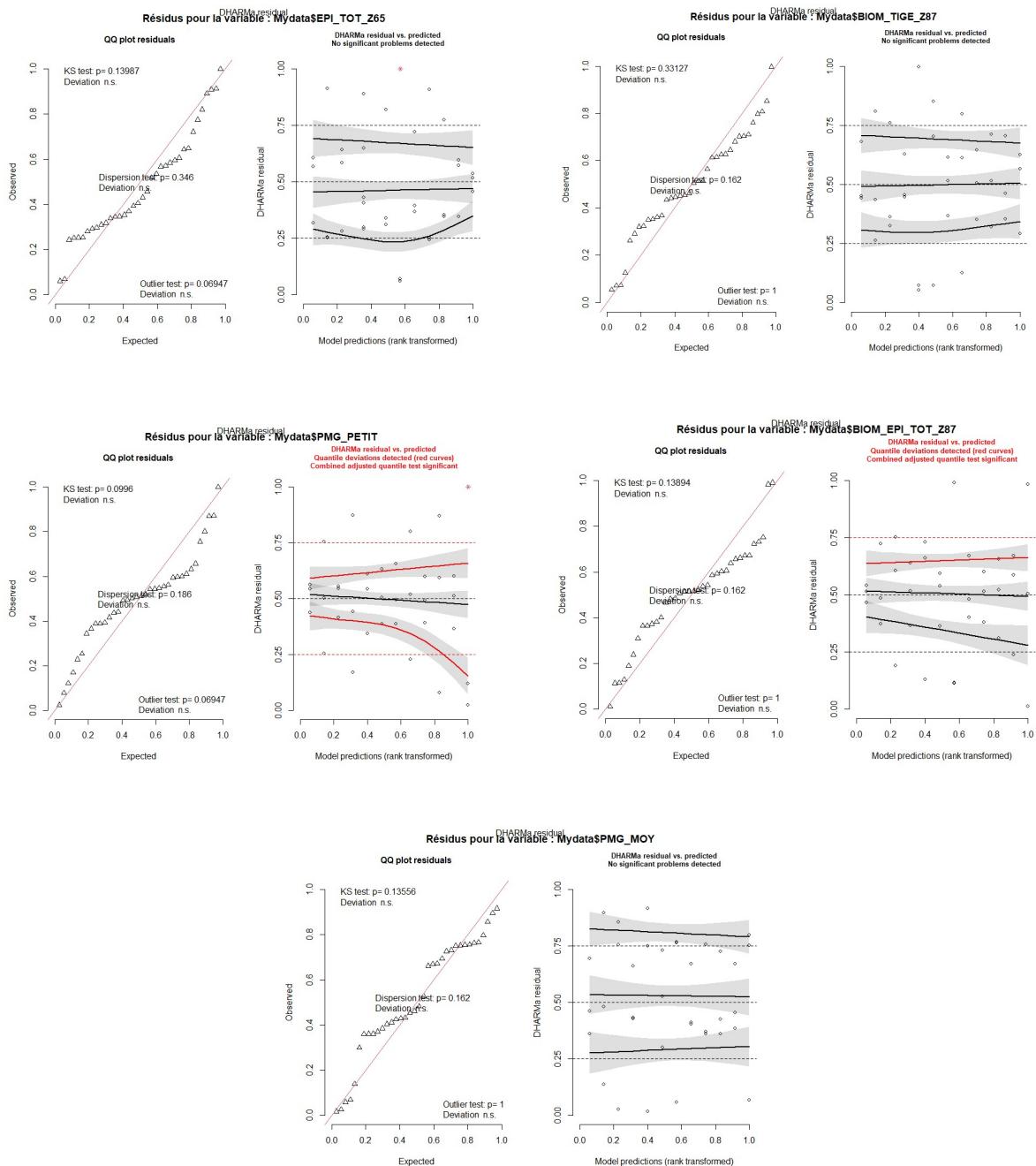
Arbre de décision sur le subset de données B.

Annexe 5. Résultats du test Anova et des tests de Shapiro-Wilk et Levene

	Variable_reponse	NumDF	DenDF	F_value	p_value	p_shapiro	p_levene
1	Rendement	11	2.200000e+01	5.035523e+01	5.349262e-13	3.501932e-01	0.99000588
2	Hum_Recolte	11	2.200000e+01	2.633224e+00	2.560531e-02	6.525082e-01	0.78169896
3	PHL	11	2.400000e+01	1.139159e+01	4.940306e-07	7.963346e-01	0.91594908
4	PROT	11	2.200000e+01	6.272634e+01	5.351297e-14	1.250742e-01	0.84209309
5	PHL_C15	11	2.199999e+01	1.017451e+01	2.807480e-06	8.735954e-01	0.80470647
6	PMG_C15	11	3.946424e-16	4.553618e+28	1.000000e+00	4.663566e-10	NaN
7	BIOM_TOT_Z30	11	2.200000e+01	9.946941e-01	4.806504e-01	4.385928e-01	0.95573027
8	LAI_FEUILLE_Z30	2	4.000000e+00	1.387239e+00	3.486328e-01	4.720491e-01	0.69407677
9	LAI_TIGE_Z30	2	4.000000e+00	2.129128e+00	2.346083e-01	2.090545e-01	0.79619729
10	TALLE_Z30	11	2.200000e+01	1.207026e+00	3.384762e-01	6.775600e-01	0.64608237
11	BIOM_FEUILLE_Z32	11	2.400000e+01	5.636825e-01	8.387517e-01	6.686523e-01	0.87255576
12	BIOM_TIGE_Z32	11	2.400000e+01	7.187109e-01	7.101211e-01	1.695635e-01	0.58582774
13	LAI_FEUILLE_Z32	2	3.999999e+00	4.627235e+00	9.107419e-02	5.686021e-01	0.78649223
14	LAI_TIGE_Z32	2	4.000000e+00	3.759857e+00	1.205692e-01	7.252676e-01	0.78188601
15	BIOM_FEUILLE_Z39	11	2.200000e+01	1.115448e+00	3.952552e-01	6.580610e-01	0.85165691
16	BIOM_TIGE_Z39	11	2.200000e+01	1.076115e+00	4.217814e-01	6.526151e-01	0.80727554
17	LAI_F1_Z39	2	6.000000e+00	7.252196e+00	2.505607e-02	8.644344e-01	0.33723487
18	LAI_F2_Z39	2	6.000000e+00	4.115463e+00	7.494699e-02	8.678596e-01	0.42105644
19	LAI_RESTE_Z39	2	6.000000e+00	6.475109e+00	3.174031e-02	5.997970e-01	0.57547650
20	LAI_FEUILLETOT_Z39	2	6.000000e+00	6.284979e+00	3.373036e-02	7.170770e-01	0.51909329
21	LAI_TIGE_Z39	2	6.000000e+00	2.735322e+00	1.431167e-01	7.848126e-01	0.27330390
22	BIOM_FEUILLE_Z65	11	2.400000e+01	1.191742e+00	3.433723e-01	6.466512e-01	0.98258638
23	BIOM_TIGE_Z65	11	2.400000e+01	1.354791e+00	2.561994e-01	8.811487e-02	0.99573122
24	BIOM_EPI_Z65	11	2.400000e+01	9.513382e-01	5.122912e-01	7.252999e-02	0.97059656
25	LAI_F1_Z65	2	4.000000e+00	3.249171e+01	3.362253e-03	6.118246e-01	0.60500448
26	LAI_F2_Z65	2	4.000000e+00	1.630968e+01	1.193160e-02	9.527313e-01	0.57159387
27	LAI_RESTE_Z65	2	4.000000e+00	2.718323e+01	4.696704e-03	9.772805e-01	0.36858634
28	LAI_FEUILLETOT_Z65	2	4.000000e+00	2.771101e+01	4.531323e-03	7.908138e-01	0.44783926
29	LAI_TIGE_Z65	2	4.000001e+00	9.547863e+01	4.209598e-04	9.533822e-01	0.83315609
30	EPI_TOT_Z65	11	2.200000e+01	2.851398e+00	1.752564e-02	1.404984e-02	0.93791047
31	GRAND_EPI_Z65	2	4.000001e+00	3.796612e+00	1.190451e-01	7.204820e-01	0.41122210
32	MOY_EPI_Z65	2	4.000000e+00	1.421053e+00	3.417751e-01	3.235505e-01	0.85928310
33	PETIT_EPI_Z65	2	6.000000e+00	9.642857e-01	4.333801e-01	4.179965e-01	0.49990602
34	TARDI_Z65	2	4.000000e+00	2.567742e+00	1.917153e-01	5.727713e-01	0.41183078
35	EPI_TOT_Z75	11	2.200000e+01	7.167107e-01	7.111249e-01	3.698120e-01	0.98602162
36	GRAND_EPI_Z75	11	2.200000e+01	8.065984e-01	6.336115e-01	6.252217e-01	0.62393473
37	MOY_EPI_Z75	11	2.200000e+01	1.619505e+00	1.616374e-01	3.942459e-01	0.76697245
38	PETIT_EPI_Z75	11	2.200000e+01	7.981494e-01	6.408590e-01	8.755029e-01	0.54781418
39	TARDI_Z75	11	2.200000e+01	1.087215e+00	4.141662e-01	4.422222e-01	0.78903783
40	EPI_TOT_SANS_TARDI	11	2.200000e+01	5.875496e-01	8.187349e-01	8.215692e-01	0.91587171
41	LG_EPI_Z75	11	2.200000e+01	2.015207e+01	5.473873e-09	9.746187e-01	0.96287962
42	EPILLET_Z75	11	2.200000e+01	6.558455e+00	9.568301e-05	2.149158e-01	0.99279491
43	NBR_GRAINS_Z75	11	2.200000e+01	8.854581e+00	8.998925e-06	7.936058e-01	0.88830329
44	DENS_GRAINS_Z75	11	2.400000e+01	4.122335e+00	1.804094e-03	5.938213e-01	0.68017487

45	BIOM_TIGE_Z87	11	2.400000e+01	4.937864e-01	8.886554e-01	2.719883e-03	0.80905285
46	BIOM_FEUILLE_Z87	11	2.400000e+01	1.409207e+00	2.317627e-01	2.129417e-01	0.98606949
47	BIOM_GRAND_EPI_Z87	11	2.400000e+01	2.531620e+00	2.767213e-02	1.362725e-03	0.50966366
48	BIOM_MOY_EPI_Z87	11	2.400000e+01	1.965675e+00	8.060536e-02	1.357714e-04	0.43308134
49	BIOM_PETIT_EPI_Z87	11	2.400000e+01	2.332348e+00	4.015894e-02	1.494516e-01	0.82973190
50	BIOM_TARDI_EPI_Z87	11	2.300000e+01	1.063602e+01	1.335144e-06	5.514508e-01	0.76533317
51	BIOM_EPI_TOT_Z87	11	2.400000e+01	3.256795e+00	7.532033e-03	3.003675e-03	0.53552433
52	RDMLT_GRAND	11	2.400000e+01	3.945312e+00	2.390168e-03	7.686220e-01	0.80163095
53	RDMLT_MOY	11	2.400000e+01	2.771160e+00	1.782529e-02	1.104624e-01	0.99444673
54	RDMLT_PETIT	11	2.400000e+01	2.023263e+00	7.220301e-02	2.786153e-01	0.79746104
55	NBR_GRAIN_GRAND	11	2.400000e+01	3.874948e+00	2.677060e-03	9.468282e-01	0.81071291
56	NBR_GRAIN_MOY	11	2.400000e+01	2.677408e+00	2.115028e-02	3.029464e-01	0.99393337
57	NBR_GRAIN_PETIT	11	2.400000e+01	2.906374e+00	1.396514e-02	2.724569e-01	0.74562527
58	GRAND_EPI_Z87	11	2.102307e+01	7.169033e+00	6.224320e-05	8.123941e-01	0.67701922
59	MOY_EPI_Z87	11	2.300000e+01	1.752692e+00	1.237199e-01	7.316269e-01	0.69666107
60	PETIT_EPI_Z87	11	2.300000e+01	7.601601e+00	2.368149e-05	5.552564e-01	0.52341138
61	TARDI_Z87	11	2.300000e+01	3.829849e+00	3.195662e-03	2.365072e-01	0.93937063
62	EPI_TOT_Z87	11	2.300000e+01	1.200065e+00	3.403956e-01	7.727961e-01	0.75233921
63	RDMLT_TOT	11	2.400000e+01	7.251210e+00	2.726727e-05	3.466158e-01	0.90260975
64	EPI_TOT_SANSTARDI_Z87	11	2.300000e+01	1.715797e+00	1.325936e-01	5.822763e-01	0.86805915
65	NBR_GRAIN_TOT_Z87	11	2.400000e+01	6.553889e+00	6.214487e-05	9.186204e-02	0.97582768
66	FERTI_GRAND	11	2.107636e+01	2.188584e+00	5.892297e-02	9.225424e-01	0.09304327
67	FERTI_MOY	11	2.300000e+01	9.271886e-01	5.324351e-01	5.256066e-01	0.72225190
68	FERTI_PETIT	11	2.094406e+01	1.507263e+00	2.016831e-01	4.042699e-01	0.61054140
69	FERTI_TOT	11	2.300000e+01	2.917063e+00	1.462535e-02	3.605887e-01	0.90838310
70	PMG_GRAND	11	2.200000e+01	1.318880e+00	2.784409e-01	9.903921e-01	0.97894392
71	PMG_MOY	11	2.400000e+01	1.527283e+00	1.858940e-01	3.819671e-02	0.90125095
72	PMG_PETIT	11	2.200000e+01	8.564521e-01	5.912974e-01	1.655494e-03	0.39565277
73	PMG_TOT	11	2.200000e+01	6.488454e+00	1.036836e-04	4.438460e-01	0.97421609
74	DENS_GRAND_Z87	11	2.400000e+01	3.874948e+00	2.677060e-03	9.468282e-01	0.81071291
75	DENS_MOY_Z87	11	2.400000e+01	2.677408e+00	2.115028e-02	3.029464e-01	0.99393337
76	DENS_PETIT_Z87	11	2.400000e+01	2.906374e+00	1.396514e-02	2.724569e-01	0.74562527
77	DENS_Z87	11	2.400000e+01	6.553889e+00	6.214487e-05	9.186204e-02	0.97582768

Annexe 6. Résultat du test DHARMA pour les variables donc le test de Shapiro rejete l'hypothèse de normalité.



Annexe 7. Moyennes et groupes emmeans des variables dont le test Anova était significatif.

Résultats emmeans pour : Rendement			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
1	Rendement	1	5.125000 a
12	Rendement	12	9.823333 b
6	Rendement	6	9.879333 b
4	Rendement	4	9.943000 b
11	Rendement	11	9.963667 b
7	Rendement	7	10.047667 b
2	Rendement	2	10.096000 b
3	Rendement	3	10.138667 b
5	Rendement	5	10.276000 b
9	Rendement	9	10.346000 b
8	Rendement	8	10.488333 b
10	Rendement	10	10.555333 b

Résultats emmeans pour : PROT			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
1	PROT	1	10.92667 a
2	PROT	2	13.95000 b
6	PROT	6	14.08000 bc
11	PROT	11	14.15667 bc
8	PROT	8	14.35000 bc
4	PROT	4	14.46000 bc
12	PROT	12	14.50333 bcd
10	PROT	10	14.53667 bcd
7	PROT	7	14.60333 bcd
9	PROT	9	14.61333 bcd
5	PROT	5	14.76000 cd
3	PROT	3	15.19667 d

Résultats emmeans pour : LAI_F1_Z39			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
1	LAI_F1_Z39	1	0.4497293 a
3	LAI_F1_Z39	12	0.7032010 ab
2	LAI_F1_Z39	2	0.9806227 b

Résultats emmeans pour : LAI_RESTE_Z39			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
1	LAI_RESTE_Z39	1	1.383117 a
3	LAI_RESTE_Z39	12	2.146193 ab
2	LAI_RESTE_Z39	2	2.947190 b

Résultats emmeans pour : LAI_F2_Z65			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
1	LAI_F2_Z65	1	0.47 a
2	LAI_F2_Z65	2	0.75 b
3	LAI_F2_Z65	12	0.87 b

Résultats emmeans pour : LAI_RESTE_Z65			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
1	LAI_RESTE_Z65	1	0.9466667 a
2	LAI_RESTE_Z65	2	1.7300000 b
3	LAI_RESTE_Z65	12	2.0666667 b

Résultats emmeans pour : LAI_FEUILLETOT_Z39			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
1	LAI_FEUILLETOT_Z39	1	2.352430 a
3	LAI_FEUILLETOT_Z39	12	3.514674 a
2	LAI_FEUILLETOT_Z39	2	4.873176 a

Résultats emmeans pour : LAI_F1_Z65			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
1	LAI_F1_Z65	1	0.4166667 a
2	LAI_F1_Z65	2	0.7700000 b
3	LAI_F1_Z65	12	0.9133333 b

Résultats emmeans pour : LAI_FEUILLETOT_Z65			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
1	LAI_FEUILLETOT_Z65	1	1.836667 a
2	LAI_FEUILLETOT_Z65	2	3.253333 b
3	LAI_FEUILLETOT_Z65	12	3.846667 b

Résultats emmeans pour : LAI_TIGE_Z65			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
1	LAI_TIGE_Z65	1	2.1666667 a
2	LAI_TIGE_Z65	2	3.4066667 b
3	LAI_TIGE_Z65	12	3.910000 c

```
=====
Résultats emmeans pour : EPI_TOT_Z65
Variable_reponse N_OBJ_25 emmean .group
11 EPI_TOT_Z65 11 480.0000 a
12 EPI_TOT_Z65 12 497.7778 ab
1 EPI_TOT_Z65 1 499.5556 ab
3 EPI_TOT_Z65 3 510.2222 ab
7 EPI_TOT_Z65 7 510.2222 ab
2 EPI_TOT_Z65 2 515.5556 ab
6 EPI_TOT_Z65 6 538.6667 ab
4 EPI_TOT_Z65 4 551.1111 ab
5 EPI_TOT_Z65 5 561.7778 ab
8 EPI_TOT_Z65 8 565.3333 ab
9 EPI_TOT_Z65 9 583.1111 ab
10 EPI_TOT_Z65 10 593.7778 b
=====
```

```
=====
Résultats emmeans pour : LG_EPI_Z75
Variable_reponse N_OBJ_25 emmean .group
1 LG_EPI_Z75 1 5.683333 a
12 LG_EPI_Z75 12 6.883333 b
6 LG_EPI_Z75 6 7.026667 b
2 LG_EPI_Z75 2 7.126667 bc
7 LG_EPI_Z75 7 7.196667 bc
4 LG_EPI_Z75 4 7.303333 bc
9 LG_EPI_Z75 9 7.340000 bc
5 LG_EPI_Z75 5 7.363333 bc
3 LG_EPI_Z75 3 7.376667 bc
11 LG_EPI_Z75 11 7.393333 bc
10 LG_EPI_Z75 10 7.420000 bc
8 LG_EPI_Z75 8 7.683333 c
=====
```

```
=====
Résultats emmeans pour : EPILLET_Z75
Variable_reponse N_OBJ_25 emmean .group
1 EPILLET_Z75 1 13.71000 a
6 EPILLET_Z75 6 15.91667 b
2 EPILLET_Z75 2 16.06667 b
12 EPILLET_Z75 12 16.08000 b
7 EPILLET_Z75 7 16.43333 b
11 EPILLET_Z75 11 16.44000 b
10 EPILLET_Z75 10 16.51000 b
3 EPILLET_Z75 3 16.67333 b
9 EPILLET_Z75 9 16.73333 b
5 EPILLET_Z75 5 16.82667 b
4 EPILLET_Z75 4 16.94333 b
8 EPILLET_Z75 8 17.45333 b
=====
```

```
=====
Résultats emmeans pour : NBR_GRAINS_Z75
Variable_reponse N_OBJ_25 emmean .group
1 NBR_GRAINS_Z75 1 23.93667 a
2 NBR_GRAINS_Z75 2 32.60667 b
6 NBR_GRAINS_Z75 6 34.21000 bc
12 NBR_GRAINS_Z75 12 34.47000 bc
4 NBR_GRAINS_Z75 4 35.80000 bc
9 NBR_GRAINS_Z75 9 35.95333 bc
11 NBR_GRAINS_Z75 11 36.03000 bc
3 NBR_GRAINS_Z75 3 37.06667 bc
5 NBR_GRAINS_Z75 5 37.09000 bc
7 NBR_GRAINS_Z75 7 37.54667 bc
10 NBR_GRAINS_Z75 10 37.69000 bc
8 NBR_GRAINS_Z75 8 39.79667 c
=====
```

```
=====
Résultats emmeans pour : DENS_GRAINS_Z75
Variable_reponse N_OBJ_25 emmean .group
1 DENS_GRAINS_Z75 1 15415.47 a
2 DENS_GRAINS_Z75 2 21761.97 ab
12 DENS_GRAINS_Z75 12 23198.26 ab
9 DENS_GRAINS_Z75 9 24268.29 b
11 DENS_GRAINS_Z75 11 24959.84 b
10 DENS_GRAINS_Z75 10 25144.20 b
3 DENS_GRAINS_Z75 3 25324.04 b
7 DENS_GRAINS_Z75 7 25900.15 b
6 DENS_GRAINS_Z75 6 25970.98 b
5 DENS_GRAINS_Z75 5 26399.05 b
8 DENS_GRAINS_Z75 8 27534.36 b
4 DENS_GRAINS_Z75 4 27614.37 b
=====
```

```
=====
Résultats emmeans pour : BIOM_GRAND_EPI_Z87
Variable_reponse N_OBJ_25 emmean .group
1 BIOM_GRAND_EPI_Z87 1 246.0622 a
4 BIOM_GRAND_EPI_Z87 4 746.7556 ab
12 BIOM_GRAND_EPI_Z87 12 763.6622 ab
5 BIOM_GRAND_EPI_Z87 5 794.6489 ab
2 BIOM_GRAND_EPI_Z87 2 811.0933 ab
10 BIOM_GRAND_EPI_Z87 10 815.5378 ab
11 BIOM_GRAND_EPI_Z87 11 830.7911 ab
3 BIOM_GRAND_EPI_Z87 3 863.5911 ab
9 BIOM_GRAND_EPI_Z87 9 904.8711 b
7 BIOM_GRAND_EPI_Z87 7 959.5200 b
8 BIOM_GRAND_EPI_Z87 8 986.3822 b
6 BIOM_GRAND_EPI_Z87 6 1028.8000 b
=====
```

Résultats emmeans pour : BIOM_PETIT_EPI_Z87			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
9	BIOM_PETIT_EPI_Z87	9	120.8889 a
8	BIOM_PETIT_EPI_Z87	8	139.0756 ab
5	BIOM_PETIT_EPI_Z87	5	141.2267 ab
6	BIOM_PETIT_EPI_Z87	6	163.0578 ab
7	BIOM_PETIT_EPI_Z87	7	172.1600 ab
12	BIOM_PETIT_EPI_Z87	12	184.2133 ab
2	BIOM_PETIT_EPI_Z87	2	196.6933 ab
10	BIOM_PETIT_EPI_Z87	10	203.6444 ab
3	BIOM_PETIT_EPI_Z87	3	203.6800 ab
4	BIOM_PETIT_EPI_Z87	4	205.3156 ab
11	BIOM_PETIT_EPI_Z87	11	223.4311 ab
1	BIOM_PETIT_EPI_Z87	1	277.9911 b

Résultats emmeans pour : BIOM_TARDI_EPI_Z87			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
5	BIOM_TARDI_EPI_Z87	5	16.30222 a
10	BIOM_TARDI_EPI_Z87	10	16.87111 a
2	BIOM_TARDI_EPI_Z87	2	21.29778 a
8	BIOM_TARDI_EPI_Z87	8	22.72000 a
9	BIOM_TARDI_EPI_Z87	9	23.23556 a
3	BIOM_TARDI_EPI_Z87	3	23.87556 a
6	BIOM_TARDI_EPI_Z87	6	24.80000 a
4	BIOM_TARDI_EPI_Z87	4	26.64889 a
12	BIOM_TARDI_EPI_Z87	12	27.76889 a
7	BIOM_TARDI_EPI_Z87	7	27.98222 a
11	BIOM_TARDI_EPI_Z87	11	28.56889 a
1	BIOM_TARDI_EPI_Z87	1	82.93333 b

Résultats emmeans pour : RDMT_MOY			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
1	RDMT_MOY	1	1221.689 a
10	RDMT_MOY	10	2302.222 ab
5	RDMT_MOY	5	2461.511 ab
8	RDMT_MOY	8	2486.578 ab
11	RDMT_MOY	11	2598.756 ab
6	RDMT_MOY	6	2646.222 ab
12	RDMT_MOY	12	2665.778 ab
2	RDMT_MOY	2	2728.178 ab
3	RDMT_MOY	3	2860.444 b
9	RDMT_MOY	9	2996.978 b
4	RDMT_MOY	4	3004.444 b
7	RDMT_MOY	7	3054.044 b

Résultats emmeans pour : BIOM_EPI_TOT_Z87			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
1	BIOM_EPI_TOT_Z87	1	776.6578 a
5	BIOM_EPI_TOT_Z87	5	1278.7378 ab
12	BIOM_EPI_TOT_Z87	12	1320.1244 ab
10	BIOM_EPI_TOT_Z87	10	1339.6267 ab
4	BIOM_EPI_TOT_Z87	4	1380.2133 ab
2	BIOM_EPI_TOT_Z87	2	1393.8133 b
11	BIOM_EPI_TOT_Z87	11	1415.6800 b
3	BIOM_EPI_TOT_Z87	3	1462.6489 b
8	BIOM_EPI_TOT_Z87	8	1471.7333 b
7	BIOM_EPI_TOT_Z87	7	1553.5644 b
6	BIOM_EPI_TOT_Z87	6	1563.6800 b
9	BIOM_EPI_TOT_Z87	9	1608.0533 b

Résultats emmeans pour : RDMT_GRAND			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
1	RDMT_GRAND	1	1849.600 a
11	RDMT_GRAND	11	5353.067 ab
4	RDMT_GRAND	4	5847.111 ab
12	RDMT_GRAND	12	5854.044 ab
5	RDMT_GRAND	5	6077.689 b
10	RDMT_GRAND	10	6089.956 b
2	RDMT_GRAND	2	6200.711 b
3	RDMT_GRAND	3	6826.311 b
9	RDMT_GRAND	9	7105.956 b
7	RDMT_GRAND	7	7489.067 b
8	RDMT_GRAND	8	7815.111 b
6	RDMT_GRAND	6	8080.000 b

Résultats emmeans pour : GRAND_EPI_Z87			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
1	GRAND_EPI_Z87	1	64.89936 a
6	GRAND_EPI_Z87	6	213.33333 ab
2	GRAND_EPI_Z87	2	234.66667 bc
4	GRAND_EPI_Z87	4	248.00000 bc
5	GRAND_EPI_Z87	5	258.66667 bc
12	GRAND_EPI_Z87	12	264.00000 bc
11	GRAND_EPI_Z87	11	288.00000 bc
3	GRAND_EPI_Z87	3	293.33333 bc
9	GRAND_EPI_Z87	9	325.33333 bc
10	GRAND_EPI_Z87	10	344.00000 bc
7	GRAND_EPI_Z87	7	346.66667 bc
8	GRAND_EPI_Z87	8	357.33333 c

Résultats emmeans pour : PETIT_EPI_Z87			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
8	PETIT_EPI_Z87	8	90.66667 a
9	PETIT_EPI_Z87	9	104.00000 ab
7	PETIT_EPI_Z87	7	117.33333 abc
11	PETIT_EPI_Z87	11	122.66667 abc
10	PETIT_EPI_Z87	10	130.66667 abc
3	PETIT_EPI_Z87	3	138.66667 abc
5	PETIT_EPI_Z87	5	160.00000 abc
4	PETIT_EPI_Z87	4	160.00000 abc
6	PETIT_EPI_Z87	6	186.66667 abc
2	PETIT_EPI_Z87	2	200.00000 bcd
12	PETIT_EPI_Z87	12	221.33333 cd
1	PETIT_EPI_Z87	1	320.00000 d

Résultats emmeans pour : TARDI_Z87			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
7	TARDI_Z87	7	13.33333 a
11	TARDI_Z87	11	18.66667 a
5	TARDI_Z87	5	18.66667 a
8	TARDI_Z87	8	21.33333 a
9	TARDI_Z87	9	24.00000 a
2	TARDI_Z87	2	24.00000 a
3	TARDI_Z87	3	24.00000 a
10	TARDI_Z87	10	29.33333 a
4	TARDI_Z87	4	34.66667 a
12	TARDI_Z87	12	45.33333 ab
6	TARDI_Z87	6	45.33333 ab
1	TARDI_Z87	1	108.00000 b

Résultats emmeans pour : RDMT_TOT			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
1	RDMT_TOT	1	5102.756 a
5	RDMT_TOT	5	9536.533 b
11	RDMT_TOT	11	9660.622 b
12	RDMT_TOT	12	9864.711 b
10	RDMT_TOT	10	9885.333 b
4	RDMT_TOT	4	10339.733 b
2	RDMT_TOT	2	10396.978 b
9	RDMT_TOT	9	11036.089 b
3	RDMT_TOT	3	11160.356 b
8	RDMT_TOT	8	11246.933 b
7	RDMT_TOT	7	11806.756 b
6	RDMT_TOT	6	11907.911 b

Résultats emmeans pour : FERTI_TOT			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
1	FERTI_TOT	1	22.17752 a
10	FERTI_TOT	10	25.55245 ab
12	FERTI_TOT	12	26.64147 ab
11	FERTI_TOT	11	29.33472 ab
5	FERTI_TOT	5	29.35481 ab
2	FERTI_TOT	2	30.70887 ab
4	FERTI_TOT	4	31.74382 ab
3	FERTI_TOT	3	32.02214 ab
9	FERTI_TOT	9	32.15978 ab
7	FERTI_TOT	7	33.66717 ab
8	FERTI_TOT	8	34.67364 ab
6	FERTI_TOT	6	35.81505 b

Résultats emmeans pour : PMG_TOT			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
1	PMG_TOT	1	46.53828 a
10	PMG_TOT	10	49.29811 ab
11	PMG_TOT	11	50.71557 b
2	PMG_TOT	2	51.48349 b
7	PMG_TOT	7	51.64352 b
8	PMG_TOT	8	51.65543 b
6	PMG_TOT	6	51.66077 b
12	PMG_TOT	12	51.90621 b
4	PMG_TOT	4	51.97381 b
5	PMG_TOT	5	52.11067 b
3	PMG_TOT	3	52.33281 b
9	PMG_TOT	9	52.61093 b

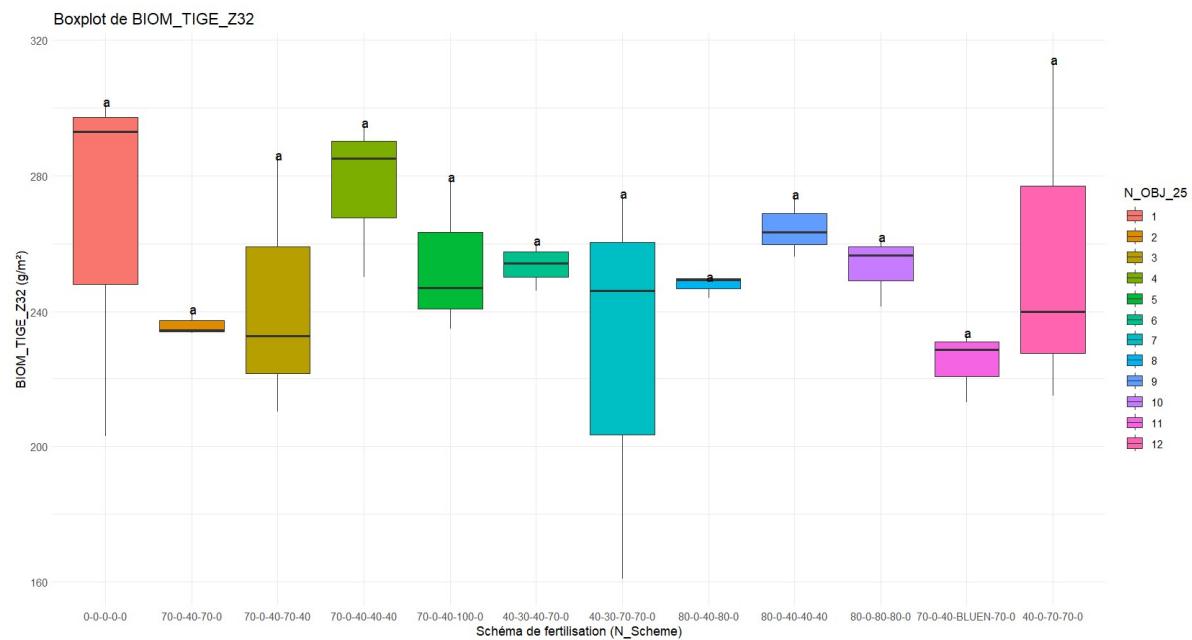
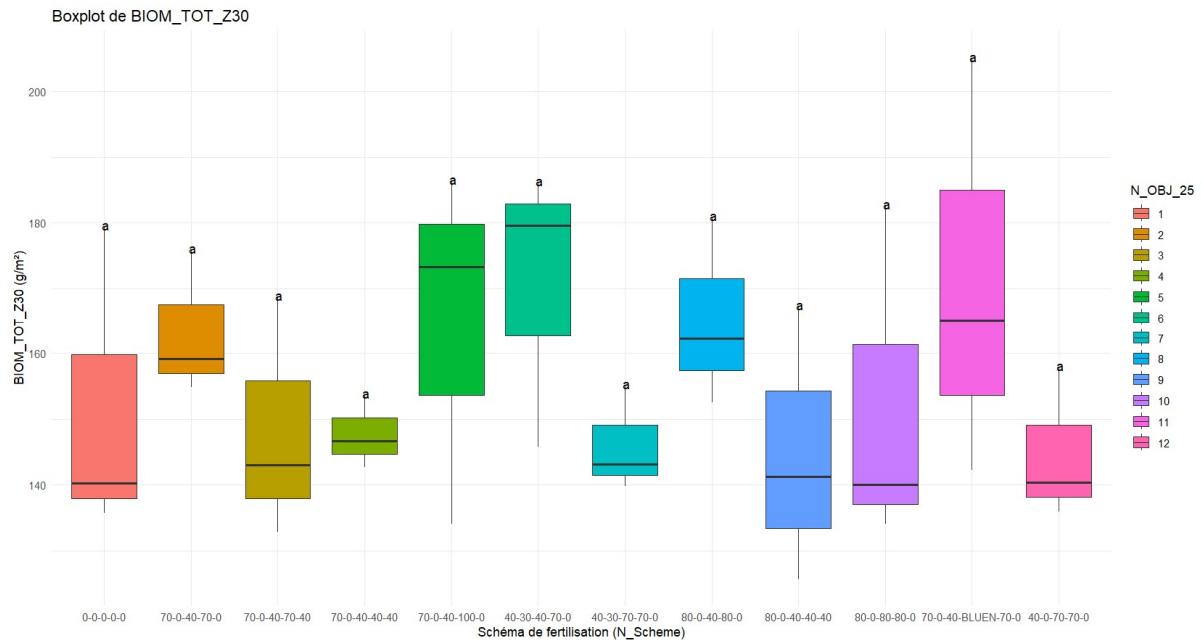
Résultats emmeans pour : DENS_GRAND_Z87			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
1	DENS_GRAND_Z87	1	3427.556 a
11	DENS_GRAND_Z87	11	9996.444 ab
4	DENS_GRAND_Z87	4	10611.556 ab
12	DENS_GRAND_Z87	12	10718.222 ab
5	DENS_GRAND_Z87	5	11336.889 ab
2	DENS_GRAND_Z87	2	11488.000 b
10	DENS_GRAND_Z87	10	11690.667 b
3	DENS_GRAND_Z87	3	12391.111 b
9	DENS_GRAND_Z87	9	13144.889 b
7	DENS_GRAND_Z87	7	14035.556 b
8	DENS_GRAND_Z87	8	14545.778 b
6	DENS_GRAND_Z87	6	15107.556 b

Résultats emmeans pour : DENS_MOY_Z87			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
1	DENS_MOY_Z87	1	2542.222 a
5	DENS_MOY_Z87	5	4769.778 ab
10	DENS_MOY_Z87	10	4872.889 ab
8	DENS_MOY_Z87	8	4988.444 ab
12	DENS_MOY_Z87	12	5205.333 ab
11	DENS_MOY_Z87	11	5216.000 ab
6	DENS_MOY_Z87	6	5224.889 ab
2	DENS_MOY_Z87	2	5457.778 b
3	DENS_MOY_Z87	3	5672.889 b
9	DENS_MOY_Z87	9	5845.333 b
4	DENS_MOY_Z87	4	5900.444 b
7	DENS_MOY_Z87	7	6056.889 b

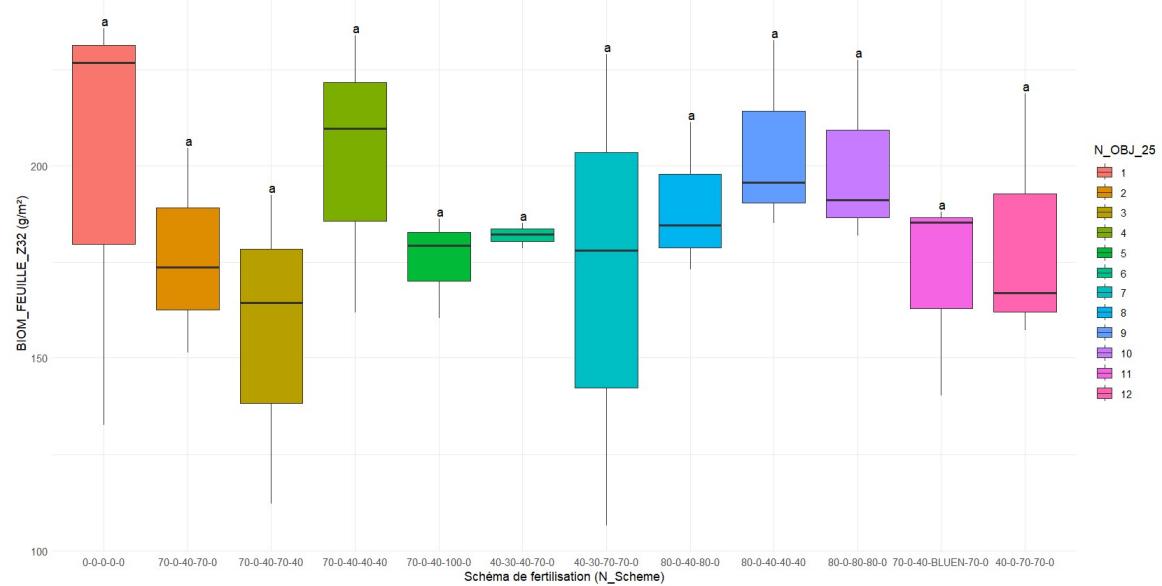
Résultats emmeans pour : DENS_PETIT_Z87			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
9	DENS_PETIT_Z87	9	1957.333 a
5	DENS_PETIT_Z87	5	2227.556 a
8	DENS_PETIT_Z87	8	2236.444 a
6	DENS_PETIT_Z87	6	2693.333 ab
7	DENS_PETIT_Z87	7	2796.444 ab
12	DENS_PETIT_Z87	12	3066.667 ab
2	DENS_PETIT_Z87	2	3249.778 ab
3	DENS_PETIT_Z87	3	3290.667 ab
4	DENS_PETIT_Z87	4	3354.667 ab
10	DENS_PETIT_Z87	10	3488.000 ab
11	DENS_PETIT_Z87	11	3809.778 ab
1	DENS_PETIT_Z87	1	4992.000 b

Résultats emmeans pour : DENS_Z87			
	Variable_reponse	N_OBJ_25	emmean .group
1	DENS_Z87	1	10961.78 a
5	DENS_Z87	5	18334.22 b
12	DENS_Z87	12	18990.22 b
11	DENS_Z87	11	19022.22 b
4	DENS_Z87	4	19866.67 b
10	DENS_Z87	10	20051.56 b
2	DENS_Z87	2	20195.56 b
9	DENS_Z87	9	20947.56 b
3	DENS_Z87	3	21354.67 b
8	DENS_Z87	8	21770.67 b
7	DENS_Z87	7	22888.89 b
6	DENS_Z87	6	23025.78 b

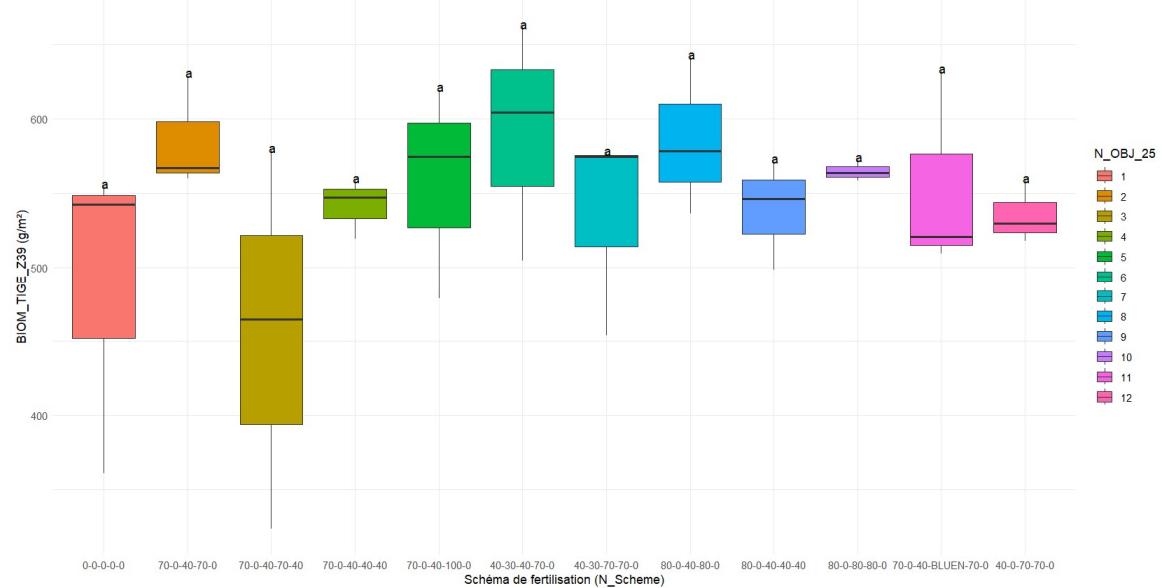
Annexe 8. Boxplot des biomasses



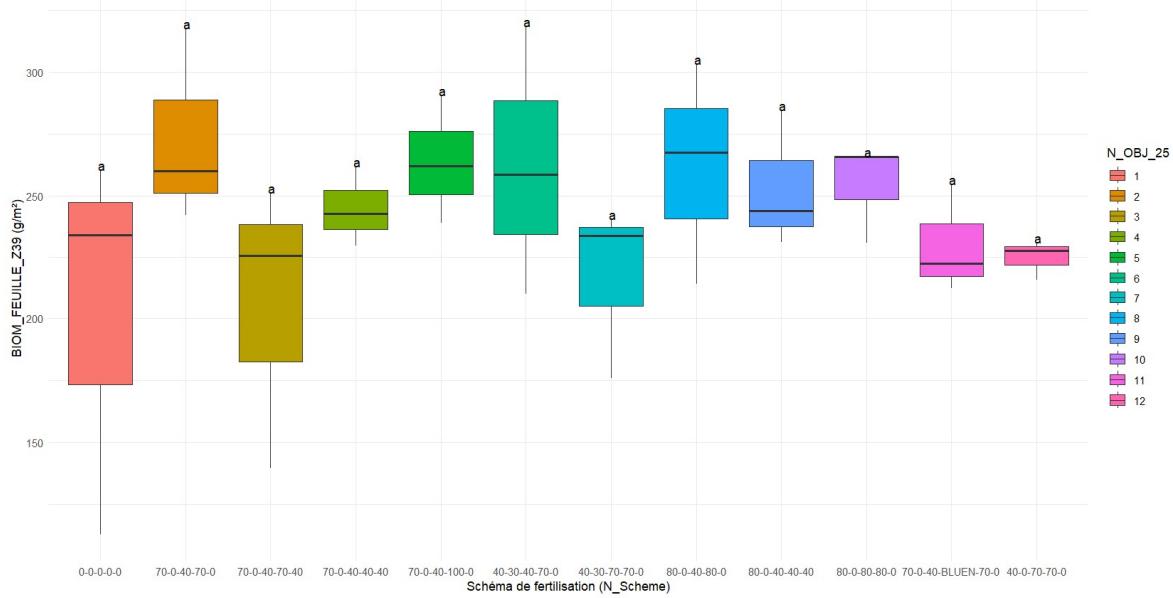
Boxplot de BIOM_FEUILLE_Z32



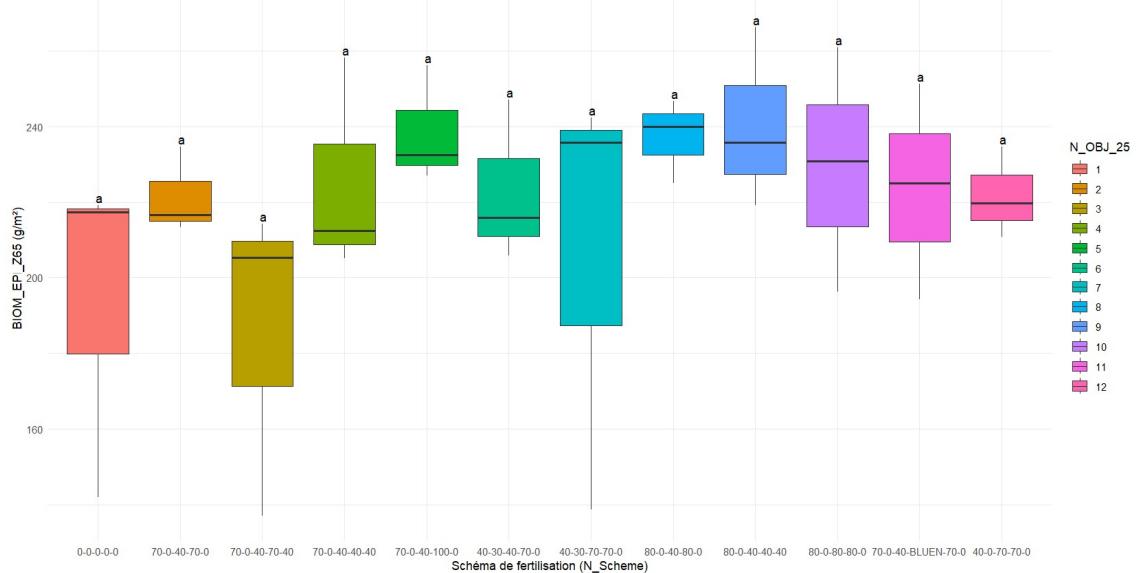
Boxplot de BIOM_TIGE_Z39



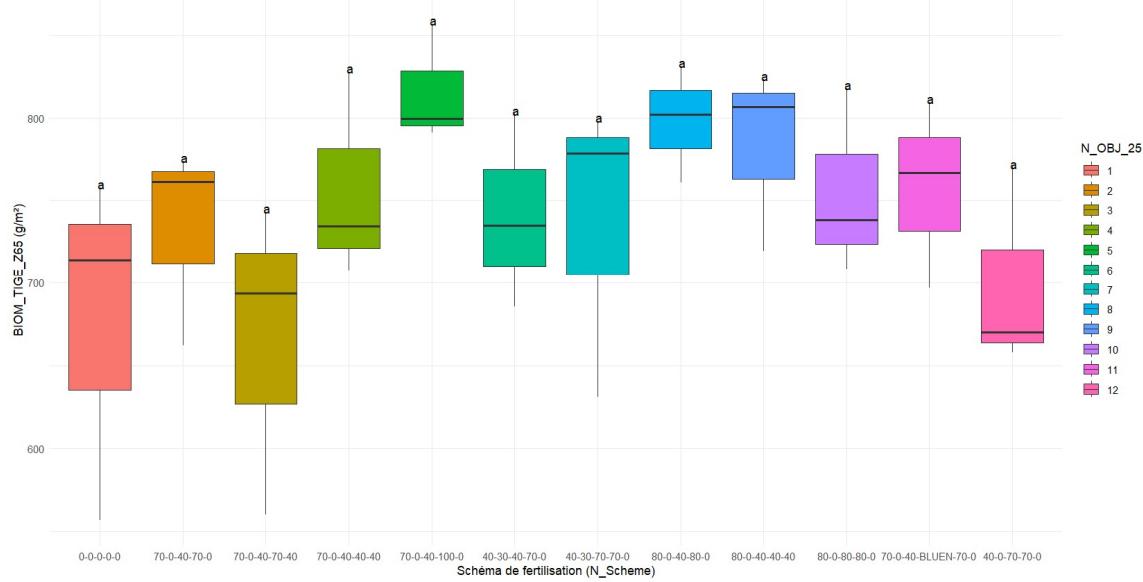
Boxplot de BIOM_FEUILLE_Z39



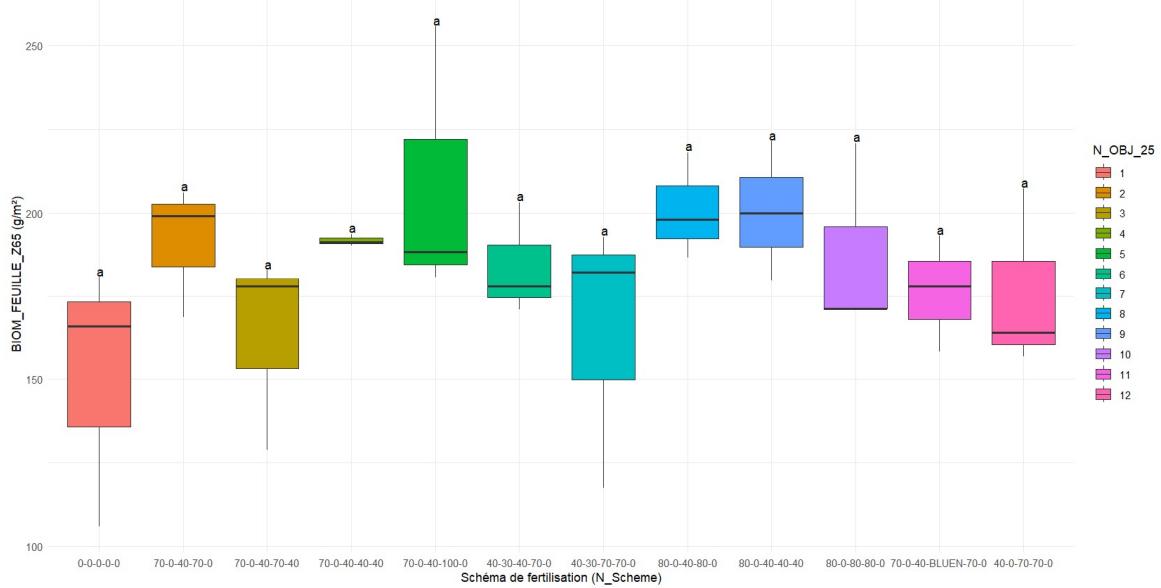
Boxplot de BIOM_EPI_Z65



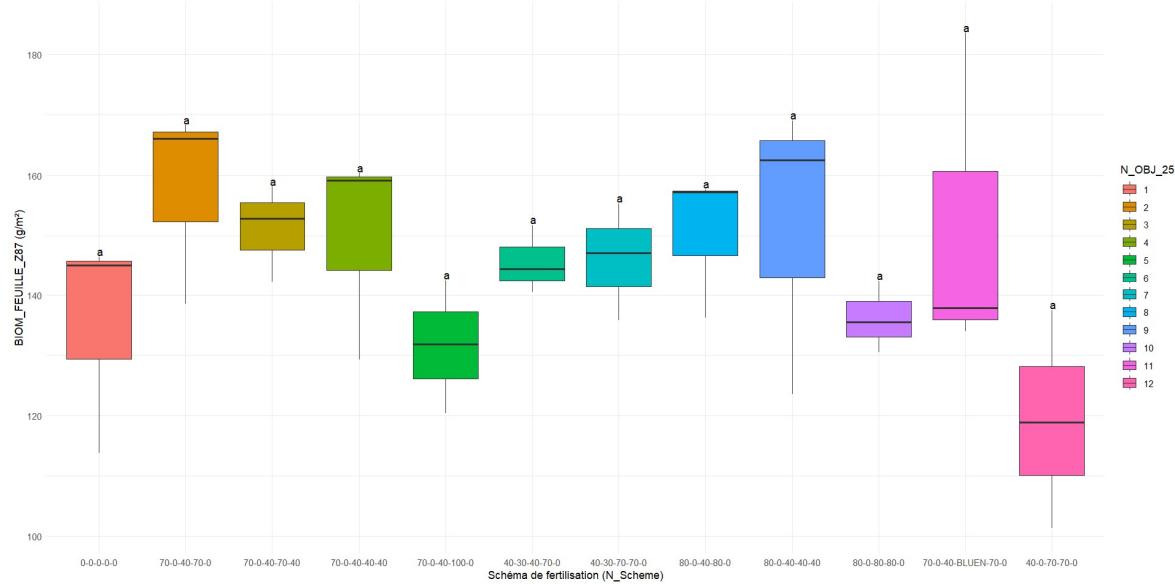
Boxplot de BIOM_TIGE_Z65



Boxplot de BIOM_FEUILLE_Z65



Boxplot de BIOM_FEUILLE_Z87



Boxplot de BIOM_TIGE_Z87

