
Potentiel d'optimisation de l'efficience de la nutrition azotée du froment d'hier (Triticum Aestivum L.) au moyen de l'application d'un biostimulant foliaire à base de zéolithe

Auteur : Emplit, Anne-Sophie

Promoteur(s) : Dumont, Benjamin

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

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

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/21377>

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.

**POTENTIEL D'OPTIMISATION DE L'EFFICIENCE DE LA NUTRITION
AZOTÉE DU FROMENT D'HIVER (*TRITICUM AESTIVUM* L.)
AU MOYEN DE L'APPLICATION D'UN BIOSTIMULANT FOLIAIRE À
BASE DE ZÉOLITHE**

Anne-Sophie Emplit

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

ANNÉE ACADÉMIQUE 2023 - 2024

PROMOTEUR : BENJAMIN DUMONT

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 académique¹ de Gembloux Agro Bio Tech

Le présent document n'engage que son présent auteur

1. Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par les promoteur(s) membre du personnel(s) enseignant de GxABT

**POTENTIEL D'OPTIMISATION DE L'EFFICIENCE DE LA NUTRITION
AZOTÉE DU FROMENT D'HIVER (*TRITICUM AESTIVUM* L.)
AU MOYEN DE L'APPLICATION D'UN BIOSTIMULANT FOLIAIRE À
BASE DE ZÉOLITHE**

Anne-Sophie Emplit

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

ANNÉE ACADÉMIQUE 2023 - 2024

PROMOTEUR : BENJAMIN DUMONT

Remerciements

Tout d'abord, j'adresse mes premiers remerciements à mon promoteur, Benjamin Dumont, pour sa proposition de sujet originale, son encadrement, ses conseils et ses explications avisées durant l'élaboration de mon travail de fin d'études.

Je tiens également à remercier l'entreprise *Power the Nature* : Pierre et Jean Niesner pour la fourniture du FertiRoc® et leur enthousiasme dans la volonté de conduire des essais à travers le Benelux.

Je suis reconnaissante envers le Centre Pilote Céréales et Oléo-protéagineux (CEPICOP) pour leur accueil et leur disponibilité. En particulier, je voudrais remercier Benjamin Van Der Verren, Noémie Vanoppen et Alice Nysten pour leurs conseils, ainsi qu'à l'équipe technique : Laurent, Patrick, Jean-François et Baptiste pour l'application du protocole ainsi que pour leur aide lors des prélèvements de biomasse. Merci aux stagiaires pour leur coup de mains et leur patience. Je remercie également mes comparses Tfstes Thomas Radu et Mahtieu Collart pour leur aide dans la prise de mesures.

Je voudrais exprimer ma gratitude au professeur Yves Beckers, Sylvie Mabile et le service de Zootechnie pour la mise à disposition de leur laboratoire pour la réalisation du broyage des échantillons.

J'aimerais également remercier le professeur Delaplace pour ses conseils sur la prise de mesures de l'activité photosynthétique ainsi que le prêt de l'appareil Handy Pea. Merci à Jimmy Bin pour ses explications quant à son utilisation et extraction des données.

Je tiens à remercier l'open space des Tfstes et les doctorants pour l'entraide, la bonne ambiance et la bonne humeur. Merci à Christophe Lacroix pour ses conseils judicieux pour l'analyse statistique.

Merci à Astrid Bughin pour ses années à Gembloux et l'amitié qui en a découlé, merci pour ton soutien, ton aide, nos aventures à la fac et notre investissement dans la cinsî!

Un grand merci à mon ami Vincent Thielens pour son soutien dans ma candidature de thèse, sa relecture et ses encouragements tout au long de mon parcours à Gembloux.

Merci à Florian Bollotte pour son soutien inconditionnel pour cette dernière année de master, de m'avoir permise d'aller jusqu'au bout et de garder confiance. Tu m'as aidée à évoluer et devenir une meilleure personne chaque jour.

Merci à mon équipe de fourmis pour votre soutien ! En particulier Elisa, Sarah et Sophie, votre aide m'a été précieuse pour le collage des feuilles. J'ai passé une belle journée d'anniversaire grâce à vous !

Merci à la Team Djemled pour vos encouragements et nos bons moments passés à la fac !

Enfin, je remercie également ma famille qui m'a transmis le goût de l'effort et la passion de l'agriculture. Vous m'avez toujours soutenue dans mes choix durant ma scolarité malgré mon entêtement à entreprendre des projets complexes. Vous m'avez donc permis de pouvoir réaliser mes études de Bioingénieur.

Résumé

La gestion de la fertilisation azotée des plantes est un enjeu majeur pour le développement des pratiques agricoles durables, tant pour la préservation de l'environnement que pour le maintien de rendements suffisants face à une population mondiale croissante. Une approche prometteuse pour atteindre cet objectif est l'amélioration de l'efficacité du prélèvement de l'azote par les plantes. Les biostimulants végétaux, tels que la zéolithe, pourraient jouer un rôle clé dans ce processus. La zéolithe, un minéral bénéfique, est reconnue comme amendement du sol et pour ses propriétés de rétention et d'échange ionique. Elle peut donc potentiellement réduire les pertes d'azote et améliorer la disponibilité de l'azote pour les plantes. Cependant, ses effets par application foliaire restent encore peu étudiés. Cette étude menée en Belgique vise à évaluer le potentiel d'optimisation de la nutrition azotée du blé tendre (*Triticum aestivum* L.) au moyen de l'application foliaire de la zéolithe à trois niveaux (0, 2 et 3 kg/ha) à différents stades critiques de son développement (tallage, redressement, deuxième noeud et dernière feuille). L'apport d'azote a été pensé en 3 niveaux : 0, 120 et 180 unités par hectare. Pour atteindre cet objectif, la réponse des caractéristiques écophysiologicals du blé tendre (*Triticum aestivum* L.), notamment la productivité de la biomasse aérienne, l'activité photosynthétique et l'absorption de l'azote ont été étudiées. Les résultats montrent que l'application de zéolithe, en combinaison avec des niveaux modérés de fertilisation azotée, n'améliore pas significativement la productivité de la biomasse ni l'absorption de l'azote, en comparaison avec l'absence de zéolithe. Cependant, le stade d'application de la zéolithe a permis de montrer l'importance de la fraction au stade tallage. Le schéma de fertilisation combiné avec la zéolithe permettant une production de biomasse correcte et un prélèvement proche de l'optimum et une réduction de la dose d'azote appliquée est le suivant : 120 unités d'azote combiné avec 3 kg de zéolithe au stade tallage, redressement et dernière feuille. En conclusion, l'utilisation de la zéolithe s'avère être une solution prometteuse pour améliorer la nutrition azotée des cultures, bien que les résultats soient basés sur des expérimentations sur des parcelles destructives. Des études à plus grande échelle, incluant des essais de rendements et sur plusieurs années, sont nécessaires pour confirmer ces résultats et évaluer pleinement les avantages potentiels de la zéolithe dans divers contextes pédoclimatiques.

Mots clés : Fertilisation, Azote, Biostimulant, Zéolithe, Blé tendre

Abstract

Nitrogen fertilization management in plants is a major challenge for developing sustainable agricultural practices, both for environmental preservation and for maintaining sufficient yields in the face of a growing global population. A promising approach to achieving this goal is improving the efficiency of nitrogen uptake by plants. Plant biostimulants, such as zeolite, could play a key role in this process. Zeolite, a beneficial mineral, is recognized as a soil amendment with ion exchange and retention properties. It can potentially reduce nitrogen losses and improve nitrogen availability to plants. However, its effects through foliar application remain understudied. This study conducted in Belgium aims to assess the potential for optimizing nitrogen nutrition in common wheat (*Triticum aestivum* L.) through foliar application of zeolite at three levels (0, 2, and 3 kg/ha) at different critical stages of development (tillering, stem elongation, second node, and flag leaf). Nitrogen application was structured at three levels : 0, 120, and 180 units per hectare. To achieve this objective, the response of the ecophysiological characteristics of common wheat (*Triticum aestivum* L.), particularly the productivity of the above-ground biomass, photosynthetic activity, and nitrogen uptake, were studied. The results show that the application of zeolite, in combination with moderate levels of nitrogen fertilization, does not significantly improve biomass productivity or nitrogen uptake compared to the absence of zeolite. However, the timing of zeolite application highlighted the importance of the tillering stage. The fertilization scheme combined with zeolite that allows for adequate biomass production, near-optimal nitrogen uptake, and reduced nitrogen application is as follows : 120 units of nitrogen combined with 3 kg of zeolite at the tillering, stem elongation, and flag leaf stages. In conclusion, the use of zeolite appears to be a promising solution for improving crop nitrogen nutrition, although the results are based on experiments on destructive plots. Larger-scale studies, including yield trials and multi-year experiments, are needed to confirm these results and fully assess the potential benefits of zeolite in various pedoclimatic contexts.

Keywords : Fertilization, Nitrogen, Plant Biostimulant, Zeolite, Winter Wheat

Table des matières

Table des matières	8
Table des figures	11
Liste des tableaux	13
1 Introduction	16
2 État de l'art	18
2.1 La fertilisation azotée	18
2.1.1 La détermination pratique de la fertilisation azotée : Méthode du Livre blanc	18
2.2 Les biostimulants	19
2.2.1 Définition	19
2.2.2 Catégorie des biostimulants	20
2.2.3 La Zéolithe : un minérale bénéfique	20
2.3 Le blé tendre	22
3 Objectifs	24
4 Méthodologie	25
4.1 Conditions climatiques	27
4.2 Raisonnement de la fumure - Constats	28
4.2.1 Situation moyenne du profil en azote minérale en sortie d'hiver	28
4.3 Itinéraire technique	29
4.3.1 Description de l'itinéraire technique	29
4.3.2 Description de la variété emblavée	29
4.3.3 Description du FertiRoc®	30
4.3.4 Mode d'action du FertiRoc®	30
4.3.5 Justification du moment de l'apport d'azote et du biostimulant <i>FertiRoc®</i>	31
4.3.6 Protocole	31
4.4 Observations et paramètres mesurés	33
4.4.1 Stades phénologiques	34
4.4.2 Densité de plantes, de talles et d'épis	34
4.4.3 Couverture foliaire	34
4.4.4 Index de surface foliaire (LAI)	35
4.4.5 Activité photosynthétique	36
4.4.6 Dosage de l'azote dans la plante : N Uptake	37
4.4.7 Prélèvement de biomasse en dynamique	37
4.4.8 Rendement approximé	38
4.4.9 Cotations foliaires des maladies	38

4.5	Sources de variations : Facteurs étudiés	39
4.5.1	Facteurs fixes	39
4.5.2	Facteur aléatoire (non contrôlé)	39
4.6	Analyse des données	40
5	Résultats et discussion	42
5.1	Rappel des objectifs	42
5.2	Résultats des tests de significativité des facteurs	42
5.2.1	Résultats des tests de significativité du facteur traitement	42
5.2.2	Résultats des tests de significativité des facteurs fertilisation, PN et stades d'applications du PN	43
5.2.3	Résultats des tests de significativité de l'ajout du FertiRoc®	44
5.2.4	Résultats des tests de significativité de l'effet du positionnement du Fer- tiRoc®	50
5.2.5	Résultats des tests de significativité de l'effet de l'omission du FertiRoc®	54
5.3	Objectif 1 : Effet de l'ajout du PN	60
5.3.1	Densité de plantes, talles et d'épis	60
5.3.2	Couverture foliaire	62
5.3.3	L'indice de surface foliaire (LAI) et activité photosynthétique	62
5.3.4	Azote prélevé	64
5.3.5	Biomasse aérienne totale	65
5.3.6	Rendement approximé	66
5.3.7	Que retenir de l'objectif 1 : Effet de l'ajout du PN ?	67
5.4	Objectif 2 : Effet du positionnement du PN	67
5.4.1	Densité de plantes, des talles et d'épis	67
5.4.2	Couverture foliaire	69
5.4.3	Activité photosynthétique	70
5.4.4	Azote prélevé	71
5.4.5	Biomasse aérienne totale	72
5.4.6	Rendement approximatif	73
5.4.7	Que retenir de l'objectif 2 : Effet du positionnement du PN ?	74
5.5	Objectif 3 : Effet de l'omission du PN	74
5.5.1	Densité de plantes, de talles et d'épis	74
5.5.2	Couverture foliaire	76
5.5.3	Activité photosynthétique	77
5.5.4	Rendement approximé	79
5.5.5	Que retenir de l'objectif 3 : Effet de l'omission du PN ?	80
5.6	Courbe de dilution de l'azote	80
5.7	Maladies	81
5.7.1	La septoriose	81
5.7.2	La rouille brune	82
5.8	Analyse multivariée	83
5.9	Compléments de discussion	85
6	Contribution personnelle	86
A	Valeurs chiffrées et cartes interactives liées à l'azote	95
B	Échelle BBCH améliorée du Livre Blanc Céréales (2017) (ZADOKS, CHANG et KONZAK 1974)	96

C	Etiquette du produit FertiRoc®	101
D	Description de l'analyseur d'efficacité des plantes (PEA)(HANSATECH 2024)	103
E	Résultats des tests de normalité et d'égalité des variances des variables : DHARMA residual	110
F	Résultats de l'analyse en composantes principales : cercle de corrélation et matrice des corrélations des variables avec les dimensions	113

Table des figures

2.1	Possibilités d'utilisation des zéolithes en agriculture (MONDAL et al. 2021) (modifié de (COLELLA et WISE 2014)).	21
2.2	Possibilités d'utilisation des zéolithes en agriculture (JAROSZ et al. 2022) (modifié de (MONDAL et al. 2021)).	22
4.1	Image satellite de l'essai FH-PN (FertiRoc®) (<i>WalOnMap</i> 2024).	26
4.2	Carte Numérique des sols de Wallonie de l'essai FH-PN (FertiRoc®) (<i>WalOnMap</i> 2024).	26
4.3	Image aérienne de l'essai FH-PN (FertiRoc®)	27
4.4	Graphique des températures et de la pluviométrie de la saison culturale 2023-2024 (Sombreffe, Belgique)	28
4.5	Dispositif expérimental de l'essai PN	32
4.6	Photographie de la pulvérisation du FertiRoc®	33
4.7	Interprétation de la couverture foliaire avec Canopeo®. Sur cet exemple, la couverture foliaire est de 34.17 %	35
4.8	Image traitée en différents niveaux de gris (a) ; Histogramme de la fréquence des pixels (b)	36
4.9	Graphique du paramètre de fluorescence en fonction de la durée de prise d'une mesure (HANSATECH 2024)	37
4.10	Période d'infection des principales maladies en blé (flèches horizontales) et stades de croissance clé de la protection fongicide en blé (flèches verticales) (DUVIVIER et al. 2018)	38
4.11	Échelle de cotation pour la septoriose (MUMINJANOV et KOYSHIBAYEV 2016)	39
4.12	Échelle de cotation pour les rouilles (MUMINJANOV et KOYSHIBAYEV 2016)	39
5.1	Boxplots de la densité de plantes aux stades 30 et 39 en fonction de la fertilisation*PN : Objectif 1	60
5.2	Boxplots de la densité de talles aux stades 30 et 39 en fonction de la fertilisation*PN : Objectif 1	61
5.3	Boxplots de la densité d'épis au stade 65 et 89 en fonction de la fertilisation*PN : Objectif 1	61
5.4	Boxplots de la couverture foliaire au stade 30, 32, 39 et 65 en fonction de la fertilisation*PN : Objectif 1	62
5.5	Boxplot de l'indice de surface foliaire au stade 39 en fonction de la fertilisation*PN : Objectif 1	63
5.6	Boxplots de l'activité photosynthétique (Fv/Fm) au stade 30, 32, 39 et 65 en fonction de la fertilisation*PN : Objectif 1	64
5.7	Boxplot de l'azote exporté au stade 32 et 65 en fonction de la fertilisation*PN : Objectif 1	65
5.8	Boxplots de la biomasse aérienne totale au stade 30, 32, 39, 65 et 89 en fonction de la fertilisation*PN : Objectif 1	66

5.9	Boxplot du rendement approximé en fonction de la fertilisation*PN : Objectif 1	67
5.10	Boxplots de la densité de plantes aux stades 30 et 39 en fonction de la fertilisation*stades d'application PN : Objectif 2	68
5.11	Boxplots de la densité de talles aux stades 30 et 39 en fonction de la fertilisation*stades d'application PN : Objectif 2	68
5.12	Boxplots de la densité d'épis au stade 65 et 89 en fonction de la fertilisation*PN : Objectif 2	69
5.13	Boxplots de la couverture foliaire au stade 30, 32, 39 et 65 en fonction de la fertilisation*stades d'application PN : Objectif 2	70
5.14	Boxplots de l'activité photosynthétique (Fv/Fm) au stade 30, 32, 39 et 65 en fonction de la fertilisation* stades d'application PN : Objectif 2	71
5.15	Boxplot de l'azote exporté au stade 32 et 65 en fonction de la fertilisation*stades d'application PN : Objectif 2	72
5.16	Boxplots de la biomasse aérienne totale au stade 30, 32, 39, 65 et 89 en fonction de la fertilisation* stades d'application PN : Objectif 2	73
5.17	Boxplot du rendement approximé en fonction de la fertilisation* stades d'application PN : Objectif 2	74
5.18	Boxplots de la densité de plantes aux stades 30 et 39 en fonction de la fertilisation*stades d'application PN : Objectif 3	75
5.19	Boxplots de la densité de talles aux stades 30 et 39 en fonction de la fertilisation*stades d'application PN : Objectif 3	75
5.20	Boxplots de la densité d'épis au stade 65 et 89 en fonction de la fertilisation*PN : Objectif 3	76
5.21	Boxplots de la couverture foliaire au stade 30, 32, 39 et 65 en fonction de la fertilisation*stades d'application PN : Objectif 3	77
5.22	Boxplots de l'activité photosynthétique (Fv/Fm) au stade 30, 32, 39 et 65 en fonction de la fertilisation* stades d'application PN : Objectif 3	78
5.23	Boxplots de la biomasse aérienne totale au stade 30, 32, 39, 65 et 89 en fonction de la fertilisation* stades d'application PN : Objectif 3	79
5.24	Boxplot du rendement approximé en fonction de la fertilisation* stades d'application PN : Objectif 3	80
5.25	Courbe de dilution de l'azote	81
5.26	Fréquence et gravité de la septoriose au stade 55	82
5.27	Fréquence et gravité de la rouille brune au stade 55	83
5.28	Analyse en composantes principales du facteur fertilisation	84
5.29	Analyse en composantes principales du facteur PN	84
5.30	Analyse en composantes principales du facteur stades d'application du PN	85
A.1	Share of global excess nitrogen from croplands (RITCHIE et ROSER 2024)	95
A.2	Nitrogen fertilizer application per hectare of cropland(RITCHIE et ROSER 2024)	95
E.1	Première série de graphes : DHARMA residual	111
E.2	Deuxième série de graphes : DHARMA residual	112
F.1	Cercle de corrélation des variables explicatives par rapport aux deux premières dimensions	113
F.2	Graphes de corrélations des variables aux cinq premières dimensions	114

Liste des tableaux

4.1	Légende de la carte numérique des sols de Wallonie	26
4.2	Comparaison au cours des 10 dernières années, des réserves en azote minéral du sol (kg Nmin /ha) – CRA-W, le CARAH, GRENeRA et l’unité de Phytotechnie tempérée de Gembloux Agro-Bio Tech et le CePiCOP.(CÉRÉALES 2024)	28
4.3	Bulletin d’analyse de l’azote dans le profil de terre (Lonzée, Belgique)	29
4.4	Itinéraire technique de l’essai	29
4.5	Caractéristiques agronomiques de la variété emblavée : Sy Revolution (SYNGENTA 2023)	30
4.6	Comportement face aux maladies de la variété emblavée : Sy Revolution (CÉRÉALES 2023)	30
4.7	Tableau du protocole de l’essai PN	31
4.8	Synthèse des mesures	34
4.9	Synthèse des variables étudiées à l’aide de tests de significativité	40
5.1	Résultats de la significativité du facteur traitement (Légende : *** : p-valeur très hautement significative, ** : p-valeur hautement significative, * : p-valeur valeur significative, . : p-valeur proche du seuil de significativité)	43
5.2	Résultats de la significativité des facteurs fertilisation, PN, stades d’application PN (Légende : *** : p-valeur très hautement significative, ** : p-valeur hautement significative, * : p-valeur valeur significative, . : p-valeur proche du seuil de significativité)	44
5.3	Résultats de la significativité des facteurs fertilisation et PN pour les traitements 1 à 6 (Légende : *** : p-valeur très hautement significative, ** : p-valeur hautement significative, * : p-valeur valeur significative, . : p-valeur proche du seuil de significativité)	45
5.4	Moyennes et groupes des tests emmeans pour la variable biomasse pour le facteur fertilisation et PN pour les traitements 1 à 6 (Objectif 1)	46
5.5	Moyennes et groupes des tests emmeans pour les densités de plantes, talles et épis pour le facteur fertilisation et PN pour les traitements 1 à 6 (Objectif 1)	47
5.6	Moyennes et groupes des tests emmeans pour les couvertures foliaires et l’indice de surface foliaire (LAI) pour le facteur fertilisation et PN pour les traitements 1 à 6 (Objectif 1)	48
5.7	Moyennes et groupes des tests emmeans pour l’activité photosynthétique et l’azote absorbé pour le facteur fertilisation et PN pour les traitements 1 à 6 (Objectif 1)	49
5.8	Moyennes et groupes des tests emmeans pour le rendement approximé pour le facteur fertilisation et PN pour les traitements 1 à 6 (Objectif 1)	49

5.9	Résultats de la significativité des facteurs fertilisation et stades d'application du PN pour les traitements 4 à 9 (Légende : *** : p-valeur très hautement significative, ** : p-valeur hautement significative, * : p-valeur valeur significative, . : p-valeur proche du seuil de significativité	50
5.10	Moyennes et groupes des tests emmeans pour les densités de plantes, talles et épis pour le facteur fertilisation et stades d'application PN pour les traitements 4 à 9 (Objectif 2)	51
5.11	Moyennes et groupes des tests emmeans pour les biomasses pour le facteur fertilisation et stades d'application PN pour les traitements 4 à 9 (Objectif 2)	52
5.12	Moyennes et groupes des tests emmeans pour la couverture foliaire et l'indice de surface foliaire pour le facteur fertilisation et stades d'application PN pour les traitements 4 à 9 (Objectif 2)	53
5.13	Moyennes et groupes des tests emmeans pour l'activité photosynthétique et l'azote prélevé pour le facteur fertilisation et stades d'application PN pour les traitements 4 à 9 (Objectif 2)	54
5.14	Moyennes et groupes des tests emmeans pour le rendement approximé pour le facteur fertilisation et stades d'application PN pour les traitements 4-9 (Objectif 2)	54
5.15	Résultats de la significativité des facteurs fertilisation et stades d'application du PN pour les traitements 7 à 15 (Légende : *** : p-valeur très hautement significative, ** : p-valeur hautement significative, * : p-valeur valeur significative, . : p-valeur proche du seuil de significativité	55
5.16	Moyennes et groupes des tests emmeans pour les densités de plantes, talles et épis pour le facteur fertilisation et stades d'application PN pour les traitements 7 à 15 (Objectif 3)	56
5.17	Moyennes et groupes des tests emmeans pour les biomasses totales pour le facteur fertilisation et stades d'application PN pour les traitements 7 à 15 (Objectif 3)	57
5.18	Moyennes et groupes des tests emmeans pour les biomasses par organes : feuilles, tiges et épis pour le facteur fertilisation et stades d'application PN pour les traitements 7 à 15 (Objectif 3)	58
5.19	Moyennes et groupes des tests emmeans pour la couverture foliaire pour le facteur fertilisation et stades d'application PN pour les traitements 7 à 15 (Objectif 3)	59
5.20	Moyennes et groupes des tests emmeans pour le rendement approximé pour le facteur fertilisation et stades d'application PN pour les traitements 7 à 15 (Objectif 3)	59

Nomenclature

CePiCOP Centre Pilote pour les Céréales et les Olégo-Protéagineux

CPAR Centre Provincial pour l'Agriculture et la Ruralité

F X-X-X PN Y Schéma de fertilisation avec X la fraction azotée en unité d'azote par hectare et Y la quantité de biostimulant en kg par hectare

GRENeRA Groupe de Recherche ENvironnement et Ressources Azotées

NUE Efficience de l'utilisation de l'azote

Phytotechnie tempérée Unité de Phytotechnie Tempérée de Gembloux Agro-Bio Tech

PB Biostimulants végétaux

U.N. Unité d'azote

Chapitre 1

Introduction

L'azote est un nutriment essentiel jouant un rôle fondamental dans la croissance des plantes et leurs fonctions physiologiques (KHALIQ et al. 2024 ; LIU et al. 2017). Il constitue d'ailleurs le principal facteur limitant la productivité des cultures à l'échelle mondiale (LIU et al. 2017).

En 2020, la quantité d'engrais minéraux azotés utilisée par le secteur agricole dans le monde a atteint 113 millions de tonnes, marquant une hausse de plus de 68 % en 30 ans. En Europe, ce montant se chiffre à 15,8 millions (FAO 2022). Cet usage volumineux, associé à une diminution de l'efficacité de l'utilisation de l'azote (NUE)(LIU et al. 2017) soulève des préoccupations majeures quant à la gestion de la fertilisation azotée en raison de ses impacts environnementaux (CLARK et TILMAN 2017 ; LYNCH et al. 2021). Notamment, les pertes d'azote par lessivage (NO_3^-), par volatilisation (NH_3) et par émissions d'oxyde nitreux (N_2O) sont particulièrement préoccupantes. Il est ainsi primordial de doser avec précision la quantité d'azote nécessaire pour satisfaire les besoins physiologiques des cultures tout en maîtrisant le devenir de cet élément. (CASSMAN et DOBERMANN 2022).

Le blé d'hiver (*Triticum aestivum*L.), la deuxième céréale la plus cultivée au niveau mondial (STATISTA 2023b) requière des besoins en azote variant entre 2,8 et 3,2 kg par quintal pour l'élaboration de rendement compris entre 7,5 et 11, 5 tonnes par ha. (ARVALIS 2024). Habituellement, la quantité d'azote appliquée recommandée s'élève à 180 U.N/ha pour cette céréale (CÉRÉALES 2024). Cependant, seulement 48 % de l'azote appliqué au niveau global est absorbé par cette plante, le reste se retrouvant dissipé dans l'environnement (LADHA et al. 2016). Parallèlement, il est crucial de pouvoir nourrir une population mondiale en constante expansion, qui devrait dépasser les 9 milliards d'individus d'ici 2050 (NATIONS 2024).

Ces enjeux, bien que distincts, sont étroitement liés et appellent des solutions innovantes et pérennes pour assurer la sécurité alimentaire tout en préservant l'environnement. Dans ce contexte, les biostimulants végétaux (PB), qui ont la capacité de stimuler la croissance des plantes et d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'azote, apparaissent comme des leviers clés pour une agriculture plus durable (CATALDO et al. 2021). Un biostimulant est toute substance ou microorganisme appliqué aux plantes dans le but d'améliorer l'efficacité de la nutrition, la tolérance aux stress abiotiques et/ou les caractéristiques de qualité des cultures, indépendamment de sa teneur en nutriments (JARDIN 2015). Les biostimulants comportent sept catégories dont les minéraux bénéfiques. Parmi eux, se retrouve la zéolithe qui semble pouvoir jouer un rôle prometteur (QUEZADA et BRAGAZZA 2023). Les zéolithes naturelles sont des minéraux cristallins, nanoporeux et hydratés, composés de tétraèdres d'atomes d'oxygène entourant des cations alcalins et alcalino-terreux (EROGLU, EMEKCI et ATHANASSIOU 2017).

L'objectif principal de ce mémoire est de démontrer le potentiel d'optimisation de l'efficience de la nutrition azotée du froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.) au moyen de l'application d'un biostimulant foliaire à base de zéolithe à différents stades clés du développement de la plante. En outre, il vise à évaluer la réponse des caractéristiques écophysiologiques du blé en termes de productivité de biomasse, de capacité de prélèvement de l'azote ainsi que l'activité photosynthétique.

Chapitre 2

État de l'art

2.1 La fertilisation azotée

L'application d'engrais azotés s'avère particulièrement bénéfique pour améliorer le rendement et la qualité des cultures, notamment les céréales, assurant des bénéfices économiques optimaux (GUO et al. 2023).

L'azote constitue un composant fondamental de la chlorophylle, le pigment vert foncé qui donne leur couleur aux feuilles, capture l'énergie lumineuse pour la photosynthèse et favorise une activité photosynthétique accrue (MUHAMMAD et al. 2022). Les plantes le prélèvent principalement sous deux formes : le nitrate (NO_3^-) et l'ammonium (NH_4^+). Ces deux sont les principales sources d'azote disponibles pour les plantes dans le sol (LAZAR 2003).

2.1.1 La détermination pratique de la fertilisation azotée : Méthode du Livre blanc

"Une fertilisation azotée raisonnée permet d'optimiser la production et la rentabilité de la culture, tout en minimisant les risques de pertes culturales (maladie, verse) et environnementales (émission de N_2O , lixiviation de NO_3^-)" (CÉRÉALES 2024).

La méthode de fertilisation selon le « Livre Blanc Céréales » vise principalement à atteindre l'optimum économique.^{1, 2}

Cette approche s'inscrit dans un mode de gestion de la culture où la densité de semis est modérée et où les interventions pour protéger la culture contre la verse et les maladies cryptogamiques sont également rationalisées en fonction de leur rentabilité.

Les recommandations de fractionnement de la fertilisation ont pour objectifs de :

- Minimiser le risque de rendements insuffisants
- Optimiser la rentabilité économique
- Réduire le risque de verse
- Limiter le développement des maladies
- Respecter les normes technologiques

1. Optimum économique = (rendement phytotechnique - coûts de fertilisation) (CÉRÉALES 2024)

2. Rendement phytotechnique = rendement brut pour un taux d'humidité corrigé à 15% (CÉRÉALES 2024)

Les pratiques de fumure azotée recommandées visent également à minimiser les pertes d'azote nuisibles pour l'environnement en :

- Réduisant le reliquat d'azote après la culture et en le limitant aux couches supérieures du sol
- Éliminant le reliquat azoté de la culture précédente
- Limitant les pertes par volatilisation gazeuse

Quel que soit le schéma de fractionnement choisi, chaque apport doit être planifié en suivant ces principes :

- Chaque parcelle doit être traitée de manière individuelle, car les conditions culturales peuvent varier considérablement entre les parcelles (précédents culturaux, évolution de la culture en cours, influence de l'environnement voisin)
- La dose de chaque fraction d'azote doit être déterminée juste avant son application. La quantité totale d'azote à appliquer ne doit jamais être fixée dès la sortie de l'hiver, mais doit résulter de l'addition progressive des fractions, définies successivement au fil des apports

Ces deux principes, en ajustant les doses de référence, permettent de tenir compte des variations dans la disponibilité d'azote du sol et de l'évolution de la culture au cours de la saison (potentiel de rendement, enracinement, présence de maladies, stress ou incidents éventuels) (CÉRÉALES 2024).

La formule générale pour le calcul des doses à appliquer est la suivante :

$$\begin{aligned} \text{Dose à appliquer} &= \text{Dose de référence} + N_{\text{TER}} \\ &+ N_{\text{ORGA}} + N_{\text{PREC}} \\ &+ N_{\text{ETAT}} + \text{éventuellement } N_{\text{CORR}} \end{aligned} \quad (2.1)$$

avec :

1. le contexte pédoclimatique de la parcelle (N_{TER}) ;
2. le régime d'apport de matières organiques dans la parcelle (N_{ORGA}) ;
3. les caractéristiques de la culture qui précédait la céréale (N_{PREC}) ;
4. l'état de la culture au moment de l'application (N_{ETAT}) ;
5. des facteurs de correction (N_{CORR}).

Le fractionnement recommandé par le Livre Blanc Céréales pour cette année culturale 2024 est pour une situation normale : une première fraction de 60 unités d'azote (U.N.) au tallage, une seconde au redressement de 60 et une troisième fraction de 60 U.N. à la dernière feuille. (CÉRÉALES 2024).

2.2 Les biostimulants

2.2.1 Définition

Dans son règlement (UE 2019/1009) du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019, établissant les règles relatives à la mise à disposition sur le marché de l'Union européenne

des produits fertilisants, les biostimulants végétaux sont définis comme suit (ROUPHAEL et al. 2020; EUROPEAN 2019) :

"Un biostimulant végétal est un produit fertilisant de l'UE dont la fonction est de stimuler les processus de nutrition des plantes indépendamment de la teneur en nutriments du produit, dans le but exclusif d'améliorer une ou plusieurs des caractéristiques suivantes de la plante ou de la rhizosphère de la plante :

1. *L'efficacité des nutriments*
2. *La tolérance au stress abiotique*
3. *Les caractéristiques de qualité*
4. *La disponibilité des nutriments confinés dans le sol ou la rhizosphère"*

2.2.2 Catégorie des biostimulants

Les biostimulants proviennent d'origines variées et proviennent d'un large éventail de sources, notamment microbiennes et non microbiennes (SHARMA et al. 2024 ; JARDIN 2015). Les biostimulants d'origine non microbienne sont :

1. Les acides humiques et fulviques
2. Les hydrolysats de protéines et autres composés contenant de l'azote
3. Les extraits d'algues et plantes médicinales extraits de plantes

Les biostimulants d'origine microbienne sont :

1. Le chitosan et autres biopolymères
2. Les minéraux bénéfiques
3. Les bactéries bénéfiques
4. Les champignons bénéfiques

Les minéraux bénéfiques

Certains éléments chimiques favorisant la croissance des plantes peuvent s'avérer être essentiels à certaines plantes mais ne le sont pas nécessairement pour toutes. Ils sont qualifiés de minéraux bénéfiques. Les cinq principaux sont l'aluminium (Al), le cobalt (Co), le sodium (Na), le sélénium (Se) et le silicium (Si) (PILON-SMITS et al. 2009). Ils se trouvent dans les sols et les plantes sous différentes formes de sels inorganiques, ainsi que sous une forme insoluble, telle que la silice amorphe ($SiO_2 \cdot nH_2O$), notamment chez les espèces de graminées (JARDIN 2015). Les nombreux effets des éléments bénéfiques sont mentionnées par PILON-SMITS et al. 2009 comme la capacité à favoriser la croissance des plantes, améliorer la qualité des produits végétaux et renforcer la tolérance aux stress abiotiques. Cela inclut la rigidification des parois cellulaires, l'osmorégulation, la réduction de la transpiration par dépôts de cristaux, la régulation thermique par réflexion du rayonnement, l'activité enzymatique par cofacteurs, la nutrition des plantes via des interactions avec d'autres éléments lors de l'absorption et de la mobilité, la protection antioxydante, les interactions avec les symbiotes, la réponse des pathogènes et des herbivores, la protection contre la toxicité des métaux lourds, la synthèse et la signalisation des hormones végétales.

2.2.3 La Zéolithe : un minérale bénéfique

Les nanomatériaux naturels siliceux tels que les zéolithes peuvent potentiellement être inclus dans cette catégorie de PB inorganiques (MONDAL et al. 2021).

L'origine et minéralogie de la zéolithe

La découverte, il y a 65 ans, de zéolithes naturelles sous la forme de vastes gisements exploitables, presque entièrement composés de ces dernières, dans des roches sédimentaires tuffacées de l'ouest des États-Unis et d'autres pays, a marqué une nouvelle étape dans l'exploitation des minéraux industriels. Leurs propriétés de surface et structurales uniques ont été largement utilisées dans les technologies industrielles, agricoles, environnementales et biologiques (MUMPTON 1999).

Les zéolithes naturelles se forment dans des zones de roches volcaniques et de couches de cendres, où elles réagissent avec les eaux souterraines alcalines. La formation des zéolithes dans les roches sédimentaires est influencée par plusieurs facteurs, notamment la composition chimique de la roche hôte (silice haute ou basse), la chimie de l'eau (pH, salinité, ions dissous) dans l'environnement de dépôt et post-dépôt, ainsi que l'âge et la profondeur d'enfouissement. Le contenu en sel de l'eau favorise également la conversion du verre volcanique en zéolithes (EROGLU, EMEKCI et ATHANASSIOU 2017).

Les zéolithes naturelles sont des minéraux cristallins, nanoporeux et hydratés, composés de tétraèdres d'atomes d'oxygène entourant des cations alcalins et alcalino-terreux. La position tétraédrique dans la structure tridimensionnelle peut être occupée par des cations autres que *Si* et *Al*, tels que *Be*, *P*, *Zn* ou autre. Cette structure forme des cavités ouvertes, telles que des canaux et des cages, qui peuvent contenir de l'eau (H_2O) et des cations échangeables. Ces minéraux se caractérisent par un grand volume d'espace libre et une capacité d'échange de cations élevée (CEC). Lorsqu'elles sont hydratées, les zéolithes peuvent se déshydrater de manière réversible à des températures généralement inférieures à 400 °C. Cette structure permet le passage de diverses molécules et ions à travers les canaux, tandis que des groupes tels que (*OH*) ou (*F*) peuvent également occuper certains sites dans le réseau de tétraèdres, modifiant parfois la structure locale (MONDAL et al. 2021 ;COLELLA et WISE 2014 ;MUMPTON 1999).

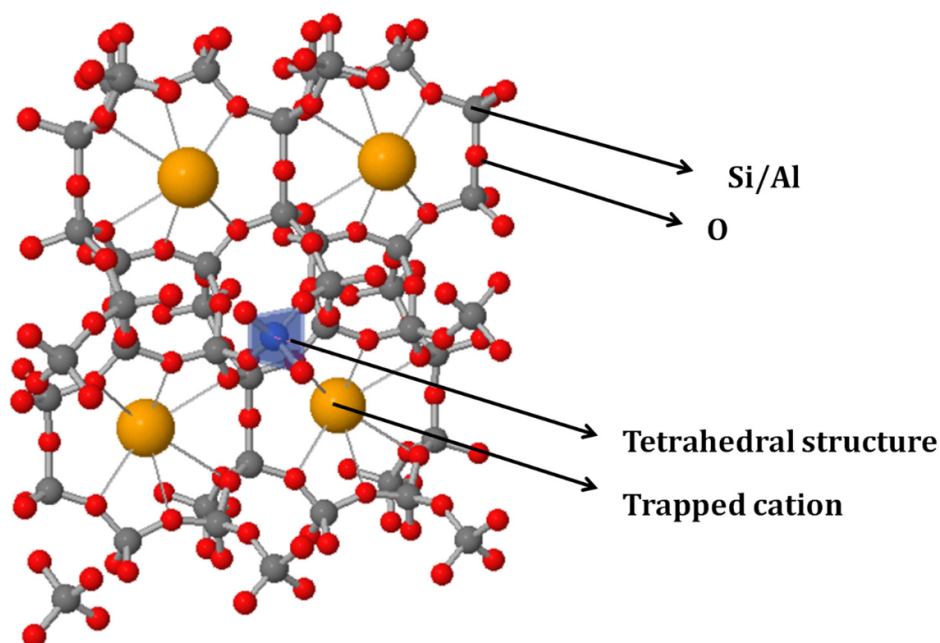


FIGURE 2.1 – Possibilités d'utilisation des zéolithes en agriculture (MONDAL et al. 2021) (modifié de (COLELLA et WISE 2014).

Il existe plusieurs applications de la zéolithe en agriculture comme représenté à la figure 2.2 (JAROSZ et al. 2022).

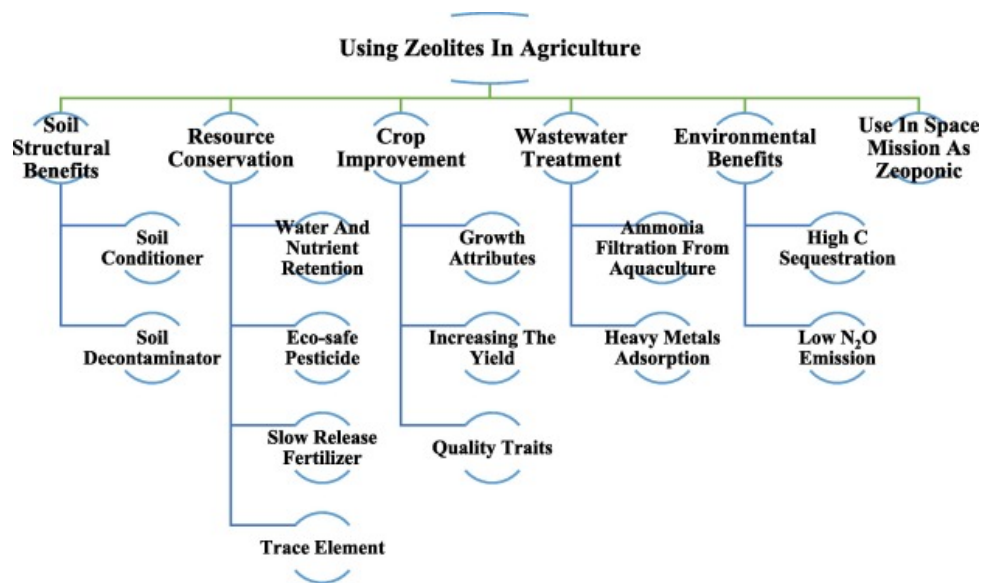


FIGURE 2.2 – Possibilités d’utilisation des zéolithes en agriculture (JAROSZ et al. 2022) (modifié de (MONDAL et al. 2021)).

Les zéolithes possèdent la capacité de capturer, stocker et libérer lentement des nutriments minéraux tels que l’azote, ce qui permet une gestion plus efficace des nutriments dans le sol. En outre, elles modifient positivement le pH du sol et améliorent la disponibilité des nutriments essentiels comme le calcium, le potassium et le magnésium. Leur rôle est également crucial dans la rétention d’eau et la dépollution des sols contaminés. Elles optimisent les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol en renforçant la capacité d’échange cationique et en minimisant les pertes de nutriments. Elles contribuent également à une réduction significative des pertes d’azote et à une meilleure efficacité des engrais. (Jarosz et al., 2022 ;MONDAL et al. 2021).

2.3 Le blé tendre

Apparue au Néolithique, le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) plus communément nommé froment d’hiver en Belgique est une espèce hexaploïde issue de croisements spontanées entre des blés tétraploïdes et diploïdes (ARVALIS 2017 ; INRAE 2020).

Le blé tendre est une céréale annuelle d’hiver, principalement cultivée dans les régions à climat tempéré. Cette plante herbacée monocotylédone fait donc partie de la famille des Poacées (WILLENBORG et VAN ACKER 2008). Le froment est principalement cultivée pour sa graine qui est un caryopse nu équivalant à un fruit sec indéhiscents.

Pour l’année 2022, la production mondiale du blé s’élève à 780,6 millions de tonnes (STATISTA 2023a). Les principaux pays producteurs de blé sont la Chine, l’Inde, la Russie et les États-Unis (STATISTA 2024). Il occupe une place prépondérante dans l’alimentation humaine à hauteur de 69 % contre 19 % pour l’alimentation animale (TERRONES GAVIRA et BURNY 2012).

Dans l’optique de maintenir de tels niveaux de production, il convient de répondre aux différents besoins nutritifs du blé, notamment l’azote. Assurément, l’optimisation du rendement est

régit par divers facteurs résultant d'une triple interaction entre le géotype, l'environnement et les pratiques culturales (SLAFER et al. 2022). Le besoin en azote requis par le blé varie entre 2,8 et 3,2 kg par quintal pour obtenir des rendements variant entre 75 et 115 quintaux/ha (ARVALIS 2024).

Chapitre 3

Objectifs

Objectif de départ

L'objectif principal est d'étudier les effets de la réduction de la dose d'azote minéral lorsqu'il est combiné avec un biostimulant à base de zéolithe à différents stades physiologiques du froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.).

Objectifs expérimentaux

1. Évaluer l'effet de l'application de FertiRoc® seul ou en combinaison avec un complément minéral sur la nutrition du froment d'hiver.
2. Évaluer l'effet du positionnement du FertiRoc® appliqué à trois stades distincts : Tallage, Redressement, et Dernière feuille, sur la croissance et la nutrition du froment d'hiver.
3. Évaluer l'impact de l'omission de FertiRoc® aux stades Dernière feuille et Deuxième nœud sur la croissance et la nutrition du froment d'hiver.

Chapitre 4

Méthodologie

L'étude a été mise en place pour l'année culturale 2023-2024 sous la supervision du Professeur Benjamin Dumont et grâce au soutien technique du Centre Pilote pour les Céréales et les Oligo-Protéagineux (CEPICOP) à la suite de la demande de l'entreprise Power The Nature. L'entreprise est le fruit d'une association père et fils : deux agriculteurs ayant pour engagement de réduire les intrants tout en optimisant la rentabilité technico-économique des exploitations agricoles orientée dans la production agricole ou horticole. Pour répondre à cette problématique tout en s'inscrivant dans une optique d'agriculture durable, cette dernière propose un biostimulant d'origine minérale à base de zéolithe et d'autres minéraux comme le calcium : le FertiRoc® de son nom commercial. (YANN.POUPINEL 2024) Ce biostimulant à base de zéolithe aurait pour faculté de stimuler l'activité photosynthétique. Son application se traduirait par une amélioration de l'assimilation des nutriments tant organiques que minéraux ainsi qu'une augmentation positive du rendement en grains.

L'expérimentation a été menée sur la plateforme d'essais des céréales d'hiver du CEPICOP d'octobre 2023 à juillet 2024. Située à Lonzée (Gembloux) ($50^{\circ}33'14.4''N$ $4^{\circ}44'30.4''E$), cette plateforme d'essais est installée sur une parcelle de l'exploitation en polyculture élevage de Mr Philippe Van Eyck. La ferme se situe au sein de l'abbaye d'Argenton. (MALTER 2010) L'essai relatif au FertiRoc®, nommé essai PN dans la suite de ce travail, a été semé au 13 octobre 2023 après un précédent pommes de terre.

Le sol de ce réseau d'essais est limoneux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre. (*WalOnMap* 2024). L'essai PN est caractérisé par des sols de types Aha, Ada0, Ada1 et Aip. (Figure 5.1 et 5.2 et Tableau 5.1)



FIGURE 4.1 – Image satellite de l’essai FH-PN (FertiRoc®) (WalOnMap 2024).



FIGURE 4.2 – Carte Numérique des sols de Wallonie de l’essai FH-PN (FertiRoc®) (WalOnMap 2024).

TABLE 4.1 – Légende de la carte numérique des sols de Wallonie

Types de sols	Définition
Aha	Sols limoneux à drainage assez pauvre (fortement gleyifiés) à horizon B textural
Ada0	Sols limoneux à drainage imparfait (modérément gleyifiés) à horizon B textural et à horizon A épais (sup. à 40 cm)
Ada1	Sols limoneux à drainage imparfait (modérément gleyifiés) à horizon B textural et à horizon A mince (inf. à 40 cm)
Aip	Sols limoneux à drainage pauvre (très fortement gleyifiés) avec une absence de développement de profil

La superficie de l’essai est d’environ 960 m². Il est composé de 60 parcelles de 2 m sur 8 emblavées de blé d’hiver (*Triticum aestivum* L.) de la variété SY Revolution. Une bordure d’une variété plus précoce l’entoure afin de pallier les (éventuels) biais.

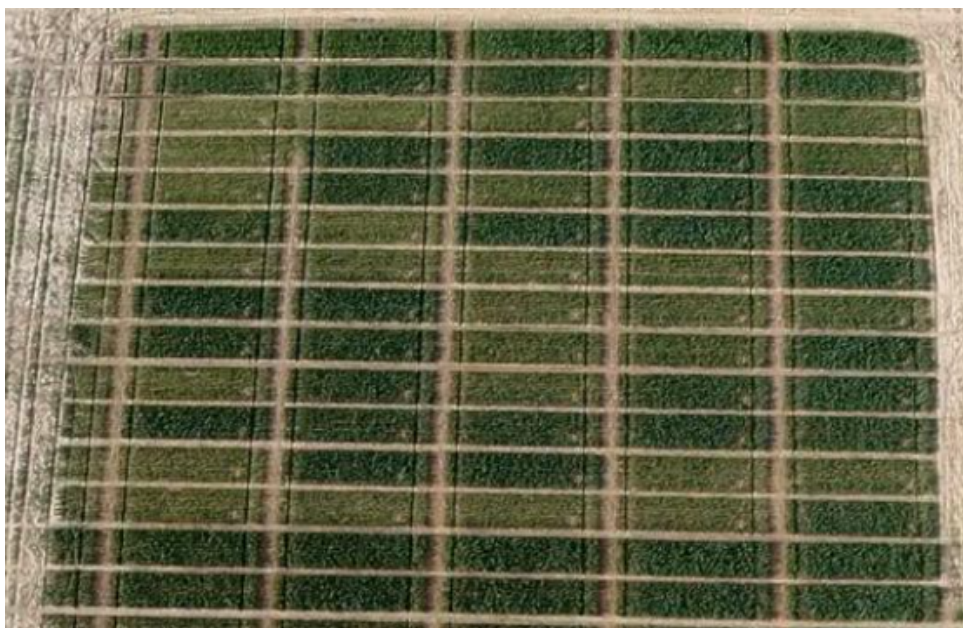


FIGURE 4.3 – Image aérienne de l’essai FH-PN (FertiRoc®)

4.1 Conditions climatiques

La Belgique s’inscrit dans un climat tempéré océanique. Ce dernier permet l’atténuation des extrêmes climatiques. Ce climat est donc en général caractérisé par des hivers doux et pluvieux ainsi que des étés relativement frais et humides. (IRM 2024c ; SPF SANTÉ PUBLIQUE 2019) La moyenne des précipitations annuelles se situe autour de 910 mm et la moyenne des températures annuelles quant à elle est de 10,2°C. (IRM 2024a)

L’aperçu climatique du livre blanc pour l’année culturale en cours souligne un automne 2023 marqué par un climat plus chaud et plus humide qu’une année moyenne. De fait, l’écart de températures pour la région limoneuse est de + 2,4°C. Concernant les précipitations, celles-ci sont très largement excédentaires, à savoir + 20,1 mm, toujours en région limoneuse. A noter que l’essentiel des précipitations ont été constatées à partir de la seconde quinzaine d’octobre. (CÉRÉALES 2024) D’ailleurs, le semis de l’essai PN a été réalisé au 13 octobre 2023.

L’hiver 2024 a été plus chaud qu’une année moyenne avec un écart de + 1,3°C. Cependant, les épisodes de froid de début et milieu décembre n’ont pas suffi à compenser les températures plus douces enregistrées le reste de la période.(CÉRÉALES 2024)

Le printemps de 2024 a été pluvieux. Ainsi, les mois de mars à mai sont décrits comme ayant été par très humides, chauds et sombres. (figure 4.4) Notamment pour le mois de mars où la température moyenne est reprise parmi les cinq plus élevées depuis 1991. En avril, le climat est caractérisé par une pluviométrie de 81,1 mm en comparaison à 46,7 mm pour une année normale. Concernant le mois de mai, celui-ci se détache particulièrement : premièrement par sa pluviométrie : un total de 91.4 mm contre une normale de 59,7 mm. Deuxièmement par le rayonnement solaire global qui est bien moindre et situe parmi les 3 valeurs les plus faible depuis 1991. (IRM 2024b) L’été 2024 est une période à deux visages.(IRM 2024b) En effet, il s’est avéré être à la fois très frais avec une moyenne de 16,7°C. Il est composé de trois semaines en dessous de cette moyenne et d’une dernière semaine avec, pour certains jours, une amplitude de 10°C avec la mi-juin. La répartition des quantités et jours de précipitations

est assez irrégulière. Elles se concentrent principalement autour de la moitié du mois avec un pic le 18 juin à hauteur 47,2 mm. Concernant le mois de juillet, caractérisé comme frais au départ également pour se terminer chaudement. (IRM 2024b) La température moyenne s'élève à 18.9°C. Les précipitations quant sont assez faibles avec un pic les 9 et 12 juillet respectivement de 7 et 21.3 mm.(figure 4.4)

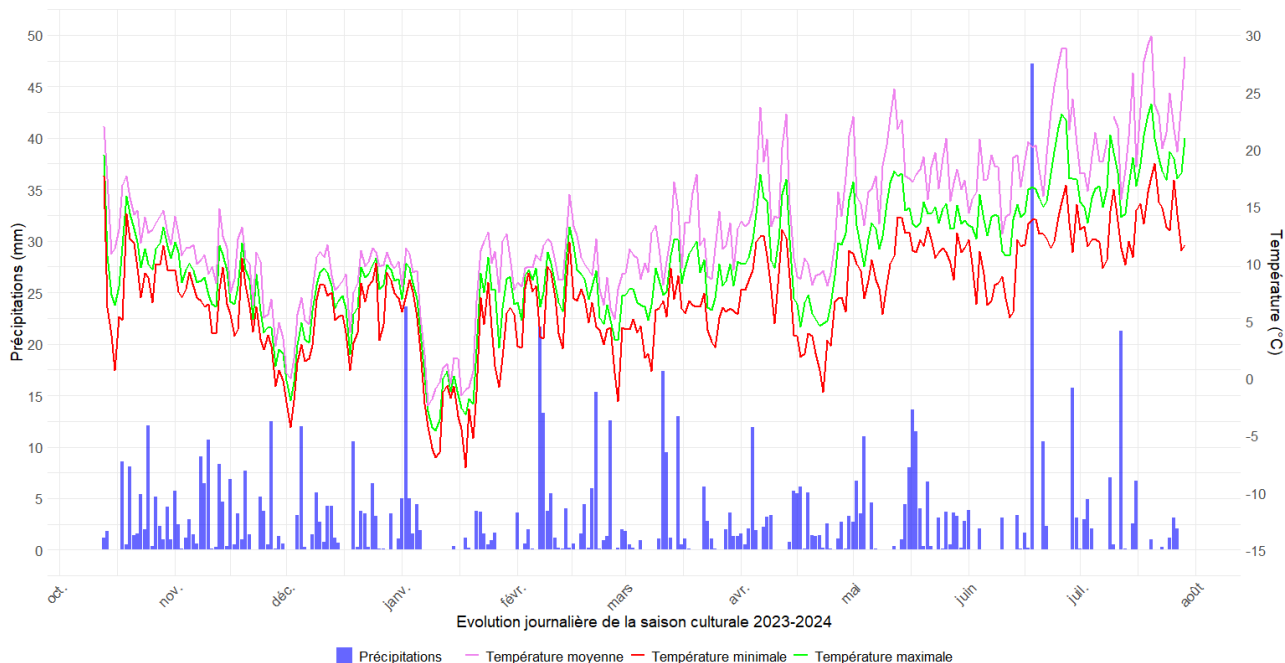


FIGURE 4.4 – Graphique des températures et de la pluviométrie de la saison culturale 2023-2024 (Sombreffe, Belgique)

4.2 Raisonnement de la fumure - Constats

4.2.1 Situation moyenne du profil en azote minérale en sortie d'hiver

Cette année, selon le tableau comparatif des réserves en azote minéral au cours des dix dernières années tableau 4.2, le profil moyen en azote minéral en sortie d'hiver est notablement inférieur à celui des années précédentes. Ce niveau d'azote présent dans le sol est en moyenne de 35 kg Nmin/ha sur une profondeur de 90 cm. Cela constitue la moyenne la plus basse observée au cours de cette décennie. En effet, la valeur moyenne décennale est de 55 kg Nmin/ha. (CÉRÉALES 2024). A la suite des précipitations abondantes durant les saisons automnales et hivernales, le stock d'azote minéral encore présent dans le sol a été impacté. Assurément, elles ont entraîné la migration de l'azote au-delà de 90 cm de profondeur, appauvrissant donc le profil.

TABLE 4.2 – Comparaison au cours des 10 dernières années, des réserves en azote minéral du sol (kg Nmin /ha) – CRA-W, le CARAH, GREneRA et l'unité de Phytotechnie tempérée de Gembloux Agro-Bio Tech et le CePicOP.(CÉRÉALES 2024)

Année		2024	2023	2022	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014
Profondeur (cm)	Nombre de situations	77	130	142	89	101	179	138	148	163	137	156
	0-30	10	11	12	15	14	12	9	22	9	9	11
	30-60	11	15	18	23	20	30	11	34	12	13	14
	60-90	14	23	21	31	25	43	18	2	17	16	18
	Total	35	50	50	68	68	59	39	79	39	38	43

Le tableau 4.3 reprend le bulletin d'analyse d'azote dans le profil de terre pour la plateforme d'essais du froment d'hiver du CEPICOP réalisée par le CPAR. Il démontre que le profil moyen en azote minéral est inférieur à la situation moyenne présentée au tableau 4.2 avec une plus grande différence pour la profondeur 0-30 cm.

TABLE 4.3 – Bulletin d'analyse de l'azote dans le profil de terre (Lonzée, Belgique)

N° d'analyse (Horizon)	Carbone organique (g/kg de terre sèche)	Humus (% de terre sèche)	Azote total (g/100g de terre sèche)	C/N	Matière sèche %	Azote minéral (mg N-NO3/l)	Azote minérale (kg N-NO3/ha)
N24/1351 0-30 cm	10	1,9	0,10	10	82 (1/03/2024)	0,25 (1/03/2024)	6
N24/1352 30-60 cm					82 (1/03/2024)	0,29 (1/03/2024)	8
N24/1353 60-90 cm					82 (1/03/2024)	0,51 (1/03/2024)	15
Total							29

4.3 Itinéraire technique

4.3.1 Description de l'itinéraire technique

Le tableau (tableau 4.4) reprend l'ensemble des opérations culturales effectuées sur l'essai PN dans un schéma de conduite conventionnelle.

TABLE 4.4 – Itinéraire technique de l'essai

Date	Stade BBCH	Intervention
13-oct.-23	/	Semis
20-mars-24	26-2.	Fertilisation (Tallage) : 1ère fraction azotée : Amonitrate N27 (0-40-60) U.N/ha
21-mars-24	26-2.	Désherbage SH : Sigma star (0,33 kg/ha) + Biathlon Duo (70 g/ha) + Végétop (1l/ha)
25-mars-24	26-30	Fertilisation (Tallage) : Biostimulant FertiRoc® 1kg/ha
10-avr.-24	30-31	Fertilisation (Redressement) : 2ème fraction azotée : Amonitrate N27 (0-40-60) U.N/ha + Biostimulant FertiRoc® 1kg/ha
12-avr.24	31	Régulateur : CCC (1l/ha)
22-avr.24	31	1er Fongicide : Simvèris (0,6 l/ha) + Aquino (1,2 l/ha) + Stavento (1,5 l/ha)
23-avr.24	32	Fertilisation (2ème noeud) : Biostimulant FertiRoc® 1kg/ha
13-mai-24	39	Fertilisation (Dernière feuille) : 3ème fraction azotée : Amonitrate N27 (0-40-60) U.N/ha + Biostimulant FertiRoc® 1kg/h
27-mai-24	55	2ème Fongicide : Velogy Era (1l/ha)
29-juil-24	89	Récolte

4.3.2 Description de la variété emblavée

La variété emblavée de l'essai n'est autre que SY Revolution. Il s'agit d'une variété dont la classe de qualité technologique est le Blé Panifiable Supérieur (BPS). (SYNGENTA 2023) Elle est semi-tardive à épiaison avec une maturité rapide. Elle se caractérise par un très bon comportement au froid et à l'ensemble des maladies du feuillage et de l'épi en plus d'être résistante à la cécidomyie orange. (CÉRÉALES 2023) La qualité de son grain permet de répondre aux attentes de l'export et de la meunerie.

TABLE 4.5 – Caractéristiques agronomiques de la variété emblavée : Sy Revolution (SYNGENTA 2023)

	Sy Revolution
Alternativité	Hiver/demi-hiver
Précocité montaison	Tardif/demi-tardif
Précocité épiaison	Demi-tardif/demi-précoce
Résistance au froid	Assez résistant
Faculté de tallage	Moyen à élevé
Hauteur de plante	Courte à assez courte
Résistance à la verse	Peu sensible
Fertilité épi	Très élevé
Taille du grain	Très élevé
Poids spécifique	Moyen à assez élevé

TABLE 4.6 – Comportement face aux maladies de la variété emblavée : Sy Revolution (CÉRÉALES 2023)

	SY Revolution
Oidium	8,8
Rouille jaune	8,9
Rouille brune	6,5
Septoriose	6,5
Maladie des épis	6,5

Les cotations des maladies sont basées sur une échelle variant de 1 à 9. La cote 9 exprimant la cote la plus favorable.

Selon les bonnes pratiques agricoles, deux traitements fongicides ont été réalisés suite à deux cotations maladies "feuille par feuille" aux stades 39 (dernière feuille) et 55 (mi-épiaison).

En outre, l'ensemble des autres traitements administrés ont été pensé en fonction des besoins des plantes et des pressions des maladies et des ravageurs et ce toujours selon les bonnes pratiques agricoles.

4.3.3 Description du FertiRoc®

Le FertiRoc® est un biostimulant minéral (100% naturel) à base de zéolithe (Chabazite) mélangée à une proportion de carbonate de calcium et d'autres minéraux comme le magnésium. (QUEZADA et BRAGAZZA 2023) Ce mélange est finement broyé et purifié selon le savoir-faire de l'entreprise Power The Nature. Pour être adapté à une mise en solution et une application foliaire, les minéraux sont traités, mélangés et micronisés pour atteindre une finesse telle que 90% du produit fini passe au tamis 3 µm. Le FertiRoc® se trouve sous la forme d'une poudre mouillable (WP) utilisable en respectant une dilution de 2% minimum. Il s'agit donc d'un produit dispersible et non soluble. (YANN.POUPINEL 2024 ; annexe C)

4.3.4 Mode d'action du FertiRoc®

Grâce à cette micronisation fine, les minéraux du FertiRoc® sont plus facilement assimilables. Ils améliorent les échanges gazeux au niveau des feuilles et rentrent directement au cœur

des plantes par les stomates. Le FertiRoc® permet d'améliorer significativement la photosynthèse, l'activité enzymatique du sol, et les interactions entre les plantes et les micro-organismes du sol. Pour améliorer in fine les performances globales des plantes, ainsi que la biodisponibilité et l'assimilation des éléments nutritifs, et en particulier la nutrition azotée. (YANN.POUPINEL 2024)

4.3.5 Justification du moment de l'apport d'azote et du biostimulant *FertiRoc®*

L'application du FertiRoc® a été réfléchi de sorte à concorder avec les apports d'azote minérale. Par conséquent, cela revient à considérer l'objectif premier de la nutrition des plantes qui est de répondre au mieux à ses besoins azotés. (ARVALIS 2023). Pour cela, un fractionnement en trois apports respectivement de 0, 40 et 60 unités d'azote (U.N) pour l'amonitrate a été mis en place selon les recommandations du livre blanc céréales (CÉRÉALES 2024). Il consiste en l'apport respectivement au tallage (T),redressement (R) et à la dernière feuille (DF). Les applications ont été réalisées à la suite à la consultation de l'outil d'aide à la décision : Phénoblé complémenté par l'observation du stade phénologique sur le terrain.

4.3.6 Protocole

Protocole de l'essai PN

Le tableau 4.7 reprend la description des quinze traitements qui caractérise l'essai.

TABLE 4.7 – Tableau du protocole de l'essai PN

Traitement	FERTILISATION							
	Tallage		Redressement		Deuxième noeud		Dernière feuille	
	N [U.N./ha]	PN [kg/ha]	N [U.N./ha]	PN [kg/ha]	N [U.N./ha]	PN [kg/ha]	N [U.N./ha]	PN [kg/ha]
1	0	-	0	-	-	-	0	-
2	40	-	40	-	-	-	40	-
3	60	-	60	-	-	-	60	-
4	0	1	0	1	-	-	0	1
5	40	1	40	1	-	-	40	1
6	60	1	60	1	-	-	60	1
7	0	-	0	1	-	1	0	1
8	40	-	40	1	-	1	40	1
9	60	-	60	1	-	1	60	1
10	0	-	0	1	-	1	0	-
11	40	-	40	1	-	1	40	-
12	60	-	60	1	-	1	60	-
13	0	-	0	1	-	-	0	1
14	40	-	40	1	-	-	40	1
15	60	-	60	1	-	-	60	1

Les stades de développement BBCH où le FertiRoc® est appliqué en trois fractions sont : la première est celui de fin de tallage (T) (BBCH 29), la seconde celui du redressement-début montaison (R) (BBCH 30) et la troisième est celui de la dernière feuille étalée (DF) (BBCH 39).

Cela correspond aux traitements 4 à 6. (tableau 4.7). Pour les traitements 7 à 9, le FertiRoc® est appliqué au deuxième noeud (DN) à la place du tallage.

Les stades de développement BBCH où le FertiRoc® est appliqué en deux fractions sont : la première est celui du redressement-début montaison (R) (BBCH 30) et la seconde celui du deuxième noeud pour les objets 10 à 12. Pour les traitements 13 à 15, la seconde fraction est apportée à la dernière feuille (BBCH 39).

Dispositif expérimental

Sur la figure 4.5 représentant le dispositif expérimental de l'essai PN, le numéro de la parcelle et le numéro de l'objet (traitement) sont respectivement écrits en bleu et rouge. Il composé de cinq hauteurs numérotée de 3800 à 4200 et d'une longueur de douze parcelles. Par conséquent, ce dispositif expérimental est en blocs aléatoires complets constitué de 15 objets (traitements) répétés à 4 reprises formant ainsi 60 parcelles. L'unité expérimentale est donc une parcelle.

	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64
	4253	4254	4255	4256	4257	4258	4259	4260	4261	4262	4263	4264
4200	1	10	9	1	8	6	15	8	1	1	7	11
	4153	4154	4155	4156	4157	4158	4159	4160	4161	4162	4163	4164
4100	15	12	5	11	5	9	14	13	11	3	4	6
	4053	4054	4055	4056	4057	4058	4059	4060	4061	4062	4063	4064
4000	4	3	11	15	13	10	10	9	7	12	10	5
	3953	3954	3955	3956	3957	3958	3959	3960	3961	3962	3963	3964
3900	7	13	6	2	7	4	4	3	12	9	2	13
	3853	3854	3855	3856	3857	3858	3859	3860	3861	3862	3863	3864
3800	8	14	2	12	3	14	5	2	6	15	14	8
		Bloc 1			Bloc 2			Bloc 3			Bloc 4	

FIGURE 4.5 – Dispositif expérimental de l'essai PN

Application du FertiRoc® en pratique

L'application du FertiRoc® se réalise à l'aide d'un pulvérisateur à dos (figure 4.6). La bouillie est préparée à raison de 50 gr dans 10 L d'eau. Elle est ensuite stockée dans une petite citerne située dans le dos de l'opérateur qui tient la rampe. Un second opérateur se trouve à l'autre extrémité de la rampe afin de la maintenir alignée parallèlement au sol. Elle est dimensionnée pour les parcelles d'essais et fait 2,05 m de large et est équipée de 3 buses. Le pulvérisateur est réglé à une pression de 2,2 bars et la vitesse d'avancée de l'opérateur est de 1m/s. Une zone d'amorçage et une de désamorçage sont prévues afin de garantir un débit constant au moment de l'application sur la parcelle évaluée.



FIGURE 4.6 – Photographie de la pulvérisation du FertiRoc®

Les conditions météorologiques, en particulier la vitesse moyenne du vent sont vérifiés avant chaque application. L'interdiction de la pulvérisation à une vitesse supérieure de 20 km/h est respectée. En plus de la vitesse du vent, la température et l'humidité relative de l'air sont les principaux facteurs influençant la dérive. Même si ils ne peuvent pas être maîtrisés, il importe de les prendre en considération avant tout traitement.(PROTECT'EAU 2024)

Le FertiRoc® a été donc été appliqué de manière indépendante à l'ammonitrate N27 se trouvant sous forme solide. Toutefois, la zéolithe et les fractions de fertilisation azotée ont été apportés le même jour excepté à la 1ère application. Il y a eu un décalage de 3 jours. Pour les essais fumures comme l'essai PN, le CEPICOP travaille systématiquement en solide avec de l'ammonitrate (N27 %) car il est facile à utiliser en micro-parcelle et est moins sensible à la volatilisation que de l'engrais liquide.

Pour une adaptabilité aux réalités de travail dans les exploitations agricoles, l'idéal serait de pouvoir combiner le passage de l'azote avec la zéolithe ; du moins pour les deux premières fractions car l'ammonitrate peut être appliquée sous forme liquide par pulvérisation. Sinon, cela entraînerait une démultiplication des passages au champs : augmentation du besoin en main d'oeuvre, de la consommation de mazout et de l'usure du matériel agricole.

4.4 Observations et paramètres mesurés

L'objectif des observations et de la mesure de paramètres est de collecter des données dont le traitement apporte des éléments de réponses à la question de recherche. Il est donc important de s'assurer de la pertinence des mesures prises.

Les parcelles de l'essai sont dites "destructives". Cela implique que la biomasse prélevées durant la campagne de mesures provient de ces parcelles. Par conséquent, l'essai ne comporte pas de parcelles "rendements moissonneuses".

TABLE 4.8 – Synthèse des mesures

Mesure	Stade BBCH						Nombre de mesures/parcelle
	30	32	39	55	65	89	
Stades phénologiques	x	x	x	x	x	x	2
Densité de plantes	x		x		x		2
Densité des talles	x		x		x		2
Densité d'épis					x	x	3
Couverture foliaire	x	x	x		x	x	2
Indice de surface foliaire			x				1
Activité photosynthétique	x	x	x		x	x	4
N exporté		x			x		1
Biomasse aérienne	x	x	x		x	x	1
Maladies		x		x			5
Rendement méthodologique						x	1

4.4.1 Stades phénologiques

L'évaluation de la phénologie du froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.) s'est opérée à chaque moment de prise de mesures pour s'assurer que le stade souhaité était bien atteint selon l'échelle BBCH améliorée (annexe B) et selon le protocole suivant :

1. Prédiction du stade phénologique par le modèle de l'outil d'aide à la décision (OAD-Phénoblé)
2. Confirmation sur le réseau de parcelles de l'essai PN par le biais d'observations sur pieds et dissections de maître brins sur des plantes prélevées au champs
3. En cas de confirmation du stade : application du schéma de fertilisation et collecte de données clés relatives au stade désiré.

4.4.2 Densité de plantes, de talles et d'épis

Les densités de plantes, de talles et d'épis sont des composantes déterminant le rendement. (ARVALIS 2022)

4.4.3 Couverture foliaire

Canopeo® est un outil de mesure rapide, simple et précis du couvert végétal. Il s'agit d'une application utilisée pour quantifier le pourcentage de couverture foliaire verte vivante pour toute culture agricole, gazon ou prairie, en se basant sur des photos orientées vers le bas prises avec un appareil mobile. Cette application comporte une classification automatique des pixels par seuil de couleur. L'analyse des images est une opération binaire où les pixels blancs se rapportent à ceux répondant aux critères de sélection, à savoir la verdure de la canopée pouvant varier de 0 à 100 %. (PATRIGNANI et OCHSNER 2015) (figure 4.7)

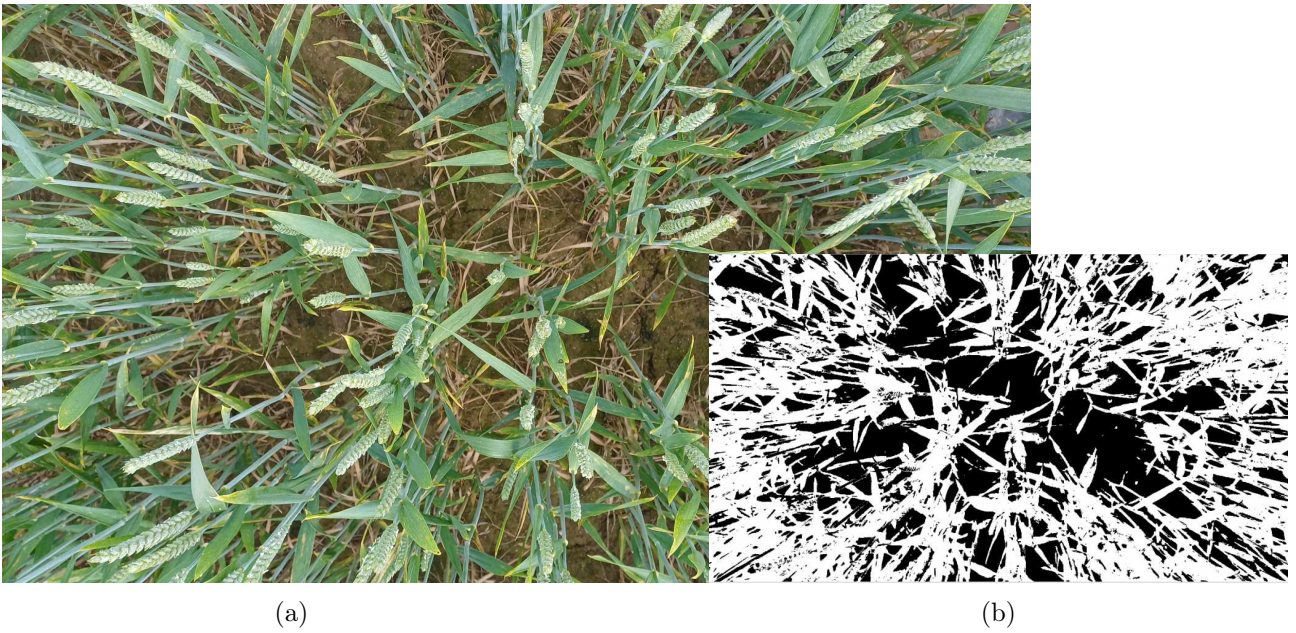


FIGURE 4.7 – Interprétation de la couverture foliaire avec Canopeo®. Sur cet exemple, la couverture foliaire est de 34.17 %

4.4.4 Index de surface foliaire (LAI)

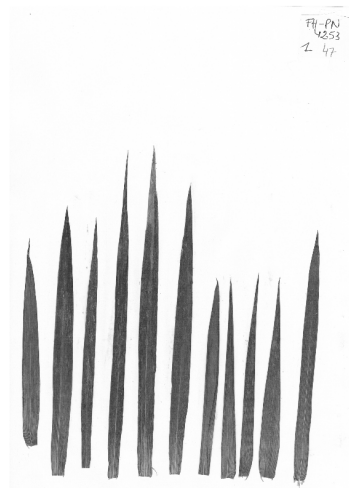
Le calcul de l'indice de surface foliaire consiste en la détermination de la surface totale de toutes les feuilles. Cette mesure permet d'établir un lien entre l'apport de la fumure selon le schéma de fertilisation décrit et le développement de la surface foliaire. Elle a été réalisé pour le stade BBCH 39.

L'estimation de ce paramètre nécessite un prélèvement foliaire. La surface foliaire a été prélevée sur 50 cm sur la sixième ligne à partir du bord de la parcelle, à la suite de des lignes de biomasse prélevée à ce même stade. Une fois la collecte des plantes réalisée, celles-ci sont décortiquées dans l'optique de séparer les feuilles des tiges. Les feuilles ont été ensuite étalées et collées sur des pages A4 blanches (figure XXX). Ensuite, les pages A4 ont été scannées à l'aide d'une imprimante de type Brother DCP-J315 à une résolution de 300 dpi. (figure XXX)

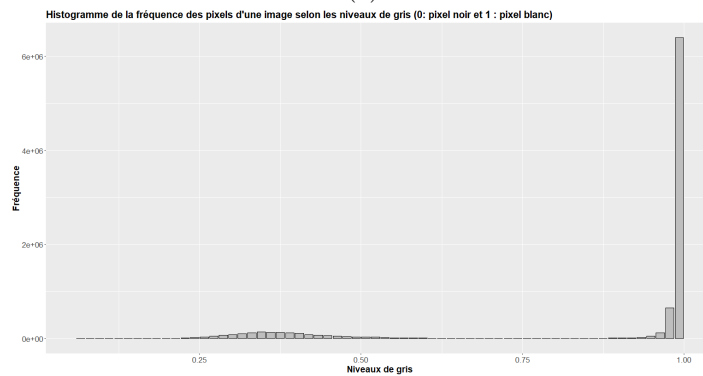
Le traitement des images a été réalisé au moyen du logiciel RStudio en utilisant le package EBIImage et la fonction channel().

Le calcul de l'index de surface foliaire est présenté à l'équation 4.1 où S_i est la surface d'un pixel, i les pixels gris et S_r la surface de référence.

$$LAI = \frac{\sum_i S_i}{S_r} \quad (4.1)$$



(a)



(b)

FIGURE 4.8 – Image traitée en différents niveaux de gris (a) ; Histogramme de la fréquence des pixels (b)

4.4.5 Activité photosynthétique

L'activité photosynthétique a été mesurée au moyen de l'analyseur d'efficacité des plantes (PEA) : le fluorimètre "Handy-pea" dont la description se retrouve à l'annexe B.annexe D. L'objectif de cette observation est d'évaluer la performance chlorophyllienne du blé d'hiver soumis à différents traitements de fertilisation. Cela revient à définir : *"la capacité d'absorption de l'énergie lumineuse par l'antenne LHC et l'efficacité avec laquelle l'énergie absorbée est utilisée pour la photochimie"*. (DIGRADO 2018) Par conséquent, l'étude de la fluorescence émise par la feuille fournit un aperçu de la structure, du fonctionnement et de la régulation de l'appareil photosynthétique, de l'antenne complexe et des photosystèmes (MAXWELL et JOHNSON 2000).

Le fluorimètre est composé d'un capteur équipé d'un ensemble de 3 LED dotées d'un filtre optique qui permet d'obtenir une longueur d'onde de pointe de 650 nm : une valeur idéale pour la chlorophylle qui l'absorbe aisément. Les pinces à feuilles sont équipées d'un petit volet qui peut être fermé pour adapter à l'obscurité la zone de la feuille exposée par un trou de 4 mm de diamètre. Elles ont été conçues pour s'adapter à la tête de capteur. Celles-ci sont placées sur la dernière feuille étalée à une distance de 5 cm à partir de l'extrémité pointante de la feuille.

L'activité photosynthétique a été mesurée à chaque prélèvement de biomasse à savoir au stade BBCH 30, 32, 39 et 65. Pour limiter la variation dans la prise mesure, deux facteurs sont à considérer : le moment de la journée de la prise de mesures et les conditions météorologiques. Comme

le souligne Anthony Digrado dans sa thèse, (DIGRADO 2018), "les réactions primaires de la photosynthèse jouent un rôle crucial et sont sensibles aux facteurs environnementaux. Lorsque les conditions sont défavorables, la faculté des plantes à absorber et à exploiter l'énergie lumineuse peut être perturbée, ce qui se traduit par une baisse générale de la capacité photochimique". En outre, il mentionne également que "L'évaluation de la capacité photochimique d'un écosystème est fastidieuse, car elle nécessite un grand nombre de mesures pour tenir compte de la variation spatiale et temporelle de cette caractéristique." Pour pallier à ces deux variables et dans la mesure du possible, la prise de mesure s'est réalisée durant la période diurne dans l'après-midi, et en période ensoleillée. Le nombre d'observations est élevé à 4 par parcelle pour un total de 240 observations par stade BBCH.

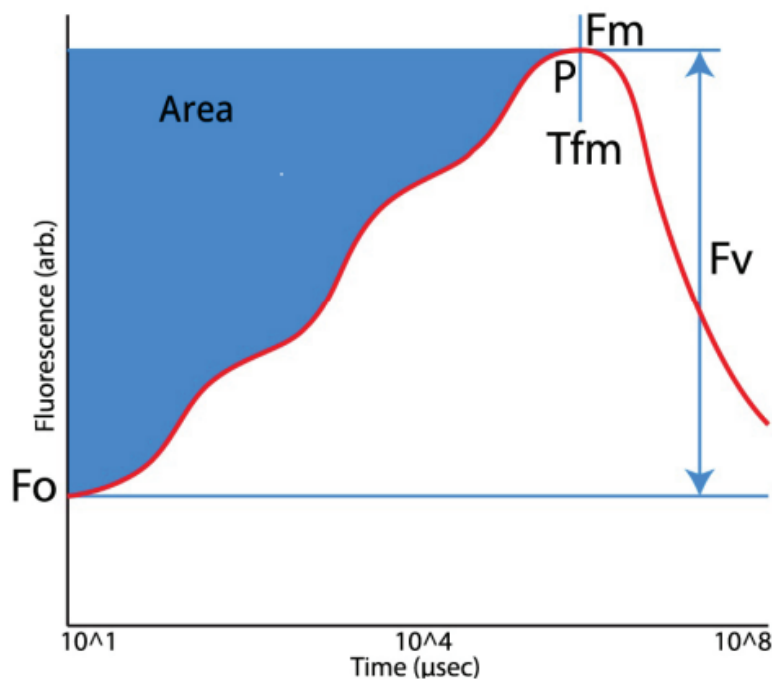


FIGURE 4.9 – Graphe du paramètre de fluorescence en fonction de la durée de prise d'une mesure (HANSATECH 2024)

4.4.6 Dosage de l'azote dans la plante : N Uptake

Pour déterminer la teneur en azote de chaque échantillon, la méthode Dumas par combustion sèche selon la norme NF EN ISO 16634-1 a été appliquée par le laboratoire d'analyse du Centre Provincial de l'Agriculture et de la Ruralité (CPAR).(CPAR 2024) Pour ce faire, l'ensemble des échantillons ont subi un pré-traitement : un premier broyage à l'aide d'un broyeur à couteaux et un second au cyclotec afin d'obtenir une poudre fine de 1 mm d'épaisseur.

4.4.7 Prélèvement de biomasse en dynamique

Les prélèvements de biomasse aérienne ont eu lieu à 5 stades physiologiques clés : redressement (Z30), deuxième noeud (Z32), dernière feuille (Z39), floraison (Z65) et maturité (Z89). La biomasse aérienne a été prélevée dans des quadrats de 50 centimètre de long sur une hauteur de 3 lignes de semis, soit une surface de 0,2190 m². Les plantes ont été arrachées manuellement sur toute la surface. Les échantillons ont été identifiés et placés dans des sacs microperforés. Après la pesée de la biomasse fraîche, ils ont ensuite été placés à l'étuve pendant 72h à une

température de 65°C jusqu'à l'obtention d'un poids constant. Le protocole habituellement réalisé dans l'unité de phytotechnie tempérée a été préférentiellement choisi. La biomasse sèche a ensuite été pesée et transformée en tonnes par hectare.

4.4.8 Rendement approximé

Bien que l'essai ne comporte pas de parcelles "rendements moissonneuses, un rendement peut être approximé en mesurant la différence entre la biomasse des épis à maturité et celle à floraison.

4.4.9 Cotations foliaires des maladies

Le choix des stades de la cotation des symptômes des maladies foliaires pour la septoriose et la rouille brune s'est basée sur l'observation au champs, les avertissements du CEPICOP ainsi que la période d'infection de ces dernières (figure 4.10). L'objectif de cette cotation est d'évaluer le potentiel de la protection du biostimulant des maladies foliaires.

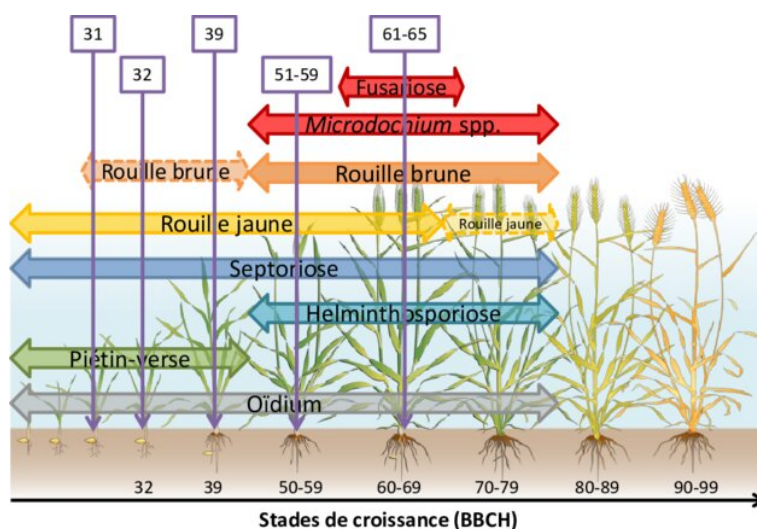


FIGURE 4.10 – Période d'infection des principales maladies en blé (flèches horizontales) et stades de croissance clé de la protection fongicide en blé (flèches verticales) (DUVIVIER et al. 2018)

La première étape consiste à analyser les brins principaux pour évaluer le stade de développement du blé et identifier à quelle feuille définitive correspond la dernière feuille pointante (voir Figure 13). En effet, puisque la première évaluation a été faite au stade du deuxième nœud (Z32), la dernière feuille pointante est l'avant-dernière feuille (F2 définitive). Il est donc nécessaire de compter les feuilles encore présentes dans la gaine pour déterminer à quelles feuilles définitives correspondent les feuilles déployées.

Chaque feuille du maître brin est évaluée individuellement pour les deux maladies observées : la septoriose et la rouille brune. Les évaluations ont été réalisées au stade deuxième nœud (Z32) et mi-épiaison (Z55) en utilisant l'échelle de cotation de Koyshibayev et Muminjanov (2016). Une cote de 0 à 100 % est attribuée en fonction de la gravité de la maladie. Pour la septoriose, la cotation se base sur la surface totale des taches brunâtres, y compris les zones sans pycnides, comme illustré dans la figure 4.11. Pour la rouille brune, la superficie occupée par les pustules est évaluée selon la figure 4.12 et l'échelle B. Les cotations sont effectuées à l'œil nu et, si nécessaire, à l'aide d'un binoculaire.

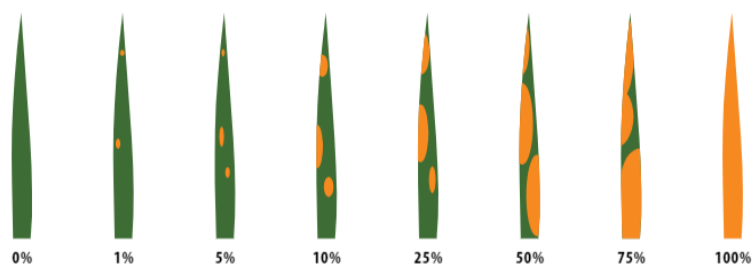


FIGURE 4.11 – Échelle de cotation pour la septoriose (MUMINJANOV et KOYSHIBAYEV 2016)

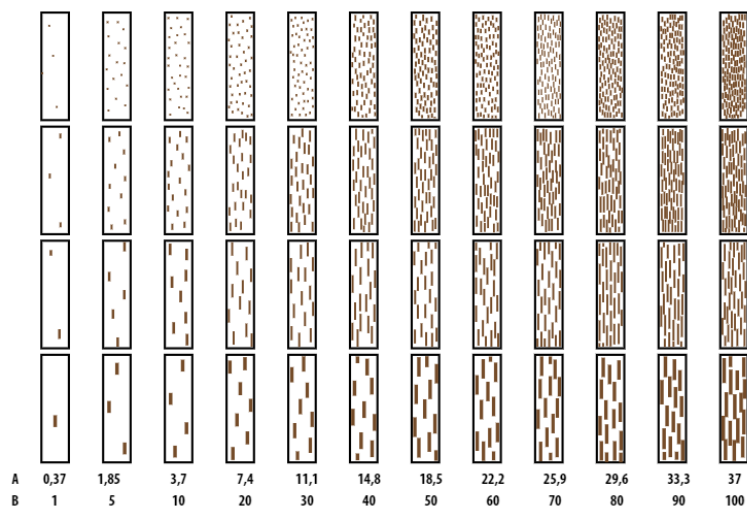


FIGURE 4.12 – Échelle de cotation pour les rouilles (MUMINJANOV et KOYSHIBAYEV 2016)

4.5 Sources de variations : Facteurs étudiés

4.5.1 Facteurs fixes

L'essai PN permet de retirer trois facteurs fixes, donc maîtrisés. Ils sont énumérés et décrits ci-dessous.

1. La fertilisation azotée (**F**) : 3 modalités : 3*0 U.N. , 3*40 U.N. et 3*60 U.N.
2. Le biostimulant FertiRoc® à base de Zéolithe (**PN**) : 3 modalités : 0*1 kg/ha, 2*1 kg/ha et 3*1 kg/ha
3. L'application du FertiRoc® à des stades phénologiques clés du blé d'hiver (5 modalités) : (**stades d'application PN**) : tallage (T), redressement (R), deuxième noeud (DN) et dernière feuille (DF)

4.5.2 Facteur aléatoire (non contrôlé)

Un facteur aléatoire est à considérer dans la conception du dispositif afin de contrôler la variabilité expérimentale et augmenter la précision des estimations des effets des traitements. Ces derniers ont été répartis de manière aléatoire à l'intérieur de chaque bloc, assurant ainsi que chaque traitement est représenté dans chaque bloc. Par conséquent, l'analyse des effets des traitements est plus précise et la puissance statistique de l'étude est augmentée.

1. Bloc : 4 blocs aléatoires complets

4.6 Analyse des données

Analyse univariée

Pour analyser les données collectées dans cette étude, un modèle linéaire à effets mixtes (LMER) a été utilisé. Le choix de cette méthode est motivé par sa capacité à intégrer à la fois des effets fixes et effets aléatoires. Après avoir ajusté le modèle LMER, nous avons réalisé une analyse de la variance univariée (ANOVA) sur les effets fixes du modèle. Cette étape a été réalisée pour tester la significativité statistique des effets fixes, c'est-à-dire pour évaluer si les variations observées dans les mesures de réponse peuvent être attribuées aux variables explicatives d'intérêt, plutôt qu'à la variabilité aléatoire. L'ANOVA dans ce contexte permet d'obtenir des valeurs p associées aux termes fixes du modèle, fournissant une mesure de l'évidence statistique contre l'hypothèse nulle d'absence d'effet.

Pour assurer la validité des résultats obtenus via l'ANOVA, deux conditions fondamentales d'application (CA) ont été vérifiées sur les résidus du modèle : la normalité des résidus et l'homogénéité des variances. Les résultats des CA sont visibles à l'annexe C sur les figure E.1 et figure E.2.

Pour l'ensemble des hypothèses, le niveau de significativité est -fixé par une p-valeur inférieure à 0,05. En cas d'interaction entre des facteurs, l'analyse est poursuivie par une décomposition en plusieurs ANOVA à un ou deux facteurs selon pertinence des facteurs étudiés et de l'objectif poursuivi. En outre, pour chaque ANOVA, un test complémentaire de type Emmeans (emm) est réalisé.

TABLE 4.9 – Synthèse des variables étudiées à l'aide de tests de significativité

Mesures	Facteur	Analyse et tests complémentaires
Densité de plantes	Fertilisation PN Stades d'application PN	Anova de modèles LMER & Test emmeans
Densité des talles		
Densité des épis		
Couverture foliaire		
Indice de surface foliaire		
Activité photosynthétique		
N prélevé		
Biomasse aérienne		
Rendement approximé		

Analyse multivariée

Ensuite, une analyse multivariée a été réalisée : une Analyse en Composantes Principales (ACP). Cette technique permet de visualiser les relations entre les variables au moyen d'un cercle de corrélation, mettant en évidence les associations existantes. En complément, des ellipses de confiance ont été ajoutées aux graphiques issus de l'ACP. Ces ellipses facilitent la compréhension de la dispersion des données autour des composantes principales pour les différents facteurs et permettent de visualiser la concentration des données ainsi que les regroupements ou tendances significatives. Elles peuvent aider à détecter des structures ou des regroupements dans les données, en mettant en évidence les directions principales de variation qui pourraient ne pas être évidentes dans l'espace d'origine. Elles offrent ainsi une perspective supplémentaire sur la manière dont les variables interagissent entre elles et renforcent l'interprétation des résultats en montrant la variabilité et la signification des facteurs dans le jeu de données.

Courbe critique de dilution de l'azote

La courbe critique de dilution de l'azote qui représente la concentration minimale d'azote total requise dans la plante pour atteindre la production maximale de matière sèche. Elle indique le niveau d'azote à partir duquel une augmentation de la fertilisation azotée n'entraîne plus de hausse significative de la matière sèche aérienne, bien que la plante continue d'absorber et d'accumuler de l'azote (JUSTES et al. 1994).

La formule permettant de la construire en se basant sur la méthodologie de JUSTES et al. 1994 est présentée à l'équation 4.2 où N est la concentration critique d'azote dans la plante (%) et WS la biomasse sèche en (T/ha).

$$N = 5.35 * WS^{-0.442} \quad (4.2)$$

Cette courbe a été réalisée dans le but d'identifier l'état nutritif azoté du blé et de constater les différences entre les traitements.

Logiciel et Packages utilisés pour réaliser les analyses statistiques

Le logiciel statistique Rstudio de la (version 2023.12.0+369 : 4.3.1) a été utilisé pour traiter les données collectées sur l'ensemble du suivi de l'expérimentation.

Les différents graphiques présentés dans la partie résultats à l'aide des packages suivants : ggplot2, ggfortify et ggforce.

Pour l'application du modèle LMER défini sur R, les packages suivants ont servis : lme4, lmerTest, car, multcompView, multcomp. Le package Lme4 est essentiel pour l'ajustement de modèles linéaires mixtes et permet de définir la fonction lmer.

Afin d'évaluer de manière robuste les conditions d'applications, le package DHARMA (Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level / Mixed) Regression Models) qui permet de simuler des résidus standardisés a été utilisé. En générant des résidus simulés, l'objet simulationOutput obtenu nous a permis de comparer les résidus observés à une distribution théorique attendue. Cette méthode offre une visualisation claire des écarts éventuels par rapport aux hypothèses de normalité et d'homogénéité des variances, et facilite l'identification de tout comportement anormal des résidus. Ces vérifications ont été réalisées par une inspection visuelle des résidus, adaptée en raison du faible nombre d'observations dans l'étude, ce qui pourrait rendre les tests formels moins fiables.

Le test complémentaire emmeans se réalise au moyen du package emmeans. Il a la faculté de calculer les moyennes marginales estimées et les contrastes.

La PCA s'est établie à l'aide des packages FactoMineR et factoextra. Ce premier spécialement conçu pour les analyses multivariées. Il fournit des outils pour effectuer la PCA et interpréter les résultats.

Chapitre 5

Résultats et discussion

5.1 Rappel des objectifs

Pour la section se référant aux résultats, il a été choisi de s'orienter sur une présentation par objectif qui, pour rappel, sont les suivants :

1. Évaluer l'effet de l'application de FertiRoc® seul ou en combinaison avec un complément minéral sur la nutrition du froment d'hiver.
2. Évaluer l'effet du positionnement du FertiRoc® appliqué à trois stades distincts : Tallage, Redressement, et Dernière feuille, sur la croissance et la nutrition du froment d'hiver.
3. Évaluer l'impact de l'omission de FertiRoc® aux stades Dernière feuille et Deuxième nœud sur la croissance et la nutrition du froment d'hiver.

5.2 Résultats des tests de significativité des facteurs

5.2.1 Résultats des tests de significativité du facteur traitement

Lors de la réflexion de l'analyse univariée des données collectées, il a d'abord été décidé de procéder à une analyse préliminaire univariée en se concentrant sur le facteur "traitement". Cette étape vise à fournir un premier diagnostic des données. Le tableau 5.1 synthétise les effets du facteur traitement.

TABLE 5.1 – Résultats de la significativité du facteur traitement (Légende : *** : p-valeur très hautement significative, ** : p-valeur hautement significative, * : p-valeur valeur significative, . : p-valeur proche du seuil de significativité)

Variable	Traitement
Densité de plantes Z30	.
Densité de talles Z30	**
Densité de plantes Z39	**
Densité de talles Z39	***
Densité d'épis Z65	***
Densité d'épis Z89	***
Biomasse Totale Z30	*
Biomasse Totale Z32	***
Biomasse Totale Z39	***
Biomasse Totale Z65	***
Biomasse Totale Z89	***
Biomasse Feuilles Z39	***
Biomasse Feuilles Z65	***
Biomasse Feuilles - Tiges Z89	***
Biomasse Tiges Z39	***
Biomasse Tiges Z65	***
Biomasse Epis Z65	***
Biomasse Epis Z89	***
Couverture foliaire Z30	***
Couverture foliaire Z32	***
Couverture foliaire Z39	***
Couverture foliaire Z65	***
Indice de surface foliaire (LAI) Z39	***
Activité photosynthétique FV/FM Z30	/
Activité photosynthétique FV/FM Z32	/
Activité photosynthétique FV/FM Z39	.
Activité photosynthétique FV/FM Z65	/
N Z32	***
N 65	***
N Feuilles Z65	***
N Tiges Z65	***
N Epis Z65	***

5.2.2 Résultats des tests de significativité des facteurs fertilisation, PN et stades d'applications du PN

Ensuite, une analyse de la variance pour l'ensemble des facteurs a été appliquée à l'aide d'un modèle partiellement hiérarchisé de type III. En effet, les facteurs fertilisation et PN sont croisés, de même que les facteurs fertilisations et stades d'applications du PN. Cependant, les facteurs PN et stades d'application du PN sont hiérarchisés. Donc l'interaction a testée entre les facteurs croisés et les effets principaux de chaque facteur a été testée en prenant en compte la hiérarchisation du facteur stade par rapport au niveau de PN. Le tableau 5.2 reprend la significativité pour les effets des facteurs et leur interactions pour les variables mesurées des traitements 1 à 9.

TABLE 5.2 – Résultats de la significativité des facteurs fertilisation, PN, stades d'application PN (Légende : *** : p-valeur très hautement significative, ** : p-valeur hautement significative, * : p-valeur valeur significative, . : p-valeur proche du seuil de significativité)

Variable	Interaction		Stades d'application_PN	PN	Fertilisation
	Fertilisation*Stades d'application_PN	Fertilisation *PN			
Densité de plantes Z30	/	/	/	/	*
Densité de talles Z30	/	/	/	/	***
Densité de plantes Z39	/	/	*	*	***
Densité de talles Z39	/	/	/	/	***
Densité d'épis Z65	**	/	**	/	***
Densité d'épis Z89	/	/	/	/	***
Biomasse Totale Z30	/	/	*	/	*
Biomasse Totale Z32	/	/	*	/	***
Biomasse Totale Z39	***	/	/	/	***
Biomasse Totale Z65	*	/	/	/	***
Biomasse Totale Z89	/	/	/	/	***
Biomasse Feuilles Z39	***	/	***	/	***
Biomasse Feuilles Z65	***	/	/	/	***
Biomasse Tiges Z39	**	/	/	/	***
Biomasse Tiges Z65	.	/	/	/	***
Biomasse Tiges-Feuilles Z89	/	/	/	/	***
Biomasse Epis Z65	/	/	.	/	***
Biomasse Epis Z89	/	/	/	/	***
Couverture foliaire Z30	***	/	***	/	***
Couverture foliaire Z32	***	**	***	/	***
Couverture foliaire Z39	/	*	/	/	***
Couverture foliaire Z65	*	/	**	/	***
Indice de surface foliaire (LAI) Z39	/	***	/	/	***
Activité photosynthétique FV/FM Z30	/	/	/	/	.
Activité photosynthétique FV/FM Z32	/	/	*	/	***
Activité photosynthétique FV/FM Z39	/	/	/	/	**
Activité photosynthétique FV/FM Z65	/	/	/	*	/
N Z32	/	/	/	/	***
N 65	/	.	/	/	***
N Feuilles Z65	/	/	/	*	***
N Tiges Z65	/	.	.	/	***
N Epis Z65	/	/	/	.	***
Rendement approximé	/	/	/	/	***

5.2.3 Résultats des tests de significativité de l'ajout du FertiRoc®

Afin de répondre au premier objectif, qui est d'évaluer l'effet de l'application de FertiRoc® seul ou en combinaison avec un complément minéral sur la nutrition du froment d'hiver, les traitements 1 à 6 ont été analysés. Cette analyse est réalisée à l'aide d'une analyse de variance à deux facteurs croisés, où les facteurs sont la fertilisation azotée et l'application du biostimulant FertiRoc®. Cette approche permet d'évaluer non seulement les effets individuels de chaque facteur mais aussi leurs interactions sur la croissance et la nutrition de la culture. Le tableau 5.3 reprend la significativité pour les effets des facteurs et leur interactions pour les variables mesurées des traitements 1 à 6.

TABLE 5.3 – Résultats de la significativité des facteurs fertilisation et PN pour les traitements 1 à 6 (Légende : *** : p-valeur très hautement significative, ** : p-valeur hautement significative, * : p-valeur valeur significative, . : p-valeur proche du seuil de significativité)

Variable	Interaction Fertilisation PN	PN	Fertilisation
Densité de plantes Z30	/	/	*
Densité de talles Z30	/	/	*
Densité de plantes Z39	/	*	***
Densité de talles Z39	/	/	***
Densité d'épis Z65	/	/	***
Densité d'épis Z89	/	/	***
Biomasse Totale Z30	/	/	/
Biomasse Totale Z32	/	/	***
Biomasse Totale Z39	/	/	***
Biomasse Totale Z65	/	*	***
Biomasse Totale Z89	/	/	***
Biomasse Feuilles Z39	/	/	***
Biomasse Feuilles Z65	/	*	***
Biomasse Tiges Z39	/	/	***
Biomasse Tiges Z65	/	.	***
Biomasse Tiges-Feuilles Z89	/	/	***
Biomasse Epis Z65	/	*	***
Biomasse Epis Z89	/	/	***
Couverture foliaire Z30	.	/	***
Couverture foliaire Z32	***	.	***
Couverture foliaire Z39	***	/	***
Couverture foliaire Z65	*	/	***
Indice de surface foliaire Z39	***	*	***
Activité photosynthétique FV/FM Z30	/	.	.
Activité photosynthétique FV/FM Z32	/	/	.
Activité photosynthétique FV/FM Z39	/	*	***
Activité photosynthétique FV/FM Z65	/	/	***
Azote absorbé par la plante Z32	/	/	***
Azote absorbé par la plante Z65	.	/	***
Azote absorbé par les feuilles Z65	/	/	***
Azote absorbé par les tiges Z65	.	/	***
Azote absorbé par les épis Z65	/	/	***
Rendement approximé	/	/	***

Les tableau 5.4, tableau 5.5, tableau 5.6, tableau 5.7 et tableau 5.8 reprennent les moyennes et groupes des tests emmeans pour les variables pour les facteurs fertilisation et PN.

TABLE 5.4 – Moyennes et groupes des tests emmeans pour la variable biomasse pour le facteur fertilisation et PN pour les traitements 1 à 6 (Objectif 1)

Variable	Fertilisation *PN	Moyenne emmean	Fertilisation	Moyenne emmean	PN	Moyenne emmean
Biomasse totale Z30 (T/ha)	F0 *PN0 F40*PN0 F60*PN0 F0*PN3 F40*PN3 F60*PN3	1.86 a 2.11 a 1.86 a 1.81 a 1.82 a 2.12 a	F0 F40 F60	1.84 a 1.96 a 1.99 a	PN0 PN3	1.95 a 1.92 a
Biomasse totale Z32 (T/ha)	F0 *PN0 F40*PN0 F60*PN0 F0*PN3 F40*PN3 F60*PN3	2.39 a/b 3.68 c 3.42 c 2.19 a 3.49 c 3.29 b/c	F0 F40 F60	2.29 a 3.35 b 3.58 b	PN0 PN3	3.16 a 2.99 a
Biomasse totale Z39 (T/ha)	F0 *PN0 F40*PN0 F60*PN0 F0*PN3 F40*PN3 F60*PN3	3.35 a 6.94 b 7.22 b 4.07 a 7.05 b 7.29 b	F0 F40 F60	3.71 a 7.00 b 7.26 b	PN0 PN3	5.84 a 6.14 a
Biomasse totale Z65 (T/ha)	F0 *PN0 F40*PN0 F60*PN0 F0*PN3 F40*PN3 F60*PN3	5.68 a 11.13 a 10.51 b 6.49 a 11.41 b 11.84 b	F0 F40 F60	6.08 a 11.18 b 11.27 b	PN0 PN3	9.11 a 9.91 b
Biomasse totale Z89 (T/ha)	F0 *PN0 F40*PN0 F60*PN0 F0*PN3 F40*PN3 F60*PN3	8.43 a 15.64 b 17.35 b 9.14 a 15.35 b 17.31 b	F0 F40 F60	8.78 a 15.49 b 17.33 b	PN0 PN3	13.8 a 13.9 a
Biomasse feuilles Z39 (T/ha)	F0 *PN0 F40*PN0 F60*PN0 F0*PN3 F40*PN3 F60*PN3	0.763 a 2.167 b 2.405 b 1.031 a 2.159 b 2.447 b	F0 F40 F60	0.897 a 2.163 b 2.426 b	PN0 PN3	1.78 a 1.88 a
Biomasse feuilles Z65 (T/ha)	F0 *PN0 F40*PN0 F60*PN0 F0*PN3 F40*PN3 F60*PN3	0.926 a 2.452 a 2.467 b 1.163 a 2.482 b 2.704 b	F0 F40 F60	1.04 a 2.47 b 2.59 b	PN0 PN3	1.95 a 2.12 a
Biomasse tiges Z39 (T/ha)	F0 *PN0 F40*PN0 F60*PN0 F0*PN3 F40*PN3 F60*PN3	2.58 a 4.77 b 4.81 a 3.04 a 4.90 b 4.84 b	F0 F40 F60	2.81 a 4.83 b 4.83 b	PN0 PN3	4.06 a 4.06 a
Biomasse tiges Z65 (T/ha)	F0 *PN0 F40*PN0 F60*PN0 F0*PN3 F40*PN3 F60*PN3	3.92 a 7.06 b 6.56 b 4.41 a 7.24 b 7.41 b	F0 F40 F60	4.17 a 6.99 b 7.15 b	PN0 PN3	5.85 a 6.35 a
Biomasse tiges-feuilles Z89 (T/ha)	F0 *PN0 F40*PN0 F60*PN0 F0*PN3 F40*PN3 F60*PN3	3.64 a 7.18 b 8.25 b 4.08 a 6.49 b 8.02 b	F0 F40 F60	3.86 a 6.84 b 8.13 c	PN0 PN3	6.20 a 6.36 a
Biomasse épis Z65 (T/ha)	F0 *PN0 F40*PN0 F60*PN0 F0*PN3 F40*PN3 F60*PN3	0.831 a 1.625 b 1.488 b 0.912 a 1.691 b 1.724 b	F0 F40 F60	0.871 a 1.658 b 1.606 b	PN0 PN3	1.31 a 1.44 b
Biomasse épis Z89 (T/ha)	F0 *PN0 F40*PN0 F60*PN0 F0*PN3 F40*PN3 F60*PN3	4.79 a 8.45 b 9.10 b 5.06 a 8.86 b 9.29 b	F0 F40 F60	4.92 a 8.65 b 9.20 b	PN0 PN3	7.45 a 7.73 a

TABLE 5.5 – Moyennes et groupes des tests emmeans pour les densités de plantes, talles et épis pour le facteur fertilisation et PN pour les traitements 1 à 6 (Objectif 1)

Variable	Fertilisation *PN	Moyenne emmean	Fertilisation	Moyenne emmean	PN	Moyenne emmean
Densité de plantes Z30 /m ²	F0 *PN0	144 a	F0 F40 F60	138 a 164 a/b 167 b	PN0 PN3	156 a 156 a
	F40*PN0	154 a				
	F60*PN0	171 a				
	F0*PN3	132 a				
	F40*PN3	173 a				
	F60*PN3	163 a				
Densité de plantes Z39 /m ²	F0 *PN0	122 a	F0 F40 F60	126 a 165 b 177 b	PN0 PN3	154 a 158 a
	F40*PN0	166 a/b				
	F60*PN0	187 b				
	F0*PN3	130 a/b				
	F40*PN3	164 a/b				
	F60*PN3	168 a/b				
Densité de talles Z30/m ²	F0 *PN0	480 a	F0 F40 F60	475 a 580 a/b 586 b	PN0 PN3	540 a 554 a
	F40*PN0	557 a				
	F60*PN0	584 a				
	F0*PN3	471 a				
	F40*PN3	615 a				
	F60*PN3	575 a				
Densité de talles Z39/m ²	F0 *PN0	247 a	F0 F40 F60	275 a 451 b 521 b	PN0 PN3	419 a 413 a
	F40*PN0	469 b/c				
	F60*PN0	541 c				
	F0*PN3	303 a/b				
	F40*PN3	433 b/c				
	F60*PN3	502 c				
Densité des épis Z65/m ²	F0 *PN0	228 a	F0 F40 F60	233 a 402 b 411 b	PN0 PN3	341 a 356 a
	F40*PN0	403 b				
	F60*PN0	393 b				
	F0*PN3	237 a				
	F40*PN3	401 b				
	F60*PN3	429 b				
Densité des épis Z89/m ²	F0 *PN0	229 a	F0 F40 F60	248 a 405 b 471 c	PN0 PN3	373 a 377 a
	F40*PN0	414 b				
	F60*PN0	475 b				
	F0*PN3	266 a				
	F40*PN3	396 b				
	F60*PN3	468 b				

TABLE 5.6 – Moyennes et groupes des tests emmeans pour les couvertures foliaires et l'indice de surface foliaire (LAI) pour le facteur fertilisation et PN pour les traitements 1 à 6 (Objectif 1)

Variable	Fertilisation *PN	Moyenne emmean	Fertilisation	Moyenne emmean	PN	Moyenne emmean
Couverture foliaire Z30 (%)	F0 *PN0	37.7 a	F0 F40 F60	39.9 a 60.8 b 66 .0 b	PN0 PN3	55.3 a 55.8 a
	F40*PN0	61.9 b				
	F60*PN0	66.4 b				
	F0*PN3	42.2 a				
	F40*PN3	59.7 b				
	F60*PN3	65.6 b				
Couverture foliaire Z32 (%)	F0 *PN0	31.0 a	F0 F40 F60	35.6 a 68.6 b 73.8 c	PN0 PN3	58.1 a 60.6 a
	F40*PN0	67.7 c				
	F60*PN0	75.5 d				
	F0*PN3	40.2 b				
	F40*PN3	69.5 cd				
	F60*PN3	72.2 cd				
Couverture foliaire Z39 (%)	F0 *PN0	47.7 a	F0 F40 F60	54.3 a 84.7 b 79.7 b	PN0 PN3	72.6 a 73.3 a
	F40*PN0	86.3 c				
	F60*PN0	83.8 c				
	F0*PN3	61.0 b				
	F40*PN3	83.2 c				
	F60*PN3	75.7 c				
Couverture foliaire Z65 (%)	F0 *PN0	49.6 a	F0 F40 F60	55.6 a 81.9 b 86.1 b	PN0 PN3	73.2 a 75.9 a
	F40*PN0	81.8 b				
	F60*PN0	88.2 b				
	F0*PN3	61.7 a				
	F40*PN3	82.0 b				
	F60*PN3	84.1 b				
Indice de surface foliaire Z39	F0 *PN0	0.973 a	F0 F40 F60	1.27 a 3.49 b 3.98 b	PN0 PN3	2.71 a 3.12 a
	F40*PN0	3.684 bc				
	F60*PN0	4.694 c				
	F0*PN3	1.574 a				
	F40*PN3	3.303 b				
	F60*PN3	3.265 b				

TABLE 5.7 – Moyennes et groupes des tests emmeans pour l'activité photosynthétique et l'azote absorbé pour le facteur fertilisation et PN pour les traitements 1 à 6 (Objectif 1)

Variable	Fertilisation *PN	Moyenne emmean	Fertilisation	Moyenne emmean	PN	Moyenne emmean
Activité photosynthétique Z30	F0 *PN0	0.814 a	F0 F40 F60	0.808 a 0.808 a 0.815 a	PN0 PN3	0.815 a 0.825 a
	F40*PN0	0.810 a				
	F60*PN0	0.823 a				
	F0*PN3	0.803 a				
	F40*PN3	0.806 a				
	F60*PN3	0.808 a				
Activité photosynthétique Z32	F0 *PN0	0.768 a	F0 F40 F60	0.768 a 0.789 a 0.780 a	PN0 PN3	0.777 a 0.781 a
	F40*PN0	0.784 a				
	F60*PN0	0.780 a				
	F0*PN3	0.768 a				
	F40*PN3	0.794 a				
	F60*PN3	0.780 a				
Activité photosynthétique Z39	F0 *PN0	0.819 a	F0 F40 F60	0.818 a 0.827 b 0.830 b	PN0 PN3	0.823 a 0.828 a
	F40*PN0	0.835 b				
	F60*PN0	0.829 a/b				
	F0*PN3	0.817 a				
	F40*PN3	0.825 a/b				
	F60*PN3	0.826 a/b				
Activité photosynthétique Z65	F0 *PN0	0.783 a	F0 F40 F60	0.779 a 0.799 b 0.806 b	PN0 PN3	0.794 a 0.795 a
	F40*PN0	0.798 a				
	F60*PN0	0.805 a				
	F0*PN3	0.775 a				
	F40*PN3	0.799 a				
	F60*PN3	0.808 a				
N absorbé par la plante Z32 en kg/ha	F0 *PN0	3.14 a	F0 F40 F60	3.15 a 9.04 b 9.70 b	PN0 PN3	7.45 a 7.15 a
	F40*PN0	9.34 b				
	F60*PN0	9.85 b				
	F0*PN3	3.16 a				
	F40*PN3	8.74 b				
	F60*PN3	9.55 b				
N absorbé par la plante Z65 en kg/ha	F0 *PN0	50.1 a	F0 F40 F60	55.4 a 175.1 b 199.5 c	PN0 PN3	140 a 147 a
	F40*PN0	180.0 a				
	F60*PN0	190.4 b/c				
	F0*PN3	60.7 a				
	F40*PN3	170.3 b				
	F60*PN3	208.6 c				
N absorbé par les épis Z65 en kg/ha	F0 *PN0	12.3 a	F0 F40 F60	12.8 a 28.9 b 29.0 b	PN0 PN3	22.7 a 24.4 a
	F40*PN0	28.7 b				
	F60*PN0	27.2 b				
	F0*PN3	13.4 a				
	F40*PN3	29.1 b				
	F60*PN3	30.8 b				
N absorbé par les -feuilles Z65 en kg/ha	F0 *PN0	16.3 a	F0 F40 F60	18.7 a 69.5 b 77.7 b	PN0 PN3	54.6 a 56.1 a
	F40*PN0	72.4 b				
	F60*PN0	75.1 b				
	F0*PN3	21.1 a				
	F40*PN3	66.6 b				
	F60*PN3	80.6 b				
N absorbé par les tiges Z65 en kg/ha	F0 *PN0	21.5 a	F0 F40 F60	23.9 a 76.7 b 92.6 c	PN0 PN3	62.9 a 66.0 a
	F40*PN0	78.9 b				
	F60*PN0	88.1 b/c				
	F0*PN3	26.3 a				
	F40*PN3	74.5 b				
	F60*PN3	97.1 c				

TABLE 5.8 – Moyennes et groupes des tests emmeans pour le rendement approximé pour le facteur fertilisation et PN pour les traitements 1 à 6 (Objectif 1)

Variable	Fertilisation *PN	Moyenne emmean	Fertilisation	Moyenne emmean	PN	Moyenne emmean
Rendement approximé	F0 *PN0	3.96 a	F0 F40 F60	4.05 a 7.00 b 7.59 b	PN0 PN3	6.13 a 6.29 a
	F40*PN0	6.83 b				
	F60*PN0	7.62 b				
	F0*PN3	4.15 a				
	F40*PN3	7.17 b				
	F60*PN3	7.56 b				

5.2.4 Résultats des tests de significativité de l'effet du positionnement du FertiRoc®

Dans l'optique de répondre au second objectif, qui est d'évaluer l'effet du positionnement de FertiRoc® seul ou en combinaison avec un complément minéral sur la nutrition du froment d'hiver, les traitements 4 à 9 ont été analysés. Cette analyse est réalisée à l'aide d'une analyse de variance à deux facteurs croisés, où les facteurs sont la fertilisation azotée et le stade de l'application du biostimulant FertiRoc®. Cette approche permet d'évaluer non seulement les effets individuels de chaque facteur mais aussi leurs interactions sur la croissance de la culture. Le tableau 5.9 reprend la significativité pour les effets des facteurs et leur interactions pour les variables mesurées des traitements 4 à 9. Les tableaux 5.10, tableau 5.11, tableau 5.12, tableau 5.13 et tableau 5.14 reprennent les moyennes et groupes des tests emmeans pour les variables pour les facteurs fertilisation et stades d'application PN.

TABLE 5.9 – Résultats de la significativité des facteurs fertilisation et stades d'application du PN pour les traitements 4 à 9 (Légende : *** : p-valeur très hautement significative, ** : p-valeur hautement significative, * : p-valeur valeur significative, . : p-valeur proche du seuil de significativité)

Variable	Interaction		Stades d'application PN	Fertilisation
	Fertilisation	Stades d'application PN		
Densité de plantes Z30	.	/	/	.
Densité de talles Z30	/	/	/	/
Densité de plantes Z39	/	*	*	***
Densité de talles Z39	/	/	/	***
Densité d'épis Z65	/	/	/	***
Densité d'épis Z89	/	/	/	/
Biomasse Totale Z30	/	/	/	*
Biomasse Totale Z32	/	/	/	***
Biomasse Totale Z39	/	/	/	***
Biomasse Totale Z65	/	/	/	***
Biomasse Totale Z89	/	/	/	/
Biomasse Feuilles Z39	/	/	/	***
Biomasse Feuilles Z65	/	/	/	***
Biomasse Tiges Z39	/	/	/	***
Biomasse Tiges Z65	/	/	/	***
Biomasse Tiges-Feuilles Z89	/	/	/	/
Biomasse Epis Z65	/	/	/	***
Biomasse Epis Z89	/	/	/	/
Couverture foliaire Z30	/	/	/	***
Couverture foliaire Z32	***	.	.	***
Couverture foliaire Z39	***	/	/	***
Couverture foliaire Z65	/	/	/	***
Indice de surface foliaire Z39	/	/	/	***
Activité photosynthétique FV/FM Z30	/	/	/	/
Activité photosynthétique FV/FM Z32	/	/	/	.
Activité photosynthétique FV/FM Z39	/	/	/	.
Activité photosynthétique FV/FM Z65	/	/	/	**
N Z32	/	/	/	***
N 65	.	/	/	***
N Feuilles Z65	.	/	/	***
N Tiges Z65	/	/	/	***
N Epis Z65	/	/	/	***
Rendement approximé	/	/	/	***

TABLE 5.10 – Moyennes et groupes des tests emmeans pour les densités de plantes, talles et épis pour le facteur fertilisation et stades d'application PN pour les traitements 4 à 9 (Objectif 2)

Variable	Fertilisation *Stades d'application PN	Moyenne emmean	Fertilisation	Moyenne emmean	Stades d'application PN	Moyenne emmean
Densité de plantes Z30 /m ²	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	154 a 158 a 149 a 132 a 173 a 163 a	F0 F40 F60	143 a 165 a 156 a	R-DN-DF T-R-DF	154 a 156 a
Densité de plantes Z39 /m ²	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	142 a 176 a 163 a 130 a 164 a 168 a	F0 F40 F60	136 a 165 a 170 a	R-DN-DF T-R-DF	154 a 160 a
Densité de talles Z30/m ²	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	531 a 555 a 541 a 471 a 615 a 575 a	F0 F40 F60	501 a 585 a 558 a	R-DN-DF T-R-DF	542 a 554 a
Densité de talles Z39/m ²	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	315 a 430 ab 521 b 303 a 433 ab 502 b	F0 F40 F60	262 a 400 b 443 b	R-DN-DF T-R-DF	413 a 422 a
Densité des épis Z65/m ²	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	287 a 398 b 457 b 237 a 401 b 429 b	F0 F40 F60	262 a 400 b 443 b	R-DN-DF T-R-DF	356 a 381 a
Densité des épis Z89/m ²	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	296 ab 347 abc 419 cd 266 a 396 bcd 468 d	F0 F40 F60	281 a 372 b 443 c	R-DN-DF T-R-DF	354 a 377 a

TABLE 5.11 – Moyennes et groupes des tests emmeans pour les biomasses pour le facteur fertilisation et stades d'application PN pour les traitements 4 à 9 (Objectif 2)

Variable	Fertilisation *Stades d'application PN	Moyenne emmean	Fertilisation	Moyenne emmean	Stades d'application PN	Moyenne emmean
Biomasse totale Z30 (T/ha)	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	1.59 a 1.68 a 2.04 a 1.81 a 1.82 a 2.12 a	F0 F40 F60	1.70 a 1.75 a 2.08 a	R-DN-DF T-R-DF	1.77 a 1.92 a
Biomasse totale Z32 (T/ha)	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	2.59 a 3.43 a 3.07 a 2.19 a 3.49 a 3.29 a	F0 F40 F60	2.39 a 3.46 b 3.18 b	R-DN-DF T-R-DF	3.03 a 2.99 a
Biomasse totale Z39 (T/ha)	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	4.19 a 6.66 b 7.26 b 4.07 a 7.05 b 7.29 b	F0 F40 F60	4.13 a 6.86 b 7.28 b	R-DN-DF T-R-DF	6.04 a 6.14 a
Biomasse totale Z65 (T/ha)	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	7.50 a 10.61 b 12.52 b 6.49 a 11.41 b 11.84 b	F0 F40 F60	6.99 a 11.01 b 12.18 b	R-DN-DF T-R-DF	10.21 a 9.91 a
Biomasse totale Z89 (T/ha)	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	10.68 ab 14.58 bc 16.12 c 9.14 a 15.35 c 17.31 c	F0 F40 F60	9.91 a 14.97 b 16.71 c	R-DN-DF T-R-DF	13.8. a 13.9 a
Biomasse feuilles Z39 (T/ha)	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	1.05 a 2.04 b 2.49 b 1.03 a 2.16 b 2.45 b	F0 F40 F60	1.04 a 2.10 b 2.47 c	R-DN-DF T-R-DF	1.86 a 1.88 a
Biomasse feuilles Z65 (T/ha)	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	1.31 a 2.15 b 2.94 c 1.16 a 2.48 bc 2.70 bc	F0 F40 F60	1.23 a 2.31 b 2.82 c	R-DN-DF T-R-DF	2.12 a 2.13 a
Biomasse tiges Z39 (T/ha)	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	3.14 a 4.62 b 4.77 b 3.04 a 4.90 b 4.84 b	F0 F40 F60	3.09 a 4.76 b 4.81 b	R-DN-DF T-R-DF	4.18 a 4.26 a
Biomasse tiges Z65 (T/ha)	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	5.12 a 6.82 b 7.78 b 4.41 a 7.24 b 7.41 b	F0 F40 F60	4.76 a 7.03 b 7.60 b	R-DN-DF T-R-DF	6.57 a 6.35 a
Biomasse tiges-feuilles Z89 (T/ha)	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	4.72 ab 6.39 bc 7.36 c 4.08 a 6.49 bc 8.02 c	F0 F40 F60	4.40 a 6.44 b 7.69 c	R-DN-DF T-R-DF	6.16 a 6.20 a
Biomasse épis Z65 (T/ha)	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	1.071 a 1.635 b 1.806 b 0.912 a 1.691 b 1.724 b	F0 F40 F60	0.992 a 1.663 b 1.765 b	R-DN-DF T-R-DF	1.50 a 1.44 a
Biomasse épis Z89 (T/ha)	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	5.96 a 8.19 bc 8.76 bc 5.06 a 8.86 c 9.29 c	F0 F40 F60	5.51 a 8.53 b 9.02 b	R-DN-DF T-R-DF	7.64 a 7.73 a

TABLE 5.12 – Moyennes et groupes des tests emmeans pour la couverture foliaire et l'indice de surface foliaire pour le facteur fertilisation et stades d'application PN pour les traitements 4 à 9 (Objectif 2)

Variable	Fertilisation *Stades d'application PN	Moyenne emmean	Fertilisation	Moyenne emmean	Stades d'application PN	Moyenne emmean
Couverture foliaire Z30 (%)	F0 *R-DN-DF	42.2 a	F0 F40 F60	43.2 a 59.0 b 65.3 b	R-DN-DF T-R-DF	55.8 a 55.8 a
	F40*R-DN-DF	58.3 b				
	F60*R-DN-DF	65.0 b				
	F0*T-R-DF	42.2 a				
	F40*T-R-DF	59.7 b				
	F60*T-R-DF	65.6 b				
Couverture foliaire Z32 (%)	F0 *R-DN-DF	41.3 a	F0 F40 F60	40.8 a 66.2 b 72.7 b	R-DN-DF T-R-DF	59.2 a 60.6 a
	F40*R-DN-DF	62.8 b				
	F60*R-DN-DF	73.3 b				
	F0*T-R-DF	40.2 a				
	F40*T-R-DF	69.5 b				
	F60*T-R-DF	72.2 b				
Couverture foliaire Z39 (%)	F0 *R-DN-DF	61.2 a	F0 F40 F60	61.1 a 77.8 b 80.8 b	R-DN-DF T-R-DF	73.1 a 73.3 a
	F40*R-DN-DF	78.3 a				
	F60*R-DN-DF	79.9 a				
	F0*T-R-DF	61.0 a				
	F40*T-R-DF	83.2 a				
	F60*T-R-DF	75.7 a				
Couverture foliaire Z65 (%)	F0 *R-DN-DF	60.3 a	F0 F40 F60	61.0 a 81.3 b 86.3 b	R-DN-DF T-R-DF	75.9 a 76.4 a
	F40*R-DN-DF	80.5 b				
	F60*R-DN-DF	88.5 b				
	F0*T-R-DF	61.7 a				
	F40*T-R-DF	82.0 b				
	F60*T-R-DF	84.1 b				
Indice de surface foliaire Z39	F0 *R-DN-DF	/	F0 F40 F60	/ 3.18 a /	R-DN-DF T-R-DF	/ 2.71 a
	F40*R-DN-DF	3.05 b				
	F60*R-DN-DF	/				
	F0*T-R-DF	1.57 a				
	F40*T-R-DF	3.30 b				
	F60*T-R-DF	3.26 b				

TABLE 5.13 – Moyennes et groupes des tests emmeans pour l'activité photosynthétique et l'azote prélevé pour le facteur fertilisation et stades d'application PN pour les traitements 4 à 9 (Objectif 2)

Variable	Fertilisation *Stades d'application PN	Moyenne emmean	Fertilisation	Moyenne emmean	Stades d'application PN	Moyenne emmean
Activité photosynthétique Z30	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	0.796 a 0.806 a 0.815 a 0.803 a 0.806 a 0.808 a	F0 F40 F60	0.800 a 0.806 a 0.811 a	R-DN-DF T-R-DF	0.806 a 0.806 a
Activité photosynthétique Z32	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	0.775 a 0.779 a 0.788 a 0.768 a 0.794 a 0.780 a	F0 F40 F60	0.771 a 0.784 a 0.786 a	R-DN-DF T-R-DF	0.781 a 0.781 a
Activité photosynthétique Z39	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	0.818 a 0.820 a 0.828 a 0.817 a 0.825 a 0.826 a	F0 F40 F60	0.818 a 0.822 ab 0.833 b	R-DN-DF T-R-DF	0.822 a 0.823 a
Activité photosynthétique Z65	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	0.768 a 0.789 a 0.794 a 0.775 a 0.799 a 0.808 a	F0 F40 F60	0.772 a 0.794 ab 0.801 b	R-DN-DF T-R-DF	0.784 a 0.794 a
N absorbé par la plante Z32 en kg/ha	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	/ 8.75 b / 3.16 a 8.74 b 9.55 b	F0 F40 F60	/ 8.74 a / / / /	R-DN-DF T-R-DF	/ 7.15 a / / / /
N absorbé par la plante Z65 en kg/ha	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	/ 155.8 b / 60.7 a 170.3 b 208.5 c	F0 F40 F60	/ 163 a / / / /	R-DN-DF T-R-DF	/ 147 a / / / /
N absorbé par les épis Z65 en kg/ha	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	/ 28.9 b / 13.4 a 29.1 b 30.8 b	F0 F40 F60	/ 29.1 a / / / /	R-DN-DF T-R-DF	/ 24.4 a / / / /
N absorbé par les feuilles Z65 en kg/ha	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	/ 56.6 b / 21.1 a 66.6 bc 80.6 c	F0 F40 F60	/ 72.4 a / / / /	R-DN-DF T-R-DF	/ 66 a / / / /
N absorbé par les tiges Z65 en kg/ha	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	/ 70.2 b / 26.3 a 74.5 b 97.1 c	F0 F40 F60	/ 61.6 a / / / /	R-DN-DF T-R-DF	/ 56.1 a / / / /

TABLE 5.14 – Moyennes et groupes des tests emmeans pour le rendement approximé pour le facteur fertilisation et stades d'application PN pour les traitements 4-9 (Objectif 2)

Variable	Fertilisation *Stades d'application PN	Moyenne emmean	Fertilisation	Moyenne emmean	Stades d'application PN	Moyenne emmean
Rendement approximé	F0 *R-DN-DF F40*R-DN-DF F60*R-DN-DF F0*T-R-DF F40*T-R-DF F60*T-R-DF	4.89 a 6.56 ab 6.95 ab 4.15 a 7.17 b 7.56 b	F0 F40 F60	4.52 a 6.86 b 7.26 b	R-DN-DF T-R-DF	6.13 a 6.29 a

5.2.5 Résultats des tests de significativité de l'effet de l'omission du FertiRoc®

Dans le but de répondre au troisième objectif, qui est d'évaluer l'effet de l'omission de FertiRoc® seul ou en combinaison avec un complément minéral sur la nutrition du froment d'hiver, les traitements 7 à 15 ont été analysés. Cette analyse est réalisée à l'aide d'une analyse de variance à deux facteurs croisés, où les facteurs sont la fertilisation azotée et le stade de l'application du biostimulant FertiRoc®. Cette approche permet d'évaluer non seulement les effets individuels de chaque facteur mais aussi leurs interactions sur la croissance de la culture. Le tableau 5.15 reprend la significativité pour les effets des facteurs et leur interactions pour

les variables mesurées des traitements 4 à 9. Les tableau 5.16, tableau 5.17, tableau 5.18, tableau 5.19 et tableau 5.20 reprennent les moyennes et groupes des tests emmeans pour les variables pour les facteurs fertilisation et stades d'application PN.

TABLE 5.15 – Résultats de la significativité des facteurs fertilisation et stades d'application du PN pour les traitements 7 à 15 (Légende : *** : p-valeur très hautement significative, ** : p-valeur hautement significative, * : p-valeur valeur significative, . : p-valeur proche du seuil de significativité)

Variable	Interaction		Stades d'application PN	Fertilisation
	Fertilisation	Stades d'application PN		
Densité de plantes Z30	/	/	/	/
Densité de talles Z30	/	/	*	*
Densité de plantes Z39	/	/	**	.
Densité de talles Z39	/	/	/	***
Densité d'épis Z65	**	**	***	***
Densité d'épis Z89	/	/	/	***
Biomasse Totale Z30	/	/	.	*
Biomasse Totale Z32	/	/	**	*
Biomasse Totale Z39	***	***	***	***
Biomasse Totale Z65	*	*	**	***
Biomasse Totale Z89	/	/	*	***
Biomasse Feuilles Z39	/	/	/	***
Biomasse Feuilles Z65	**	**	***	***
Biomasse Tiges Z39	***	***	.	***
Biomasse Tiges Z65	/	/	/	***
Biomasse Tiges-Feuilles Z89	/	/	*	***
Biomasse Epis Z65	.	.	***	***
Biomasse Epis Z89	/	/	.	***
Couverture foliaire Z30	***	***	***	***
Couverture foliaire Z32	***	***	***	***
Couverture foliaire Z39	/	/	/	***
Couverture foliaire Z65	**	**	***	***
Indice de surface foliaire Z39	/	/	/	***
Activité photosynthétique FV/FM Z30	/	/	/	*
Activité photosynthétique FV/FM Z32	/	/	**	***
Activité photosynthétique FV/FM Z39	/	/	/	/
Activité photosynthétique FV/FM Z65	/	/	/	/
Rendement approximé	/	/	/	***

TABLE 5.16 – Moyennes et groupes des tests emmeans pour les densités de plantes, talles et épis pour le facteur fertilisation et stades d'application PN pour les traitements 7 à 15 (Objectif 3)

Variable	Fertilisation *Stades d'application PN	Moyenne emmean	Fertilisation	Moyenne emmean	Stades d'application PN	Moyenne emmean
Densité de plantes Z30 /m ²	F0*R-DF	135 a	F0 F40 F60	143 a 149 a 153 a	R-DF R-DN R-DN-DF	140 a 151 a 154 a
	F40*R-DF	140 a				
	F60*R-DF	144 a				
	F0*R-DN	139 a				
	F40*R-DN	161 a				
	F60*R-DN	154 a				
	F0*R-DN-DF	154 a				
	F40*R-DN-DF	158 a				
	F60*R-DN-DF	149 a				
Densité de plantes Z39 /m ²	F0*R-DF	149 ab	F0 F40 F60	134 a 154 a 156 a	R-DF R-DN R-DN-DF	155 ab 128 a 160 b
	F40*R-DF	154 ab				
	F60*R-DF	161 ab				
	F0*R-DN	110 ab				
	F40*R-DN	130 ab				
	F60*R-DN	146 ab				
	F0*R-DN-DF	142 ab				
	F40*R-DN-DF	176 b				
	F60*R-DN-DF	163 ab				
Densité de talles Z30/m ²	F0*R-DF	438 a	F0 F40 F60	471 a 536 a 530 a	R-DF R-DN R-DN-DF	473 a 521 a 542 a
	F40*R-DF	486 a				
	F60*R-DF	495 a				
	F0*R-DN	444 a				
	F40*R-DN	567 a				
	F60*R-DN	553 a				
	F0*R-DN-DF	531 a				
	F40*R-DN-DF	555 a				
	F60*R-DN-DF	541 a				
Densité de talles Z39/m ²	F0*R-DF	370 ab	F0 F40 F60	327 a 408 b 477 c	R-DF R-DN R-DN-DF	402 a 388 a 422 a
	F40*R-DF	397 abc				
	F60*R-DF	438 abc				
	F0*R-DN	295 a				
	F40*R-DN	397 abc				
	F60*R-DN	471 bc				
	F0*R-DN-DF	315 a				
	F40*R-DN-DF	430 abc				
	F60*R-DN-DF	521 c				
Densité des épis Z65/m ²	F0*R-DF	20.3 ab	F0 F40 F60	19.6 a 25.2 b 28.5 b	R-DF R-DN R-DN-DF	20.6 a 24.9 b 27.8 b
	F40*R-DF	19.8 a				
	F60*R-DF	21.6 abc				
	F0*R-DN	26.6 abcd				
	F40*R-DN	30.5 cd				
	F60*R-DN	20.9 ab				
	F0*R-DN-DF	29.1 bcd				
	F40*R-DN-DF	33.3 d				
	F60*R-DN-DF					
Densité des épis Z89/m ²	F0*R-DF	252 a	F0 F40 F60	274 a 338 a 414 b	R-DF R-DN R-DN-DF	314 a 359 a 354 a
	F40*R-DF	341 abc				
	F60*R-DF	347 abc				
	F0*R-DN	274 ab				
	F40*R-DN	326 abc				
	F60*R-DN	477 c				
	F0*R-DN-DF	296 ab				
	F40*R-DN-DF	347 abc				
	F60*R-DN-DF	419 bc				

TABLE 5.17 – Moyennes et groupes des tests emmeans pour les biomasses totales pour le facteur fertilisation et stades d'application PN pour les traitements 7 à 15 (Objectif 3)

Variable	Fertilisation *Stades d'application PN	Moyenne emmean	Fertilisation	Moyenne emmean	Stades d'application PN	Moyenne emmean
Biomasse totale Z30 (T/ha)	F0*R-DF	1.61 a	F0 F40 F60	1.65 a	R-DF R-DN R-DN-DF	1.58 a
	F40*R-DF	1.51 a				
	F60*R-DF	1.60 a				
	F0*R-DN	1.76 a				
	F40*R-DN	1.75 a				
	F60*R-DN	2.17 a				
	F0*R-DN-DF	1.59 a				
	F40*R-DN-DF	1.68 a				
	F60*R-DN-DF	2.04 a				
Biomasse totale Z32 (T/ha)	F0*R-DF	2.53 a	F0 F40 F60	2.55 a	R-DF R-DN R-DN-DF	2.47 a
	F40*R-DF	2.50 a				
	F60*R-DF	2.38 a				
	F0*R-DN	2.52 a				
	F40*R-DN	3.25 a				
	F60*R-DN	3.37 a				
	F0*R-DN-DF	2.59 a				
	F40*R-DN-DF	3.43 a				
	F60*R-DN-DF	3.07 a				
Biomasse totale Z39 (T/ha)	F0*R-DF	4.66 ab	F0 F40 F60	4.30 a	R-DF R-DN R-DN-DF	5.22 a
	F40*R-DF	5.77 bcd				
	F60*R-DF	5.23 abc				
	F0*R-DN	4.05 a				
	F40*R-DN	6.26 cde				
	F60*R-DN	7.57 f				
	F0*R-DN-DF	4.19 a				
	F40*R-DN-DF	6.66 def				
	F60*R-DN-DF	7.26 ef				
Biomasse totale Z65 (T/ha)	F0*R-DF	6.62 a	F0 F40 F60	7.18 a	R-DF R-DN R-DN-DF	8.33 a
	F40*R-DF	7.43 ab				
	F60*R-DF	9.22 abc				
	F0*R-DN	8.35 abc				
	F40*R-DN	6.62 a				
	F60*R-DN	9.67 abcd				
	F0*R-DN-DF	10.61 bcd				
	F40*R-DN-DF	11.27 cd				
	F60*R-DN-DF	12.52 d				
Biomasse totale Z89 (T/ha)	F0*R-DF	9.46 a	F0 F40 F60	10.0 a	R-DF R-DN R-DN-DF	11.6 a
	F40*R-DF	12.52 abc				
	F60*R-DF	12.84 abc				
	F0*R-DN	9.96 ab				
	F40*R-DN	12.81 abc				
	F60*R-DN	16.97 c				
	F0*R-DN-DF	10.68 ab				
	F40*R-DN-DF	14.58 bc				
	F60*R-DN-DF	16.12 c				
	16.97 c					

TABLE 5.18 – Moyennes et groupes des tests emmeans pour les biomasses par organes : feuilles, tiges et épis pour le facteur fertilisation et stades d'application PN pour les traitements 7 à 15 (Objectif 3)

Variable	Fertilisation *Stades d'application PN	Moyenne emmean	Fertilisation	Moyenne emmean	Stades d'application PN	Moyenne emmean
Biomasse feuilles Z39 (T/ha)	F0*R-DF	1.10 a	F0 F40 F60	1.07 a 1.85 b 2.20 c	R-DF R-DN R-DN-DF	1.41 a 1.86 b 1.86 b
	F40*R-DF	1.62 bc				
	F60*R-DF	1.50 ab				
	F0*R-DN	1.05 a				
	F40*R-DN	1.91 bc				
	F60*R-DN	2.62 e				
	F0*R-DN-DF	1.05 a				
	F40*R-DN-DF	2.04 cd				
	F60*R-DN-DF	2.49 de				
Biomasse feuilles Z65 (T/ha)	F0*R-DF	1.30 ab	F0 F40 F60	1.21 a 1.96 b 2.43 c	R-DF R-DN R-DN-DF	1.60 a 1.86 ab 2.13 b
	F40*R-DF	1.77 abc				
	F60*R-DF	1.73 abc				
	F0*R-DN	1.01 a				
	F40*R-DN	1.96 bcd				
	F60*R-DN	2.61 de				
	F0*R-DN-DF	1.31 ab				
	F40*R-DN-DF	2.15 cde				
	F60*R-DN-DF	2.94 e				
Biomasse tiges Z39 (T/ha)	F0*R-DF	3.00 a	F0 F40 F60	3.23 a 4.37 b 4.48 b	R-DF R-DN R-DN-DF	3.81 a 4.10 b 4.18 b
	F40*R-DF	4.15 bcd				
	F60*R-DF	3.73 abc				
	F0*R-DN	3.00 a				
	F40*R-DN	4.35 bcd				
	F60*R-DN	4.95 d				
	F0*R-DN-DF	3.14 a				
	F40*R-DN-DF	4.62 cd				
	F60*R-DN-DF	4.77 d				
Biomasse tiges Z65 (T/ha)	F0*R-DF	5.07 ab	F0 F40 F60	4.94 a 6.43 b 6.73 b	R-DF R-DN R-DN-DF	5.54 a 5.98 ab 6.57 b
	F40*R-DF	6.20 abc				
	F60*R-DF	5.36 ab				
	F0*R-DN	4.62 a				
	F40*R-DN	6.26 abc				
	F60*R-DN	7.05 bc				
	F0*R-DN-DF	5.12 ab				
	F40*R-DN-DF	6.82 abc				
	F60*R-DN-DF	7.78 c				
Biomasse tiges-feuilles Z89 (T/ha)	F0*R-DF	4.05 a	F0 F40 F60	4.26 a 5.86 b 6.98 c	R-DF R-DN R-DN-DF	5.08 a 5.86 ab 6.16 b
	F40*R-DF	5.59 ab				
	F60*R-DF	5.61 ab				
	F0*R-DN	4.00 a				
	F40*R-DN	5.59 ab				
	F60*R-DN	7.98 b				
	F0*R-DN-DF	4.72 a				
	F40*R-DN-DF	6.39 ab				
	F60*R-DN-DF	7.36 b				
Biomasse épis Z65 (T/ha)	F0*R-DF	1.051 ab	F0 F40 F60	1.04 a 1.45 b 1.56 b	R-DF R-DN R-DN-DF	1.19 a 1.35 ab 1.50 b
	F40*R-DF	1.252 abc				
	F60*R-DF	1.260 abc				
	F0*R-DN	0.987 a				
	F40*R-DN	1.450 bcd				
	F60*R-DN	1.605 cd				
	F0*R-DN-DF	1.071 ab				
	F40*R-DN-DF	1.635 cd				
	F60*R-DN-DF	1.806 d				
Biomasse épis Z89 (T/ha)	F0*R-DF	5.41 a	F0 F40 F60	5.78 a 7.45 b 8.32 b	R-DF R-DN R-DN-DF	6.52 a 7.39 a 7.64 a
	F40*R-DF	6.93 abc				
	F60*R-DF	7.23 abc				
	F0*R-DN	5.96 ab				
	F40*R-DN	7.22 abc				
	F60*R-DN	8.99 c				
	F0*R-DN-DF	5.96 ab				
	F40*R-DN-DF	8.19 abc				
	F60*R-DN-DF	8.76 bc				

TABLE 5.19 – Moyennes et groupes des tests emmeans pour la couverture foliaire pour le facteur fertilisation et stades d'application PN pour les traitements 7 à 15 (Objectif 3)

Variable	Fertilisation *Stades d'application PN	Moyenne emmean	Fertilisation	Moyenne emmean	Stades d'application PN	Moyenne emmean
Couverture foliaire Z30 (%)	F0*R-DF	45.8 ab	F0 F40 F60	44.2 a 53.4 b 58.8 c	R-DF R-DN R-DN-DF	45.0 a 55.5 b 55.8 b
	F40*R-DF	45.6 ab				
	F60*R-DF	43.6 a				
	F0*R-DN	42.5 a				
	F40*R-DN	56.3 bc				
	F60*R-DN	67.7 d				
	F0*R-DN-DF	44.2 a				
	F40*R-DN-DF	58.3 bc				
	F60*R-DN-DF	65.0 cd				
Couverture foliaire Z32 (%)	F0*R-DF	42.0 a	F0 F40 F60	41.3 a 59.0 b 65.4 c	R-DF R-DN R-DN-DF	47.0 a 59.5 b 59.2 b
	F40*R-DF	51.2 ab				
	F60*R-DF	47.7 a				
	F0*R-DN	40.5 a				
	F40*R-DN	62.9 bc				
	F60*R-DN	75.2 c				
	F0*R-DN-DF	41.3 a				
	F40*R-DN-DF	62.8 bc				
	F60*R-DN-DF	73.3 c				
Couverture foliaire Z39 (%)	F0*R-DF	61.4 ab	F0 F40 F60	60.1 a 78.8 b 79.6 b	R-DF R-DN R-DN-DF	70.2 a 75.2 a 73.1 a
	F40*R-DF	79.0 abc				
	F60*R-DF	70.3 abc				
	F0*R-DN	57.6 a				
	F40*R-DN	81.6 bc				
	F60*R-DN	86.3 c				
	F0*R-DN-DF	61.2 ab				
	F40*R-DN-DF	78.3 abc				
	F60*R-DN-DF	79.9 bc				
Couverture foliaire Z65 (%)	F0*R-DF	59.2 a	F0 F40 F60	59.1 a 77.4 b 79.1 b	R-DF R-DN R-DN-DF	64.3 a 74.9 b 76.4 b
	F40*R-DF	70.2 ab				
	F60*R-DF	63.4 a				
	F0*R-DN	57.8 a				
	F40*R-DN	81.4 bc				
	F60*R-DN	85.5 bc				
	F0*R-DN-DF	60.3 a				
	F40*R-DN-DF	80.5 bc				
	F60*R-DN-DF	88.5 c				

TABLE 5.20 – Moyennes et groupes des tests emmeans pour le rendement approximé pour le facteur fertilisation et stades d'application PN pour les traitements 7 à 15 (Objectif 3)

Variable	Fertilisation *Stades d'application PN	Moyenne emmean	Fertilisation	Moyenne emmean	Stades d'application PN	Moyenne emmean
Activité photosynthétique Z30	F0*R-DF	0.791 a	F0 F40 F60	0.797 a 0.815 a 0.808 a	R-DF R-DN R-DN-DF	0.805 a 0.809 a 0.806 a
	F40*R-DF	0.824 a				
	F60*R-DF	0.800 a				
	F0*R-DN	0.805 a				
	F40*R-DN	0.814 a				
	F60*R-DN	0.809 a				
	F0*R-DN-DF	0.796 a				
	F40*R-DN-DF	0.808 a				
	F60*R-DN-DF	0.815 a				
Activité photosynthétique Z32	F0*R-DF	0.759 a	F0 F40 F60	0.769 a 0.781 ab 0.789 b	R-DF R-DN R-DN-DF	0.770 a 0.789 b 0.781 ab
	F40*R-DF	0.774 ab				
	F60*R-DF	0.776 ab				
	F0*R-DN	0.774 ab				
	F40*R-DN	0.791 b				
	F60*R-DN	0.802 b				
	F0*R-DN-DF	0.775 ab				
	F40*R-DN-DF	0.779 ab				
	F60*R-DN-DF	0.788 ab				
Activité photosynthétique Z39	F0*R-DF	0.824 a	F0 F40 F60	0.821 a 0.823 a 0.827 a	R-DF R-DN R-DN-DF	0.823 a 0.826 a 0.822 a
	F40*R-DF	0.820 a				
	F60*R-DF	0.826 a				
	F0*R-DN	0.822 a				
	F40*R-DN	0.828 a				
	F60*R-DN	0.826 a				
	F0*R-DN-DF	0.818 a				
	F40*R-DN-DF	0.820 a				
	F60*R-DN-DF	0.828 a				
Activité photosynthétique Z65	F0*R-DF	0.784 a	F0 F40 F60	0.771 a 0.772 a 0.787 a	R-DF R-DN R-DN-DF	0.783 a 0.764 a 0.784 a
	F40*R-DF	0.781 a				
	F60*R-DF	0.785 a				
	F0*R-DN	0.762 a				
	F40*R-DN	0.792 a				
	F60*R-DN	0.738 a				
	F0*R-DN-DF	0.768 a				
	F40*R-DN-DF	0.789 a				
	F60*R-DN-DF	0.794 a				

5.3 Objectif 1 : Effet de l'ajout du PN

L'objectif 1 a pour but d'observer l'impact de l'ajout du biostimulant sur la culture.

5.3.1 Densité de plantes, talles et d'épis

Pour les densités de plantes, talles et d'épis, aucune interaction n'est observé pour les facteurs fertilisation et PN. Cependant, elles sont significativement différentes selon le niveau de fertilisation appliqué. Son degré de significativité varie de significatif à hautement significatif selon le stade.

(tableau 5.5)

Densité de plantes

Par le biais de figure 5.1, il est observable que le schéma de fertilisation avec la dose recommandée sans biostimulant (F60.PN0) est équivalent à l'application d'une dose intermédiaire avec biostimulant (F40.PN3) lors du stade 30. Au stade 39, cette différence n'est toujours pas significative. Les valeurs moyennes de densités de plantes à partir d'une fertilisation intermédiaire atteignent l'objectif d'obtenir une population d'environ 150 à 200 plantes par m².

(CÉRÉALES 2017)

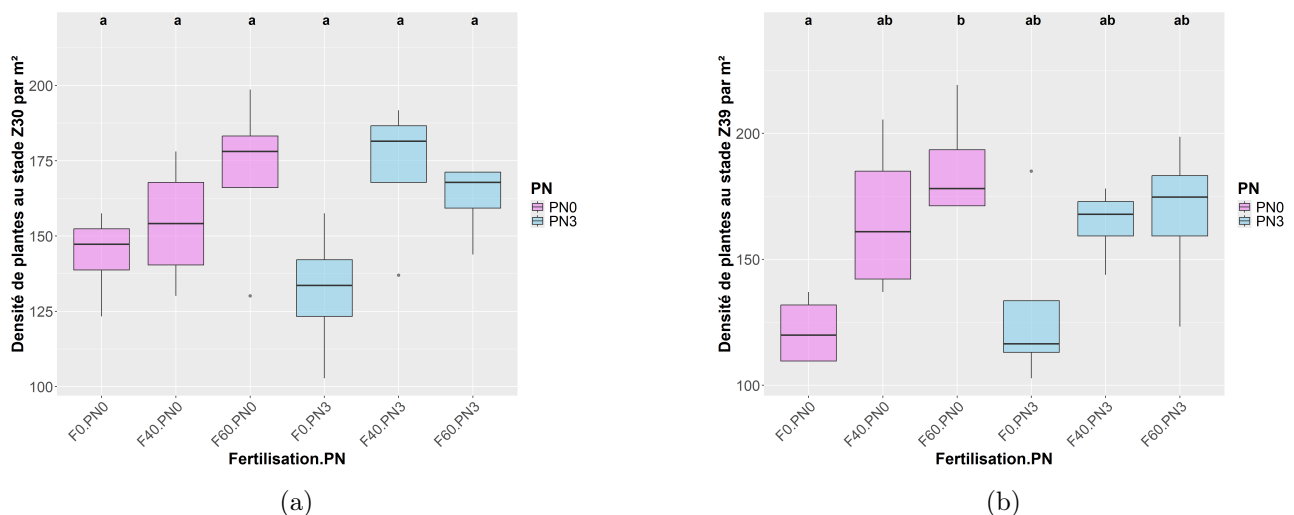


FIGURE 5.1 – Boxplots de la densité de plantes aux stades 30 et 39 en fonction de la fertilisation*PN : Objectif 1

Densité des talles

Le nombre de talles augmente significativement selon le niveau de fertilisation entre le F0 et les F40 et F60 mais pas selon le biostimulant PN au stade 30 et 39. (tableau 5.3; tableau 5.5; figure 5.2a). Toutefois, l'application du biostimulant n'a pas d'impact significatif (figure 5.2). Il est ainsi supposé que le biostimulant n'incite pas au tallage contrairement à la fertilisation. Au stade dernière feuille, le nombre de talles moyens varient de 247 à 541 talles par m² selon le schéma de fertilisation.PN .

(tableau 5.5)

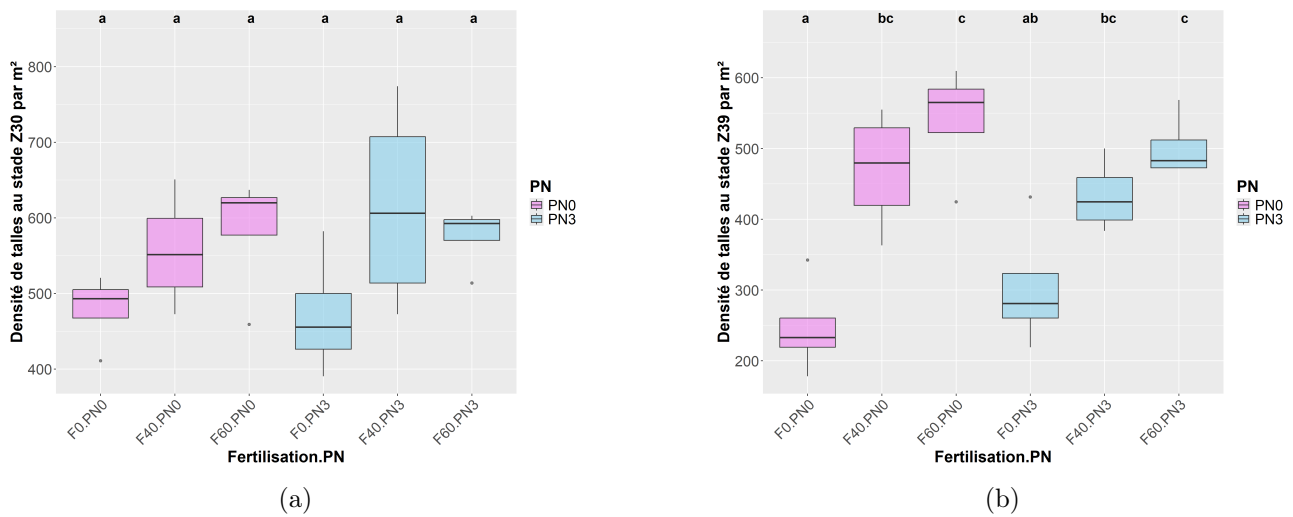


FIGURE 5.2 – Boxplots de la densité de talles aux stades 30 et 39 en fonction de la fertilisation*PN : Objectif 1

Densité des épis

Un nombre élevé d'épis par m^2 est généralement associé à une fertilisation azotée abondante. (CÉRÉALES 2024). Cette tendance se confirme sur le tableau 5.5. Aux stades de floraison (Z65) et de maturité (Z89), les mêmes groupes se répètent à la figure 5.3. Cette observation est logique et entre dans la continuité des tendances précédemment observées concernant le nombre de talles. Au stade de la maturité, les moyennes varient de 433 à 541 pour un schéma de fertilisation de F40.PN3 à F60.PN0. Idéalement, la densité d'épis doit être comprise entre 400 et 500 épis par mètre carré afin d'éviter la concurrence entre les plantes pour les ressources nutritives (CÉRÉALES 2024). Il n'y a donc pas de significativité du PN selon la densité d'épis, cependant, l'ajout de la zéolithe entraîne une plus faible variabilité de la densité d'épis à la maturité. Cela est également confirmé par SEDAGHAT, HAZRATI et OMRANI 2022

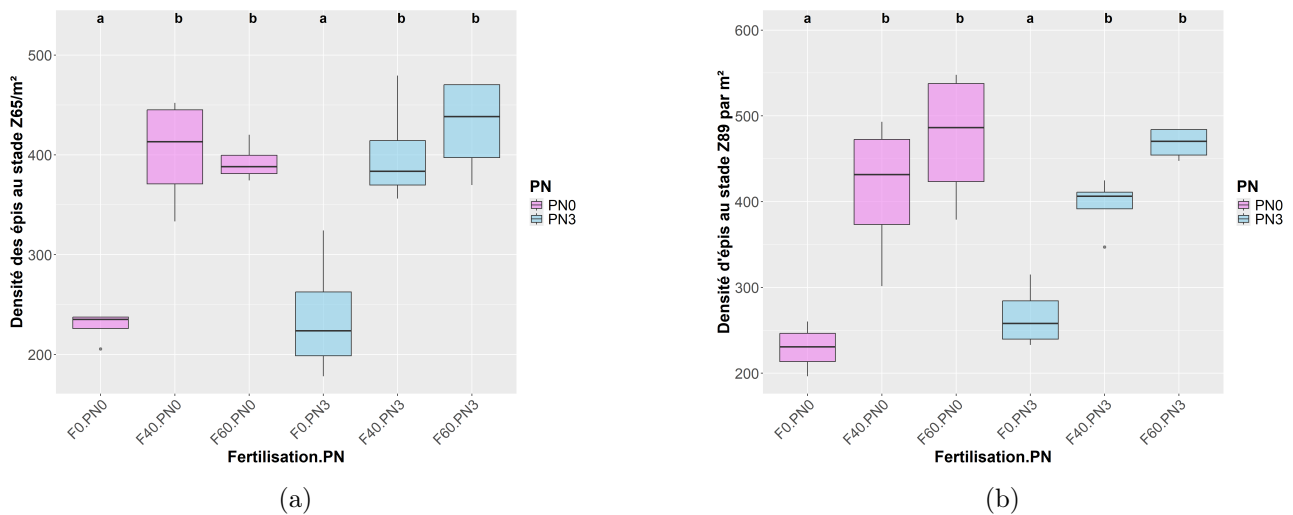


FIGURE 5.3 – Boxplots de la densité d'épis au stade 65 et 89 en fonction de la fertilisation*PN : Objectif 1

5.3.2 Couverture foliaire

La couverture foliaire est affectée par plusieurs paramètres notamment l'indice de surface foliaire (LAI) mais aussi la densité des talles. Ces facteurs combinés déterminent l'efficacité avec laquelle une plante intercepte la lumière. Cela a donc un impact direct sur la photosynthèse, la croissance, et finalement la production de biomasse (NIELSEN, MICELI-GARCIA et LYON 2012).

Une interaction entre les facteurs fertilisation et PN pour les stades 32, 39 et 65. À la figure 5.4, le biostimulant PN sur un échantillon témoin (sans fertilisation azotée) a un impact positif pour les stades 32 et 39. Cependant, cet effet n'est plus observé lorsqu'une fertilisation azotée est appliquée.

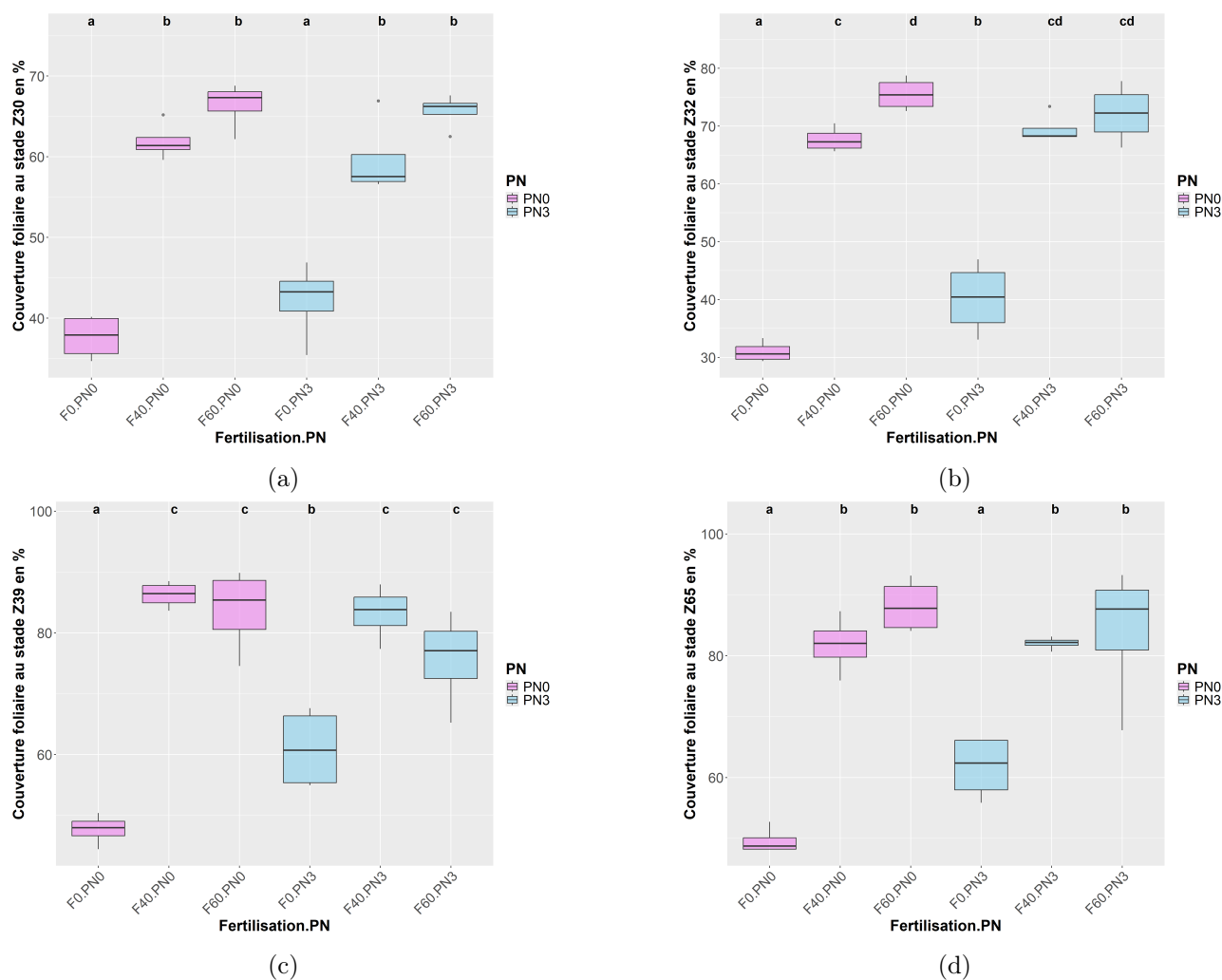


FIGURE 5.4 – Boxplots de la couverture foliaire au stade 30, 32, 39 et 65 en fonction de la fertilisation*PN : Objectif 1

5.3.3 L'indice de surface foliaire (LAI) et activité photosynthétique

L'indice de surface foliaire (LAI) reflète l'état biophysique des plantes, y compris la structure des feuilles et la densité du couvert végétal, et peut servir d'indicateur intermédiaire pour évaluer la biomasse ainsi que la fraction du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé (XING et al. 2022). Le LAI renseigne donc quant au potentiel d'activité photosynthétique de la plante ainsi qu'à son développement. Au stade 39 (figure 5.5), il est constaté d'une part que le passage d'une fertilisation azotée intermédiaire à recommandée n'a pas d'impact lorsque le

biostimulant est appliqué. Par contre, l'application du biostimulant sur une fertilisation azotée de 40 ou 60 n'augmente pas le LAI par rapport au cas F40 sans biostimulant.

Concernant l'activité photosynthétique, telle que représentée aux différents stades de la plante à la figure 5.6, il est observable de que l'application du biostimulant n'a pas d'impact. Une valeur de F_v/F_m mesurées dans les feuilles saines se situe habituellement aux alentours de 0.8. Si la valeur de ce rapport vient à diminuer, cela indique une réduction de l'efficacité pour l'entièreté du photosystème II (PS II) (DIGRADO 2018;KALAJI et al. 2017;KASAJIMA et al. 2011). Il est à noter que l'ensemble des fertilisations au stade 32 semble être en dessous du seuil de l'efficacité du PS II.

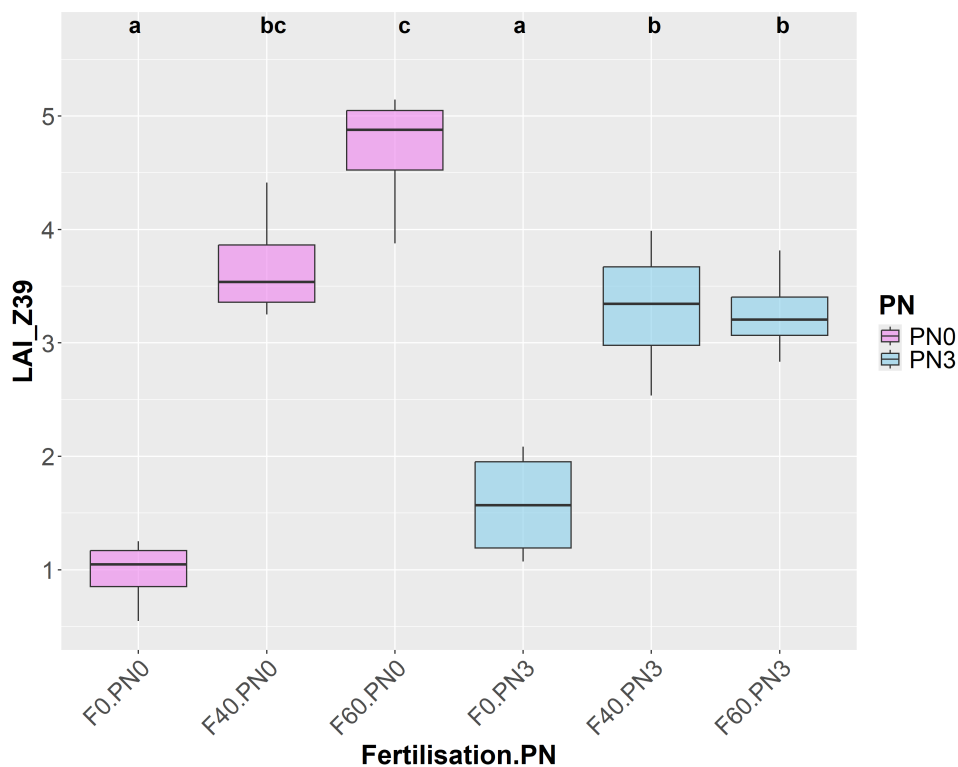


FIGURE 5.5 – Boxplot de l'indice de surface foliaire au stade 39 en fonction de la fertilisation*PN : Objectif 1

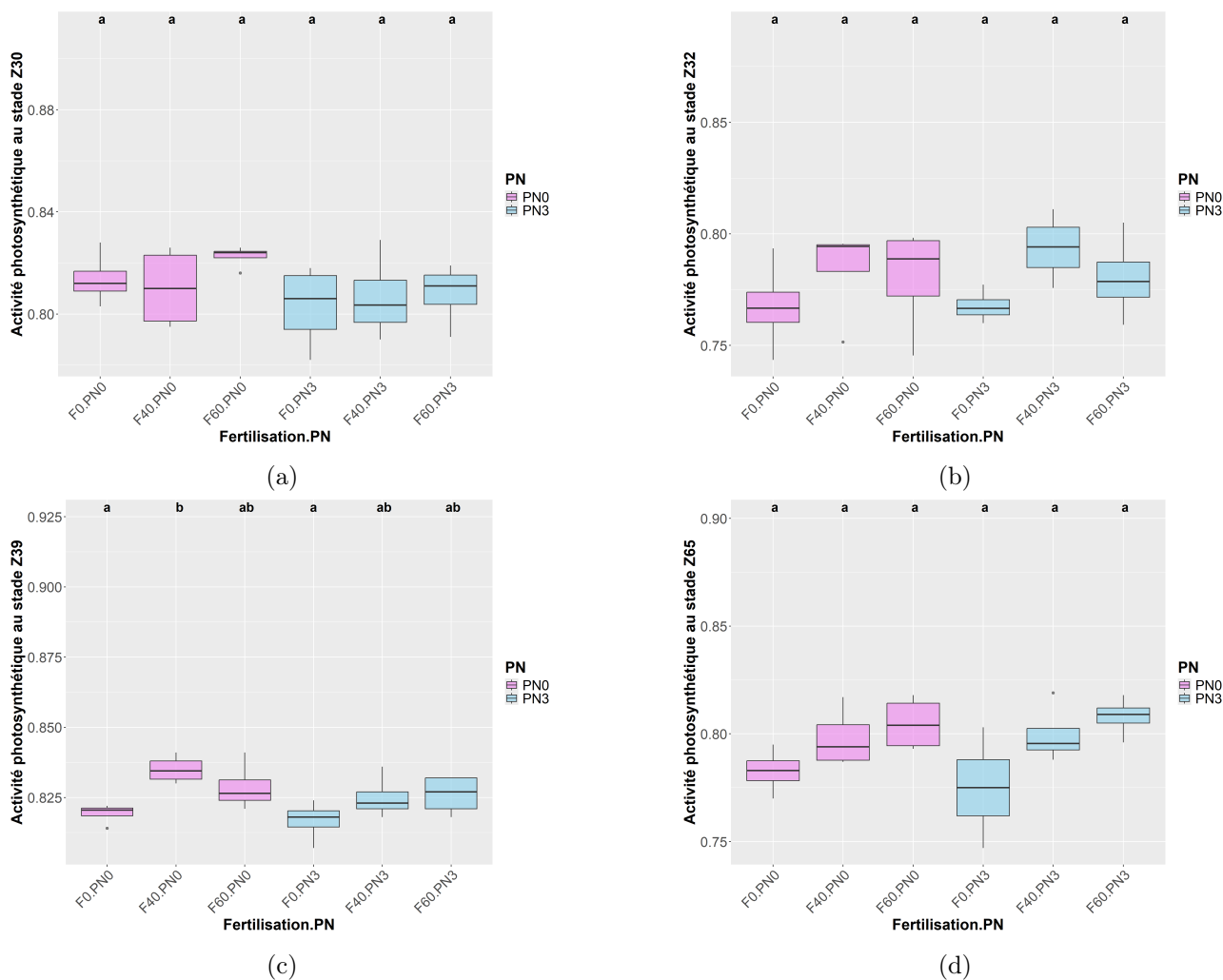


FIGURE 5.6 – Boxplots de l'activité photosynthétique (Fv/Fm) au stade 30, 32, 39 et 65 en fonction de la fertilisation*PN : Objectif 1

5.3.4 Azote prélevé

Dans un premier temps, à la figure 5.7, le passage d'un taux intermédiaire à recommandé d'azote sans biostimulant n'aura pas d'impact sur la quantité prélevée par la plante. Bien qu'au stade du deuxième nœud, on ne puisse distinguer l'application de biostimulant de sa non-application, on remarque néanmoins à la floraison qu'il a permis à la plante de capter plus d'azote quand la fertilisation recommandée est appliquée. Par ailleurs, l'application du biostimulant avec une fertilisation azotée intermédiaire conduit à un taux d'azote prélevé équivalent à celui de la plante à F40 et F60 sans biostimulant.

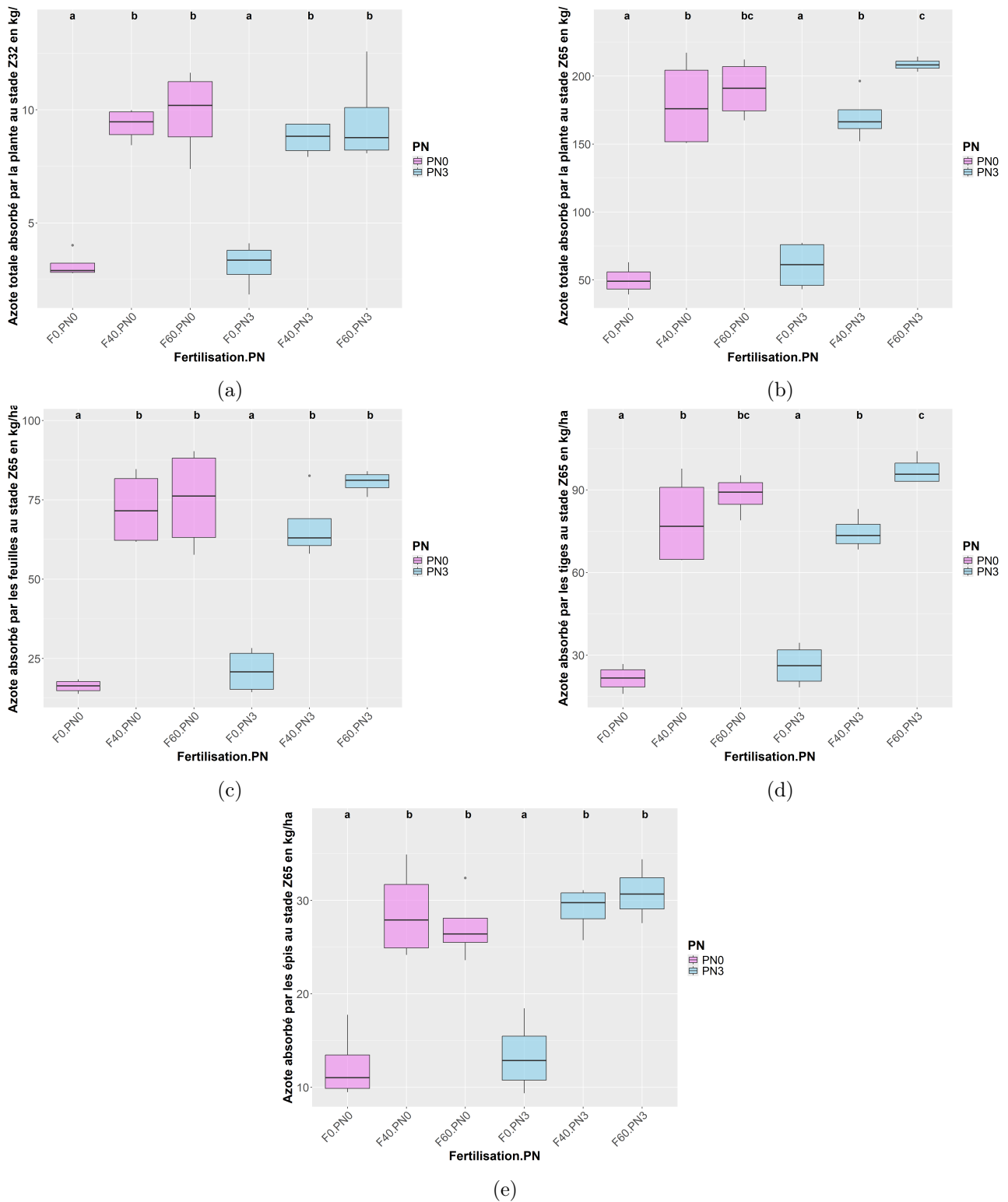


FIGURE 5.7 – Boxplot de l’azote exporté au stade 32 et 65 en fonction de la fertilisation*PN : Objectif 1

5.3.5 Biomasse aérienne totale

En ce qui concerne la biomasse aérienne totale, telle que représentée à la figure 5.8, l’application du biostimulant n’a pas d’impact.

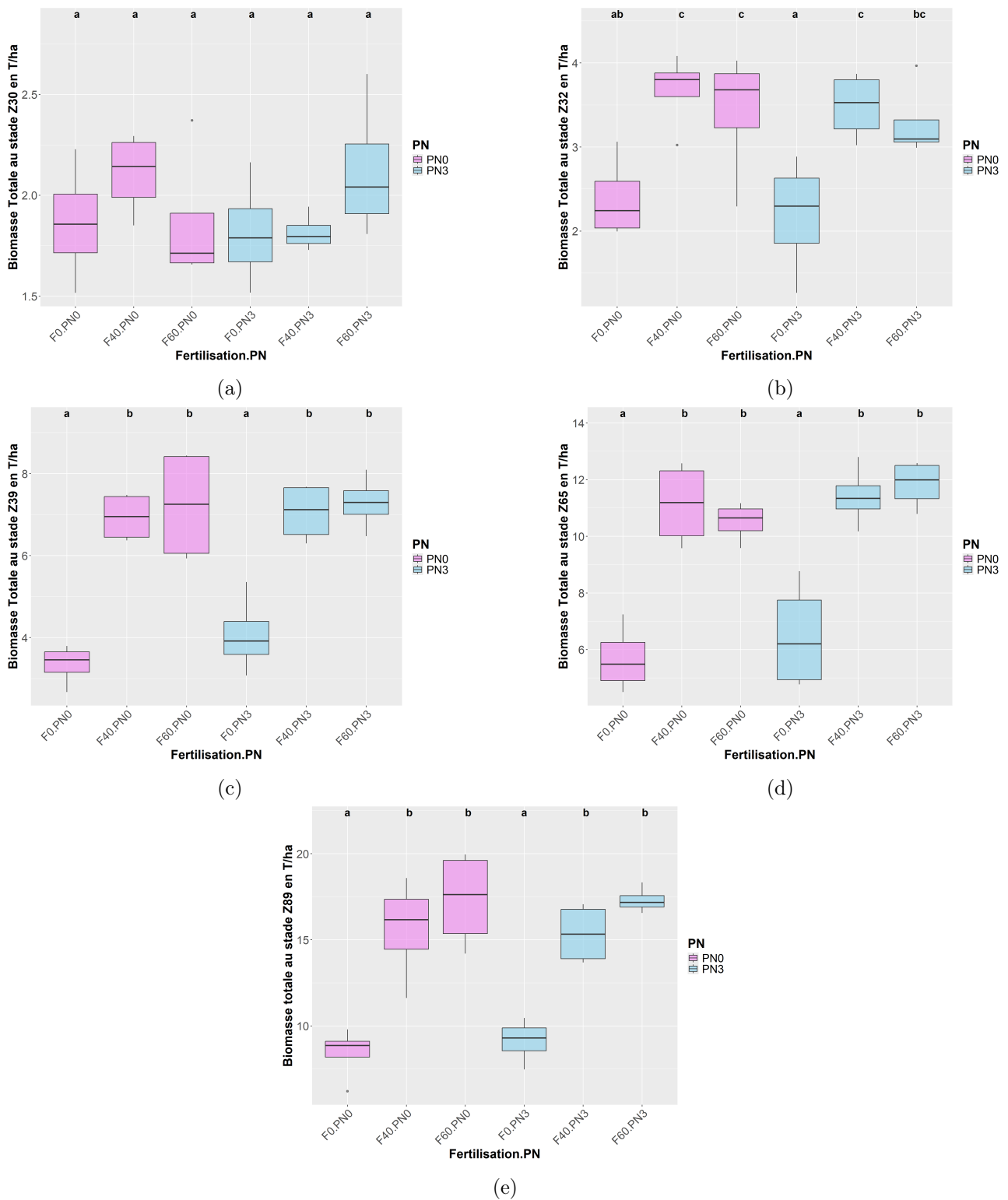


FIGURE 5.8 – Boxplots de la biomasse aérienne totale au stade 30, 32, 39, 65 et 89 en fonction de la fertilisation*PN : Objectif 1

5.3.6 Rendement approximé

Bien que les épis n'aient pas encore été battus au moment de la rédaction, un rendement peut être approximé en mesurant la différence entre la biomasse des épis à maturité et celle à floraison. On remarque ainsi à la figure 5.9 que lorsque le biostimulant est appliqué, passer d'une fertilisation azotée d'intermédiaire à recommandée n'apporte pas d'amélioration significative. Cependant, il est notable qu'appliquer le biostimulant sur une fertilisation intermédiaire

conduite à un rendement approximé équivalent à celle d'une fertilisation recommandée sans biostimulant.

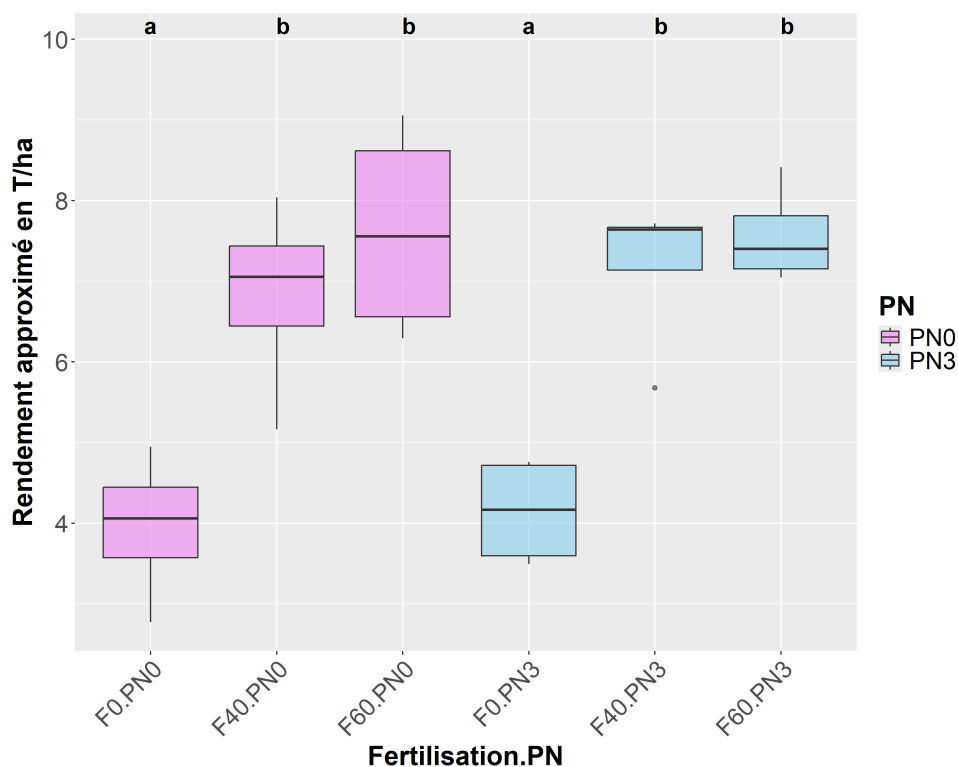


FIGURE 5.9 – Boxplot du rendement approximé en fonction de la fertilisation*PN : Objectif 1

5.3.7 Que retenir de l'objectif 1 : Effet de l'ajout du PN ?

Il ressort de l'étude de cet objectif que seule la fertilisation impacte de manière hautement significative les traitements 1 à 6. Malgré un effet non significatif du PN, une diminution de la variabilité des boxplots présentant les différentes variables est observée lors de l'apport de la zéolithe pour un même niveau de fertilisation azotée. Ce qui est également observé par QUEZADA et BRAGAZZA 2023 bien qu'il s'agisse d'une expérimentation en serre.

5.4 Objectif 2 : Effet du positionnement du PN

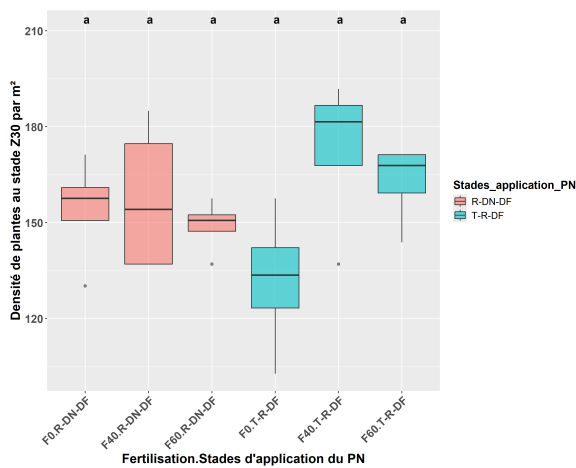
L'objectif 2 a pour vocation de comparer le moment d'application du biostimulant (PN) entre le tallage, le redressement et la dernière feuille ou le redressement, le deuxième nœud et la dernière feuille.

5.4.1 Densité de plantes, des talles et d'épis

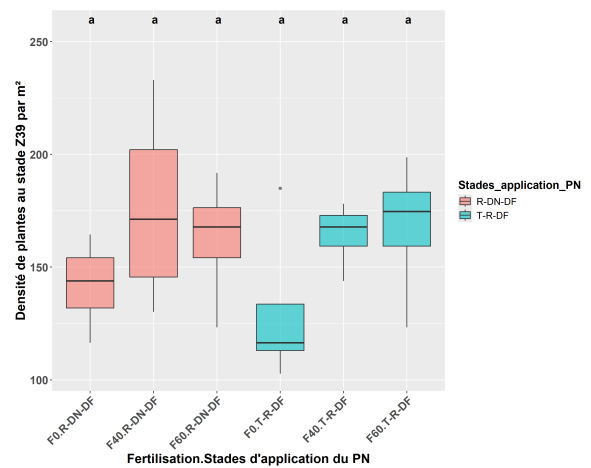
Densité de plantes

Au stade de la dernière feuille, le biostimulant n'augmente pas de manière significative la densité de plantes lorsqu'une fertilisation azotée intermédiaire ou recommandée est appliquée (figure 5.12).

Au stade 30, l'application du biostimulant sur le tallage a eu un impact positif sur la densité de la plante. Cependant, cet impact devient négligeable lorsqu'une deuxième dose est également appliquée sur l'autre échantillon.



(a)

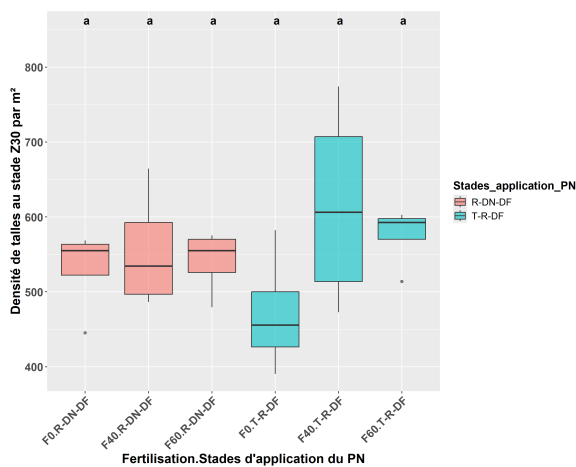


(b)

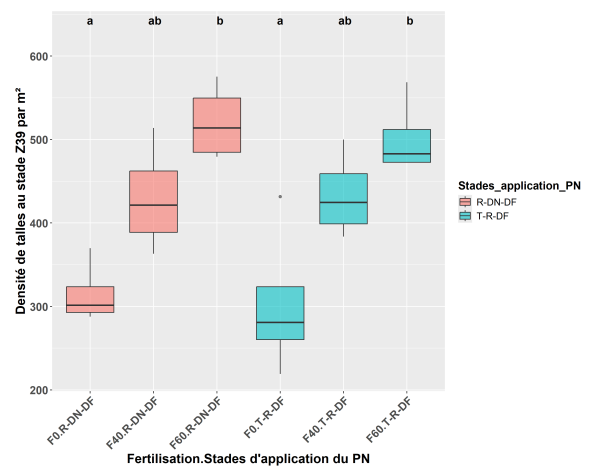
FIGURE 5.10 – Boxplots de la densité de plantes aux stades 30 et 39 en fonction de la fertilisation*stades d’application PN : Objectif 2

Densité de talles

Comme remarqué précédemment, l’application du biostimulant a un moment précoce de la pousse a un impact positif sur la densité de talles lors de la mesure au redressement (figure 5.11). Néanmoins, le choix entre une application au tallage ou au deuxième nœud n’apporte pas de différence à la dernière feuille lorsque les deux échantillons ont tous deux reçus trois doses de biostimulant.



(a)

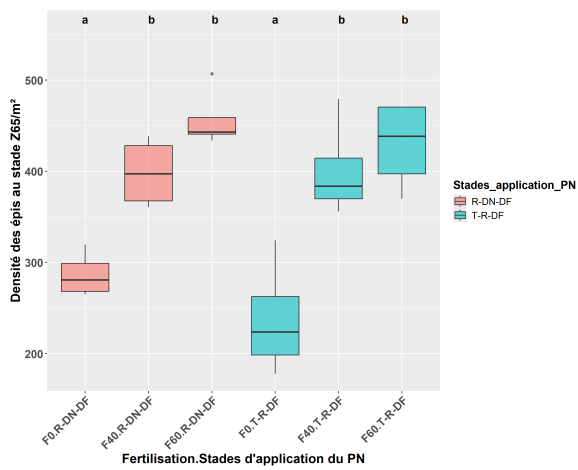


(b)

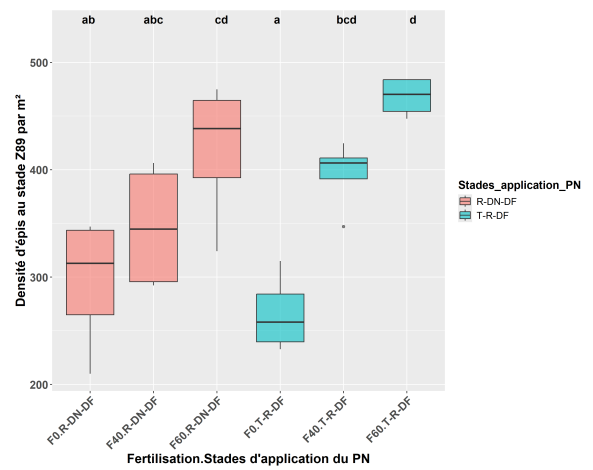
FIGURE 5.11 – Boxplots de la densité de talles aux stades 30 et 39 en fonction de la fertilisation*stades d’application PN : Objectif 2

Densité des épis

Lors du stade de floraison, le moment d’application du biostimulant n’a pas d’impact sur la densité des épis. Cependant à la figure 5.12, que le choix du tallage dans les trois applications conduit à une dispersion plus faible ainsi que des densités d’épis plus élevées. L’application du biostimulant au tallage semble donc plus avantageux.



(a)



(b)

FIGURE 5.12 – Boxplots de la densité d'épis au stade 65 et 89 en fonction de la fertilisation*PN : Objectif 2

5.4.2 Couverture foliaire

En ce qui concerne la couverture foliaire, le moment d'application du biostimulant ne conduit pas à des différences significatives (figure 5.14).

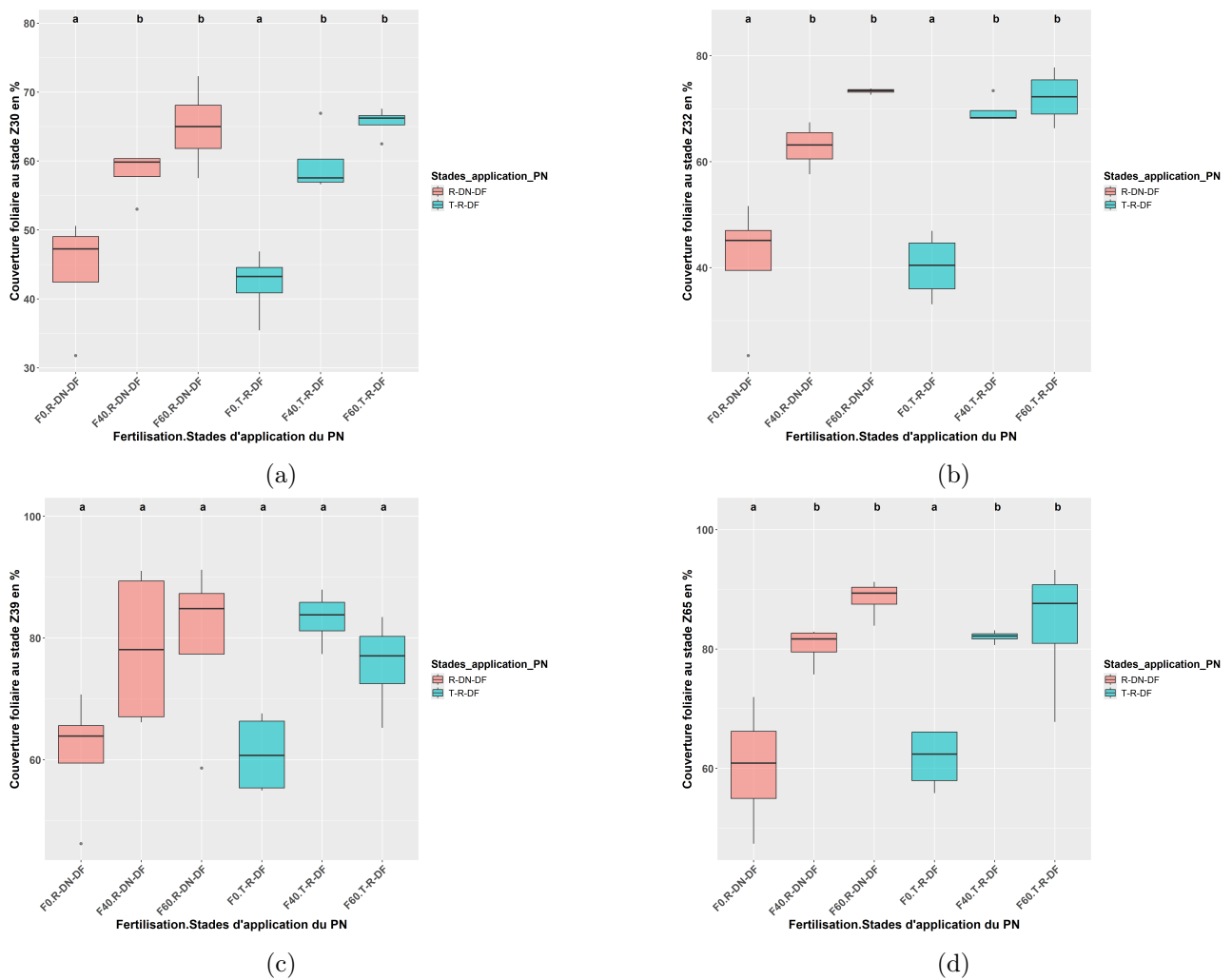
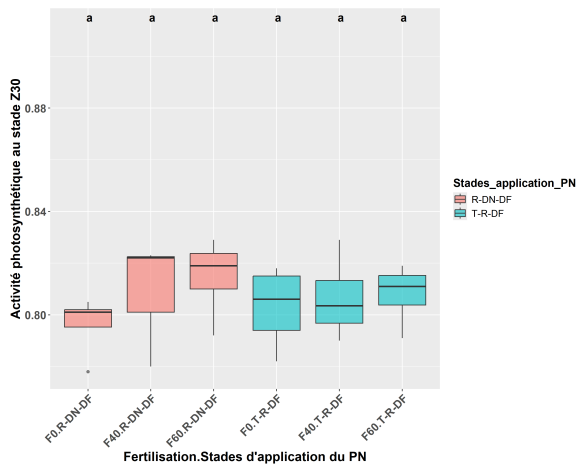


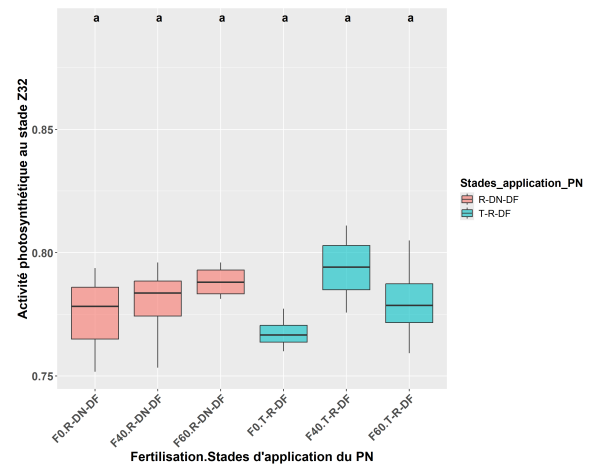
FIGURE 5.13 – Boxplots de la couverture foliaire au stade 30, 32, 39 et 65 en fonction de la fertilisation*stades d'application PN : Objectif 2

5.4.3 Activité photosynthétique

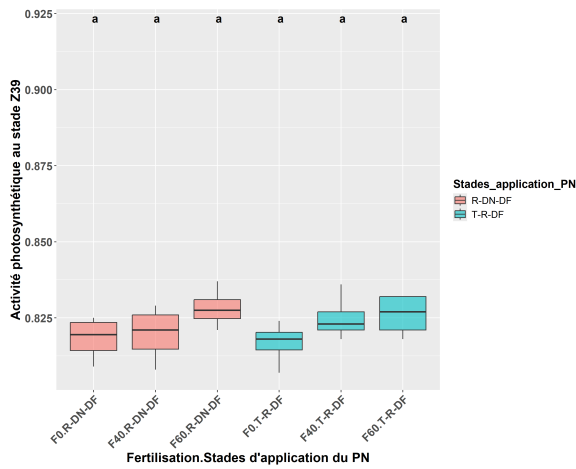
Bien que l'augmentation de la charge azotée conduise à une légère augmentation de l'activité photosynthétique (figure 5.14), l'application du biostimulant au moment du tallage ne montre ses bénéfices sur la plante qu'au stade de floraison.



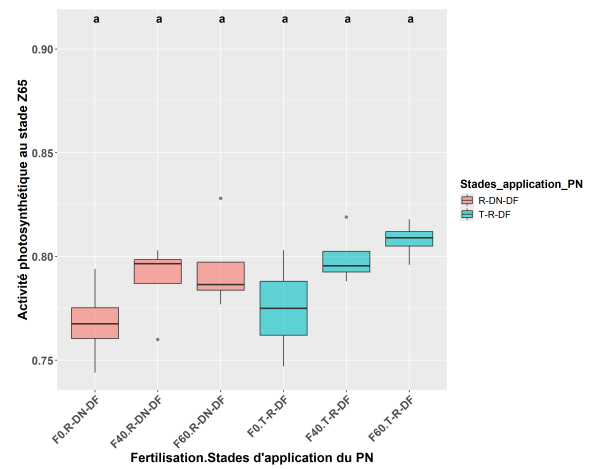
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 5.14 – Boxplots de l'activité photosynthétique (Fv/Fm) au stade 30, 32, 39 et 65 en fonction de la fertilisation* stades d'application PN : Objectif 2

5.4.4 Azote prélevé

À la figure 5.15 il est observé que pour les trois applications de biostimulant et une fertilisation azotée intermédiaire, l'application du biostimulant au moment du tallage augmente la quantité d'azote prélevée.

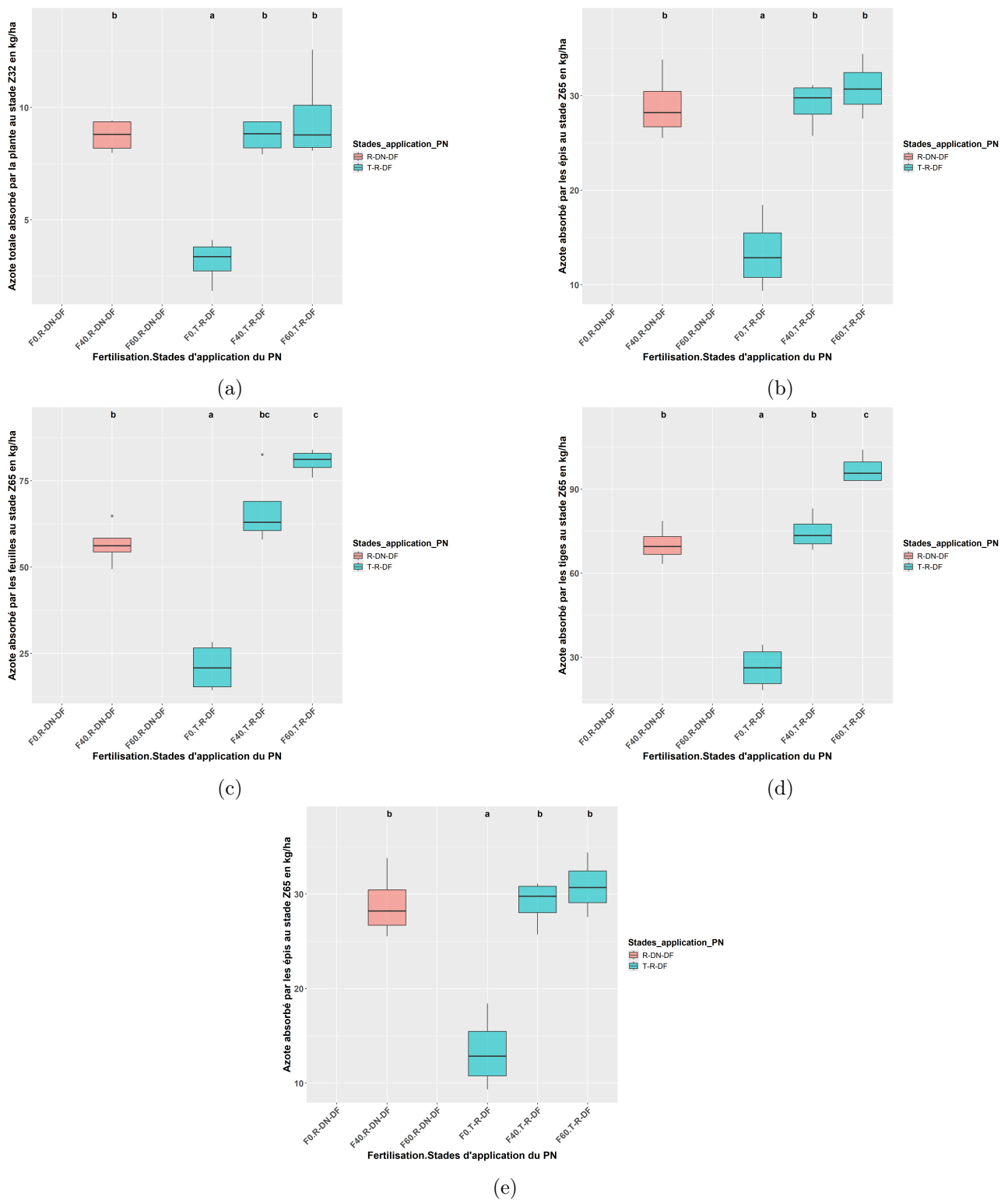


FIGURE 5.15 – Boxplot de l'azote exporté au stade 32 et 65 en fonction de la fertilisation*stades d'application PN : Objectif 2

5.4.5 Biomasse aérienne totale

Le moment d'application des trois doses de biostimulant n'a pas d'impact sur la biomasse aérienne totale comme on peut l'observer à la figure 5.16.

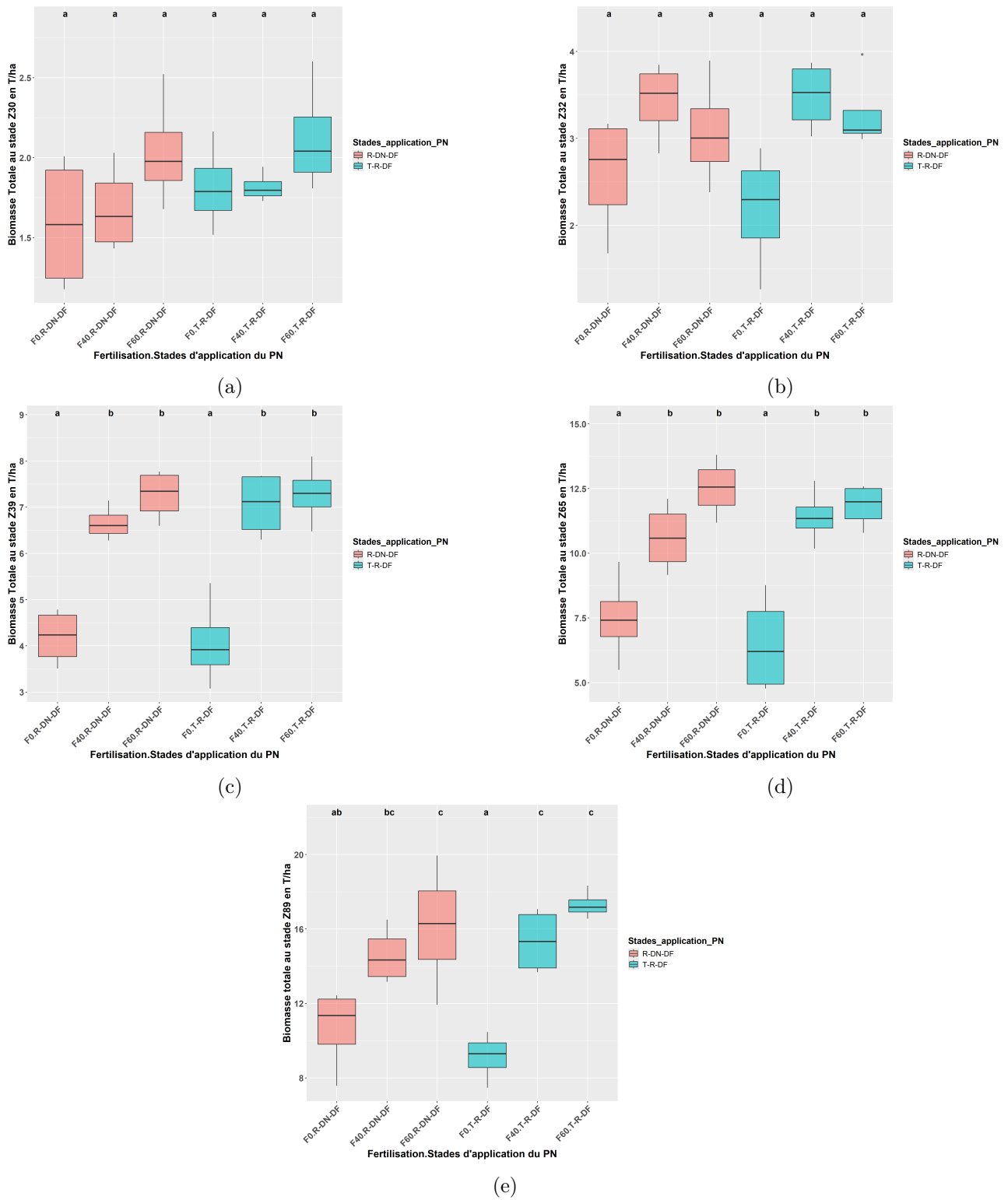


FIGURE 5.16 – Boxplots de la biomasse aérienne totale au stade 30, 32, 39, 65 et 89 en fonction de la fertilisation* stades d'application PN : Objectif 2

5.4.6 Rendement approximatif

Comme montré à la figure 5.17, le choix du tallage pour l'application du biostimulant comparé au deuxième nœud conduit à un meilleur rendement approximatif.

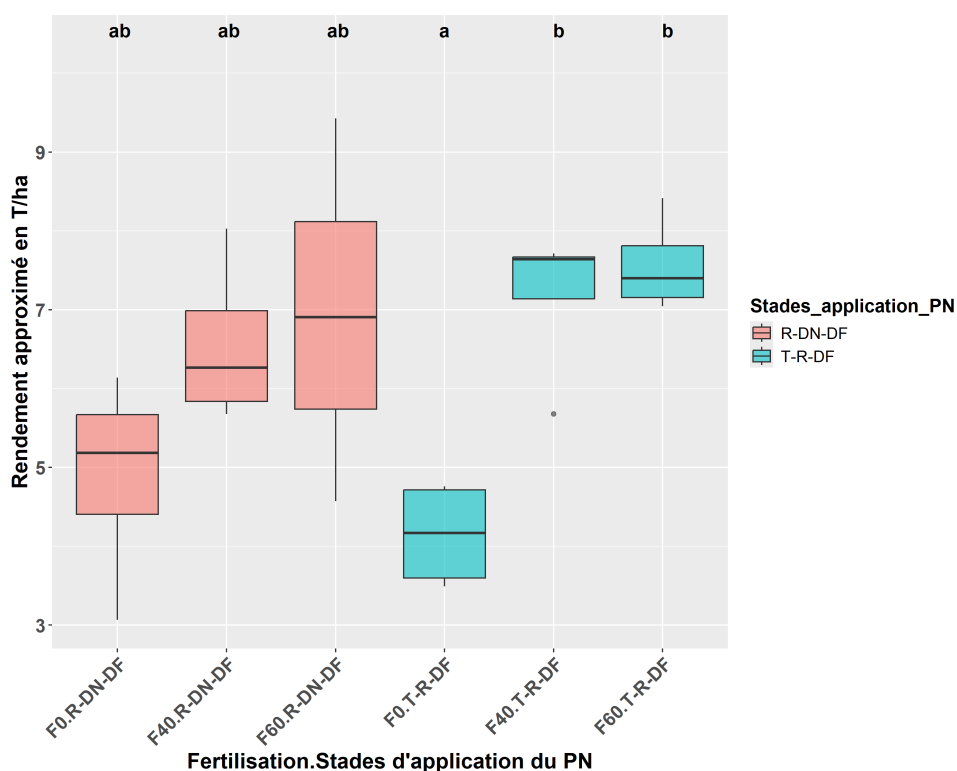


FIGURE 5.17 – Boxplot du rendement approximé en fonction de la fertilisation* stades d'application PN : Objectif 2

5.4.7 Que retenir de l'objectif 2 : Effet du positionnement du PN ?

Le positionnement idéal de la zéolithe semble donc être celui du tallage qui correspond à la fraction distribuée à la sortie de l'hiver. Il s'agit d'une fraction requise pour la reprise de la végétation. Elle était d'autant plus importante cette année, au vu des conditions pluviométriques hivernales, de la difficulté de la levée des cultures à l'automne mais aussi du à l'impossibilité de pratique du désherbage en arrière saison. La zéolithe semble donc avoir permis au blé de redémarrer plus rapidement.

5.5 Objectif 3 : Effet de l'omission du PN

Ce dernier objectif étudie l'omission d'une application du biostimulant sur les trois applications envisagées. Alors qu'il sera toujours appliqué au stade du redressement, on analyse l'impact d'un oubli au deuxième nœud ou à la dernière feuille sur l'évolution de la plante.

5.5.1 Densité de plantes, de talles et d'épis

Densité de plantes

Aucune différence significative n'est observée entre les différents stades d'application pour la densité de plantes au stade 30. Cela peut s'expliquer par le fait qu'à ce stade seule la fraction de redressement du PN est appliquée, impliquant aucune différence de schéma de fertilisation. Cependant, au stade 39, il y a une différence significative entre le stade R-DN et le stade R-DN-DF, les valeurs moyennes étant respectivement de 128 et 160 plantes par m² (tableau 5.16).

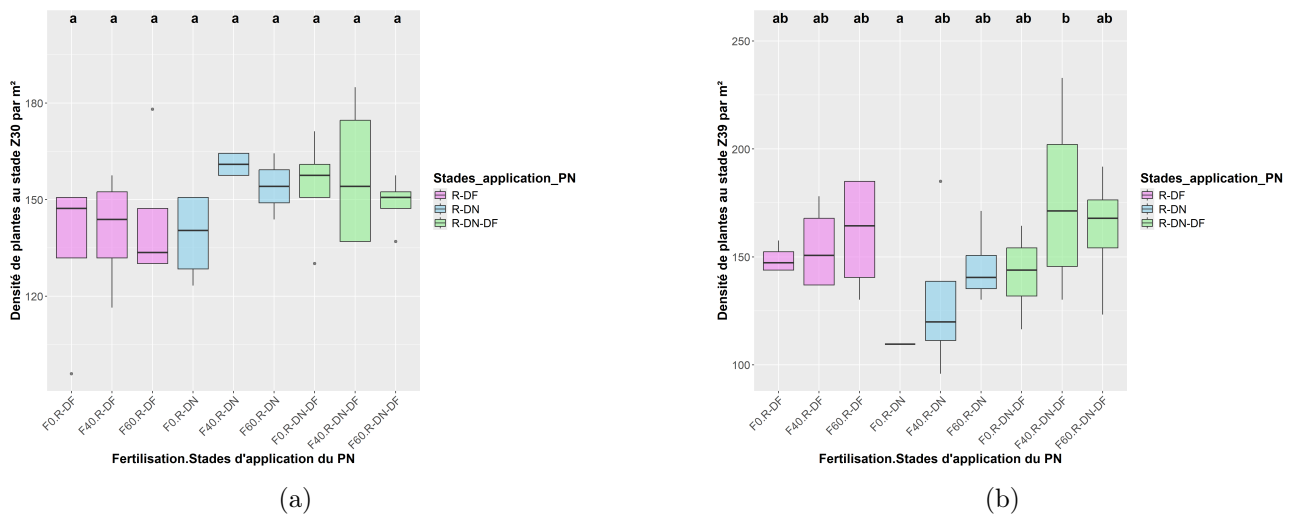


FIGURE 5.18 – Boxplots de la densité de plantes aux stades 30 et 39 en fonction de la fertilisation*stades d’application PN : Objectif 3

Densité de talles

Aucune différence significative n’est observée entre les différents stades d’application pour la densité de plantes au stade 30. Cela peut s’expliquer par le fait qu’à ce stade seule la fraction de redressement du PN est appliquée, impliquant aucune différence de schéma de fertilisation. Concernant le stade 39, il ressort que le niveau de fertilisation a un impact significatif contrairement à l’omission du PN. Il est donc supposé que l’omission du PN n’affecte pas la densité des talles.

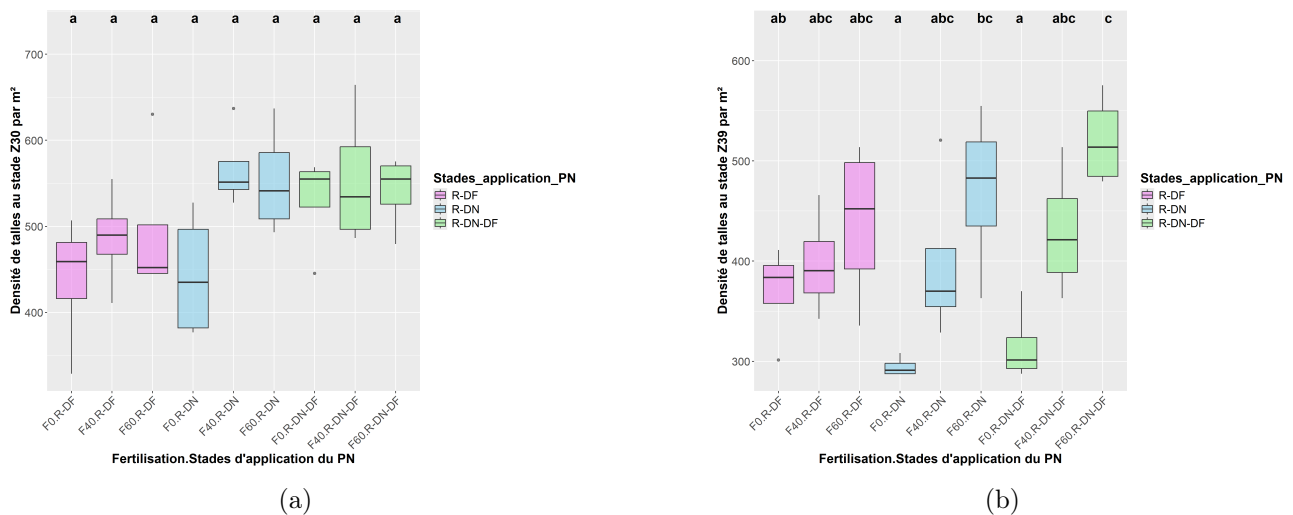
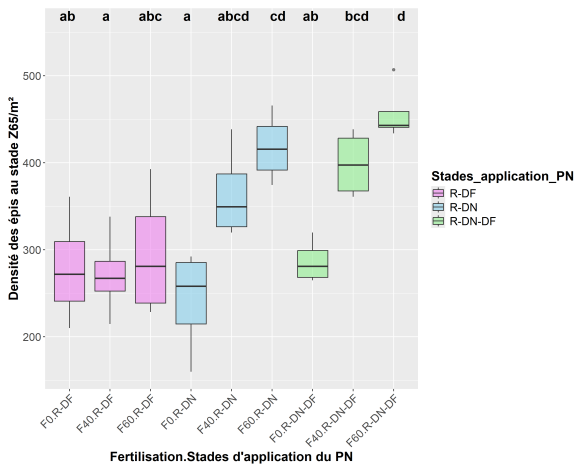


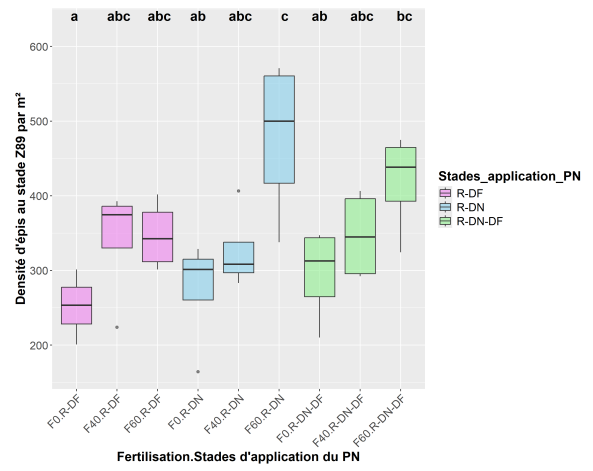
FIGURE 5.19 – Boxplots de la densité de talles aux stades 30 et 39 en fonction de la fertilisation*stades d’application PN : Objectif 3

Densité d’épis

Concernant la densité d’épis, l’omission du PN au deuxième noeud est significativement plus faible que pour l’omission du stade dernière feuille pour le niveau d’azote recommandé ainsi que pour l’absence de fertilisation azotée.



(a)

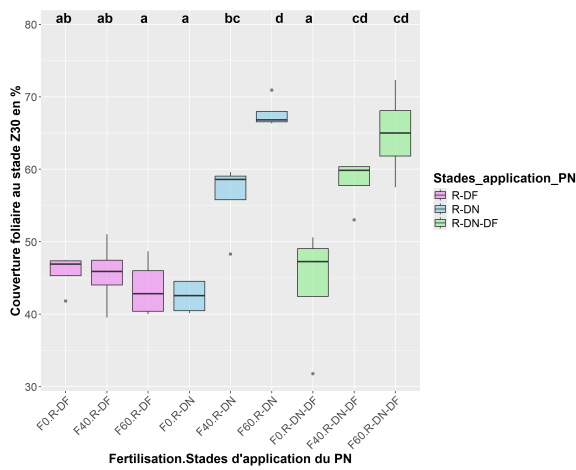


(b)

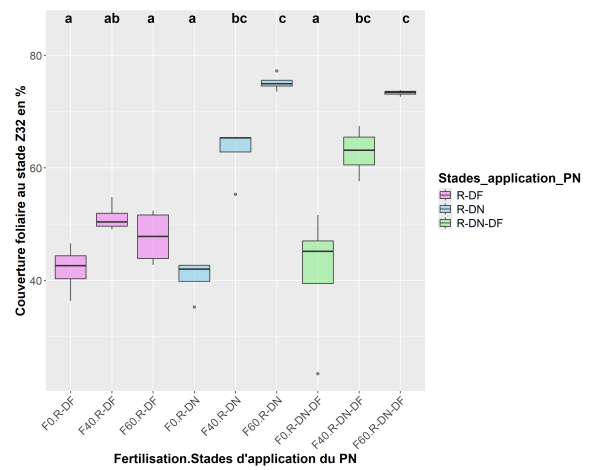
FIGURE 5.20 – Boxplots de la densité d’épis au stade 65 et 89 en fonction de la fertilisation*PN : Objectif 3

5.5.2 Couverture foliaire

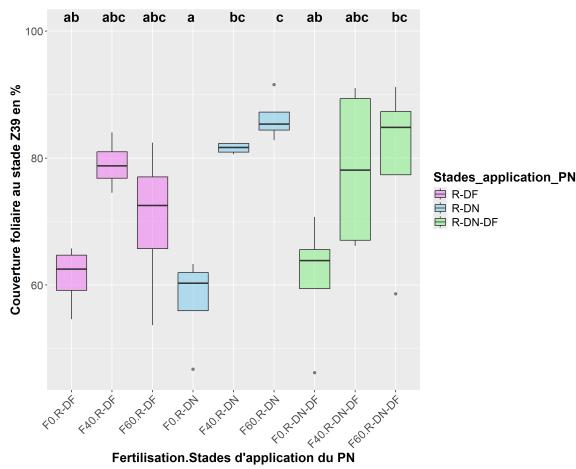
La même constatation est réalisable pour la couverture foliaire. Il ressort à nouveau que l’omission du deuxième noeud entraîne une diminution de la couverture foliaire selon le niveau de fertilisation azotée.



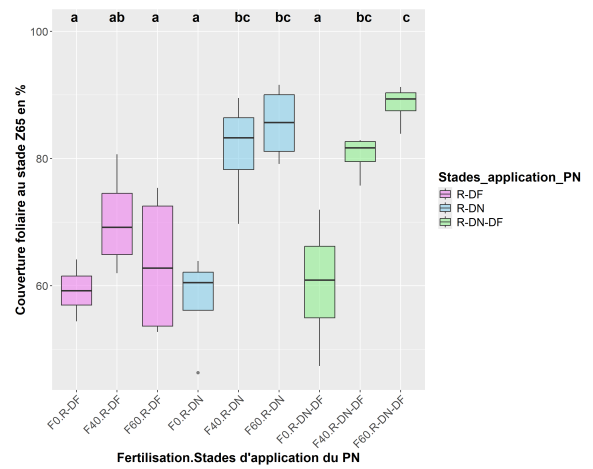
(a)



(b)



(c)

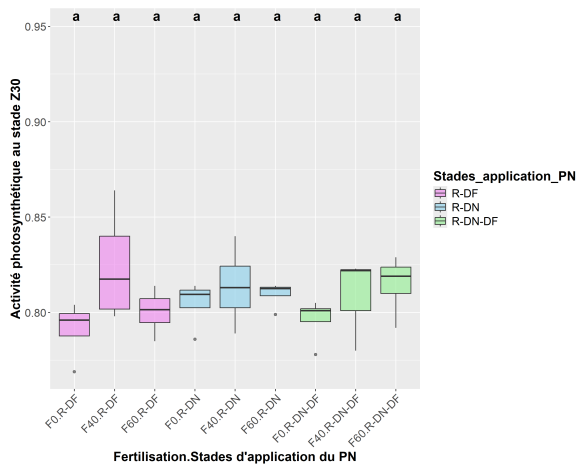


(d)

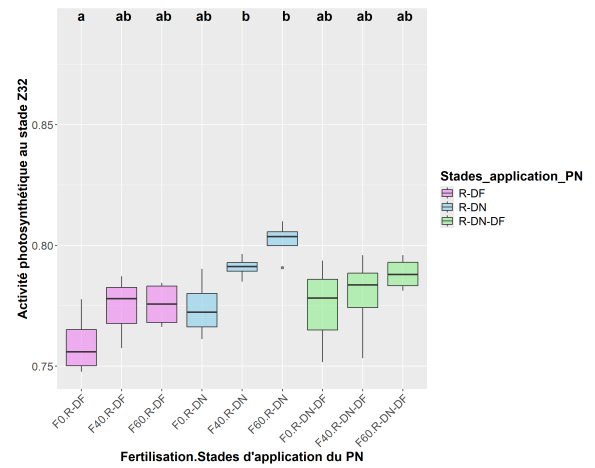
FIGURE 5.21 – Boxplots de la couverture foliaire au stade 30, 32, 39 et 65 en fonction de la fertilisation*stades d’application PN : Objectif 3

5.5.3 Activité photosynthétique

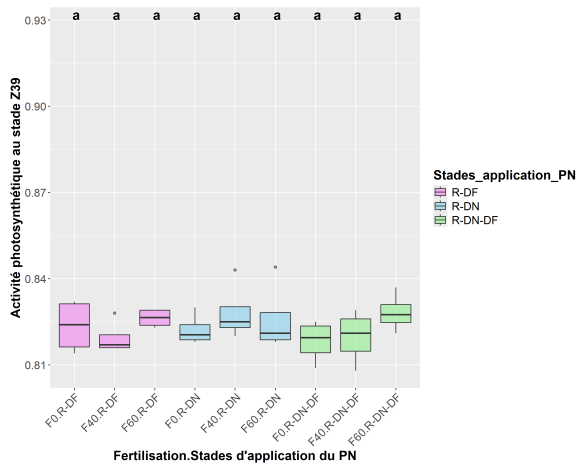
La mesure écophysiological de l’activité photosynthétique ne permet de distinguer ni un effet de l’omission du PN, ni de la fertilisation.



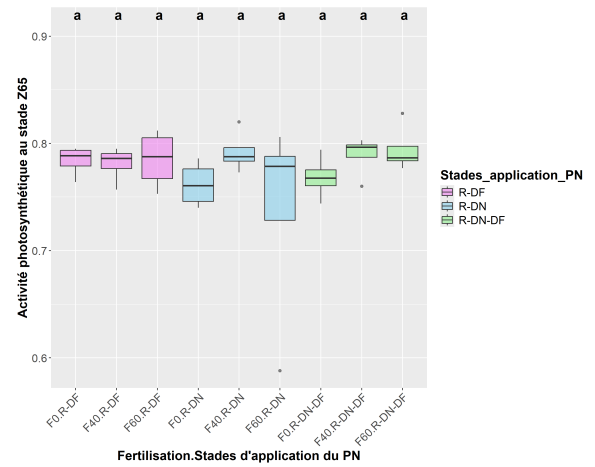
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 5.22 – Boxplots de l'activité photosynthétique (Fv/Fm) au stade 30, 32, 39 et 65 en fonction de la fertilisation* stades d'application PN : Objectif 3

Biomasse aérienne totale

La biomasse aérienne totale, quant à elle permet de distinguer à nouveau, le fait que la fraction apporté au deuxième noeud compense l'omission de l'apport à la dernière feuille tant au stade 39 qu'au stade 65 pour les F40 et F60.

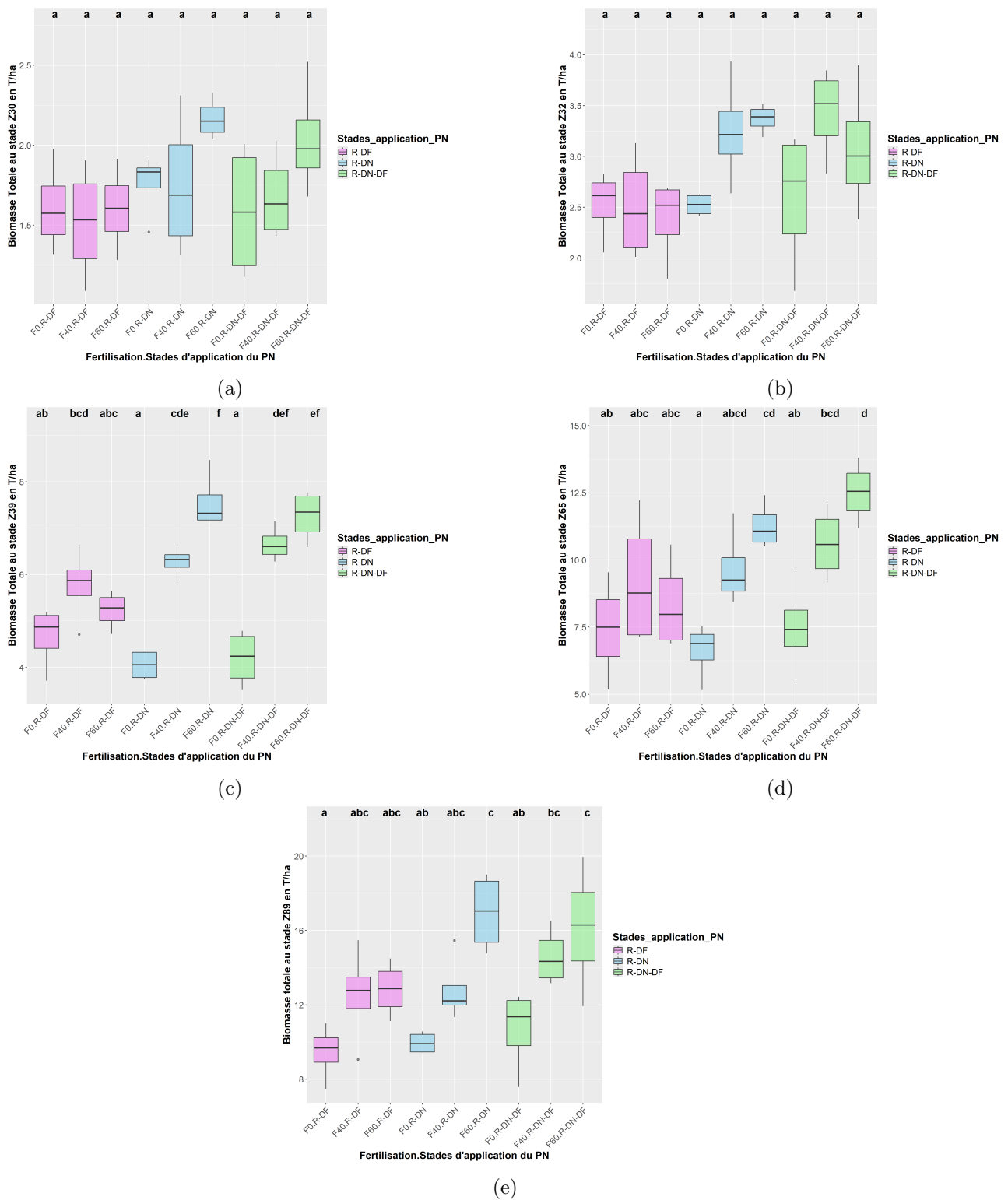


FIGURE 5.23 – Boxplots de la biomasse aérienne totale au stade 30, 32, 39, 65 et 89 en fonction de la fertilisation* stades d’application PN : Objectif 3

5.5.4 Rendement approximé

Concernant le rendement approximé, aucune différence ne s’observe pour le stade d’application du PN.

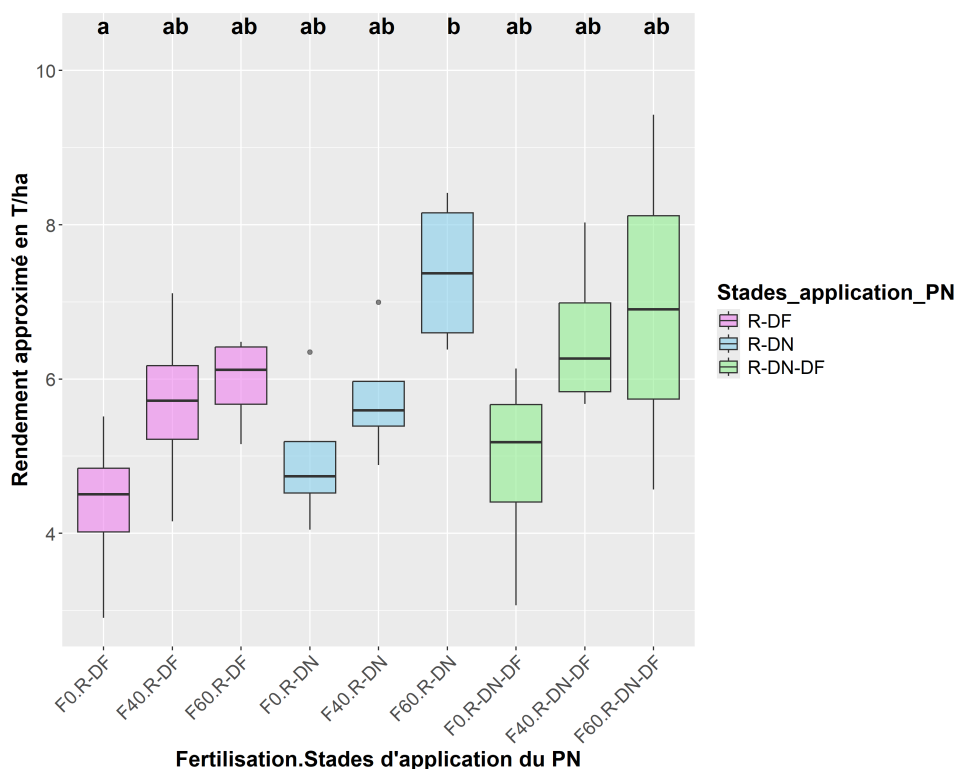


FIGURE 5.24 – Boxplot du rendement approximé en fonction de la fertilisation* stades d'application PN : Objectif 3

5.5.5 Que retenir de l'objectif 3 : Effet de l'omission du PN ?

Pour cet objectif, il convient de retenir qu'une omission de l'apport de la zéolithe à la dernière feuille peut s'envisager sans connaître de diminution significative de la densité d'épis, de la couverture foliaire ou encore la production de la biomasse.

5.6 Courbe de dilution de l'azote

La courbe de dilution de l'azote du blé d'hiver a été calculée au stade BBCH 32 et 65. À noter que les prélèvements de biomasse inférieurs à 1 T/ha ne peuvent pas être comparés à la courbe de référence (JUSTES et al. 1994). Ce qui n'est pas le cas pour les stades observés. La tendance générale observée entre les stades montre bien qu'à mesure où la biomasse augmente, le contenu en azote diminue dans les tissus de la plante. Au stade 32, seuls les traitements 4 à 6 ont reçu un apport de zéolithe. Au stade 65, le dernier apport a été reçu trois semaines auparavant.

Pour les stades 32 et 65, seule la fertilisation a un effet significatif sur la teneur en azote (tableau 5.1). En particulier, les traitements avec le niveau fertilisation azotée recommandée (180 U.N.) ont un contenu en azote plus élevé plus qu'avec les niveaux de fertilisation intermédiaire et nul. Notamment, un écart relativement important s'établit entre les traitements 1 et 4 avec les autres. Le contenu en azote des témoins avec apport de zéolithe 4 a contenu légèrement supérieur mais cependant pas significative. En outre, les traitements 2, 5 et 8 ne sont relativement proches des traitements 3 et 6, suggérant la potentialité de l'efficacité de la zéolithe à un niveau intermédiaire de la fertilisation azotée (120 U.N.). En outre, pour les traitements 8, 11 et 14 s'opposant de par l'omission de la zéolithe, il est observé que seul le 14 (R-DF) connaît une carence plus élevée.

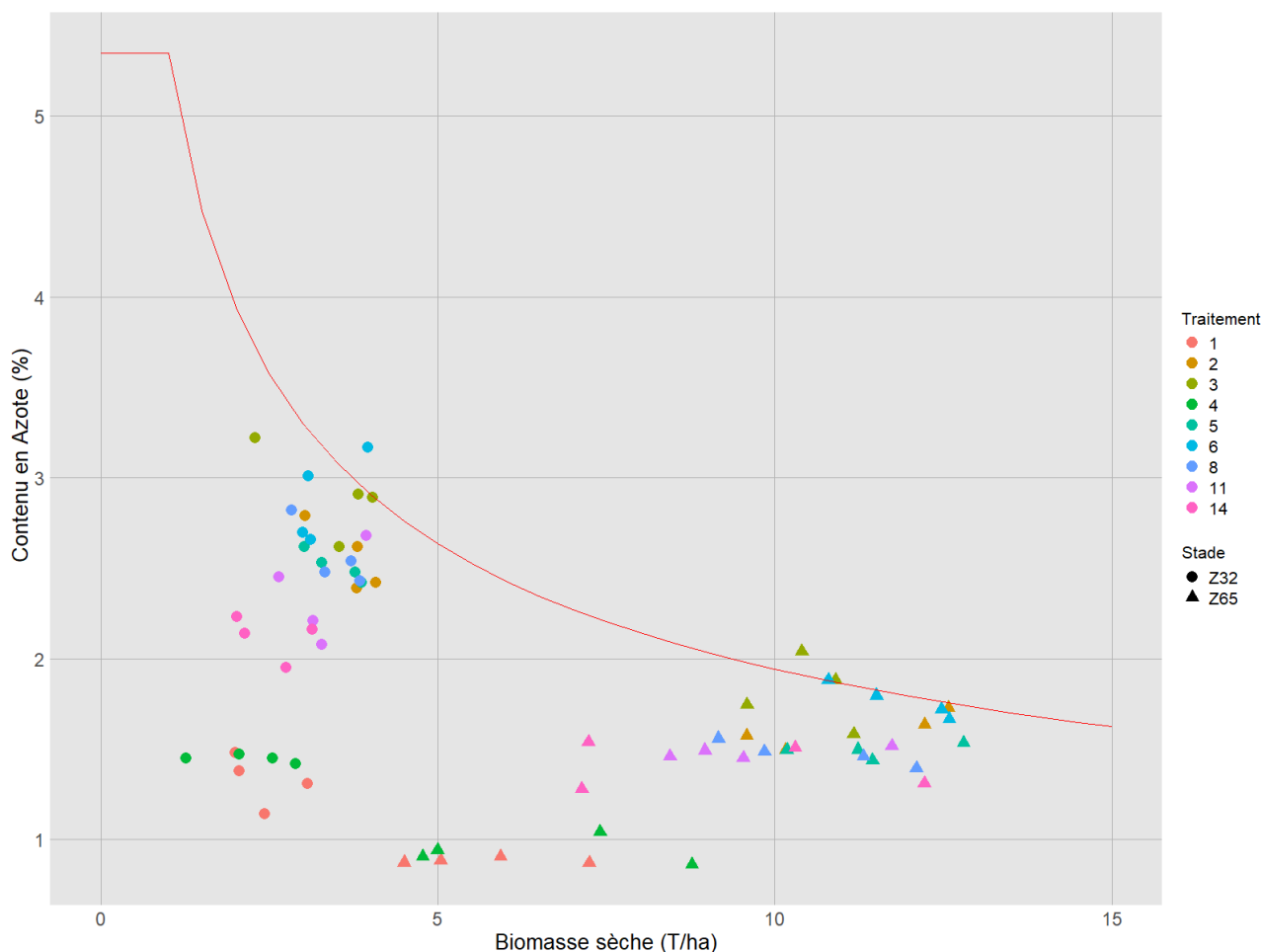


FIGURE 5.25 – Courbe de dilution de l'azote

5.7 Maladies

La recherche d'alternatives aux produits phytosanitaires est également un enjeu dans la préservation de la vie du sol et le maintien de la qualité de l'eau des nappes phréatiques. Les zéolithes auraient le potentiel de réduire les impacts environnementaux provoqués par le contrôle des maladies des plantes (DE SMEDT, SOMEUS et SPANOGHE 2015; CATALDO et al. 2021). Leur structure particulière, leur petite taille de particules, leur capacité à absorber le dioxyde de carbone (CO₂) et à réduire le stress thermique font des zéolithes un produit satisfaisant pour le revêtement des feuilles contre les maladies fongiques et les ravageurs (DE SMEDT, SOMEUS et SPANOGHE 2015). Dans ce contexte d'utilisation, le degré de micronisation du matériau devient crucial pour éviter l'obstruction des buses lors de la pulvérisation. En effet, la capacité des zéolithes à interagir avec l'environnement extérieur s'intensifie à mesure que sa taille diminue. Cela s'explique par l'augmentation de la surface de contact spécifique avec la feuille. (RUMBOS et al. 2016) Le FertiRoc® a une taille de particule de taille 3 m. Cela permettrait donc d'obtenir une barrière aux principales maladies foliaires du blé comme la septoriose et la rouille brune. La pression de ces dernières a été favorisée par les conditions climatiques très humides au printemps (figure 4.4).

5.7.1 La septoriose

La fréquence et la gravité de la septoriose au stade mi-épiaison se retrouvent à la figure 5.26. Les résultats des cotations pour les feuilles F4 présentent une fréquence et gravité similaires aux

alentours respectivement de 100 % et de 40 %. Au contraire de la feuille F3 où les traitements 5, 6 et 14 ont une fréquence respectivement de 50, 45 et 30 %. Cette tendance à la baisse peut s'expliquer par le fait qu'ils sont reçu une fraction de zéolithe à la dernière feuille. Cependant, c'est aussi le cas du traitement 8. Il est donc difficile de conclure quant à un réelle effet de "biocontrôle" de la zéolithe sur la septoriose. Néanmoins, cela pourrait être une piste à explorer par des analyses du film de zéolithe avec la paroi des cellules végétales des feuilles.

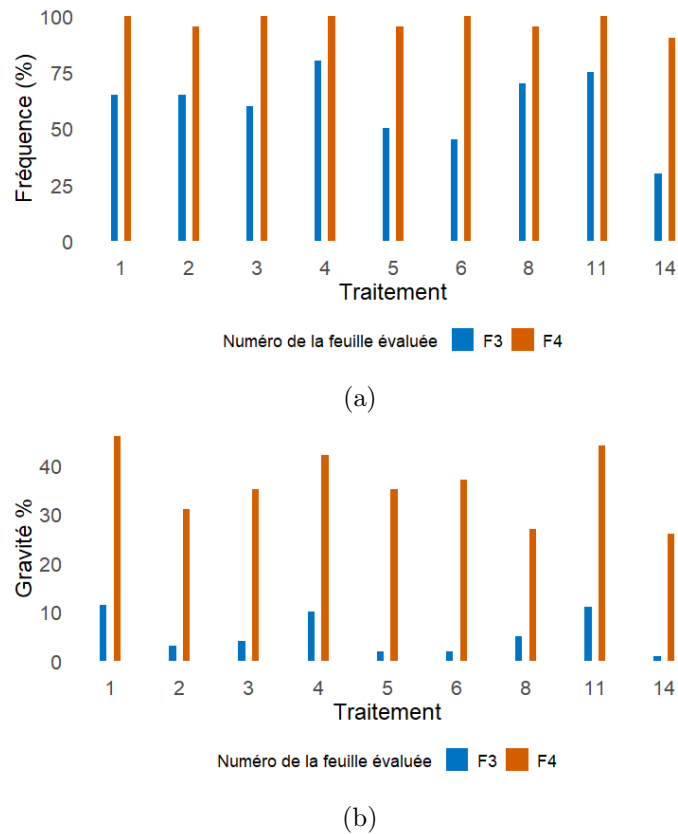
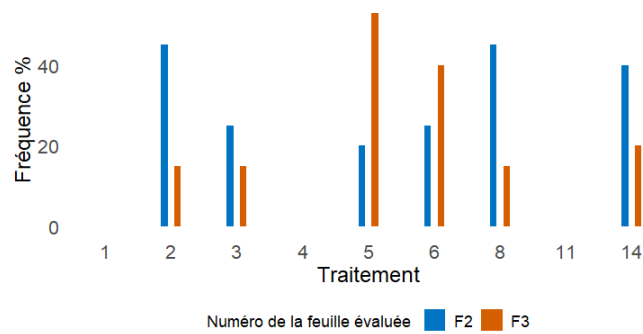


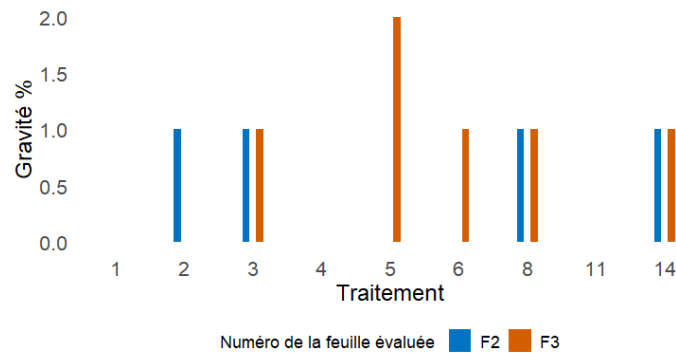
FIGURE 5.26 – Fréquence et gravité de la septoriose au stade 55

5.7.2 La rouille brune

La fréquence et la gravité de la rouille brune au stade mi-épiaison se retrouvent à la figure 5.27. Lorsqu'elle est observée, la fréquence et la gravité de cette dernière pour la F3 sont relativement faibles avec une fréquence plus élevée pour le traitement 5. Concernant la F2, la tendance des fréquences est inverse selon le traitements. La gravité est de l'ordre de 1%.



(a) Fréquence de la rouille brune au stade 55



(b) Gravité de la rouille brune au stade 55

FIGURE 5.27 – Fréquence et gravité de la rouille brune au stade 55

5.8 Analyse multivariée

Par le biais du cercle de corrélation du premier plan factoriel figure F.1, 40 % de la variance totale peut être expliquée. L'axe horizontal correspond à la première dimension est positivement corrélée de manière supérieure à 0.70 à ces variables : la biomasse totale, la couverture foliaire et l'activité photosynthétique. Cependant, il est négativement corrélé à la densité de talles et au LAI. L'axe vertical correspond à la seconde dimension corrélée à ces variables : la biomasse des feuilles, l'azote prélevé par les feuilles, l'indice de surface foliaire et la densité des épis.

Pour apporter plus de clarté, trois autres graphiques de la PCA ont été générés : un premier en impliquant la répartition des niveaux de fertilisation, un second représentant la zéolithe et un troisième concernant les stades d'applications.

L'effet hautement significatif de la fertilisation sur l'ensemble des variables pour tous les traitements se retrouve sur la figure 5.28 : il y a une distinction nette entre l'absence d'apports d'azote et les niveaux intermédiaire et recommandé. Pour les niveaux F40 et F60, les centroïdes sont relativement proches.

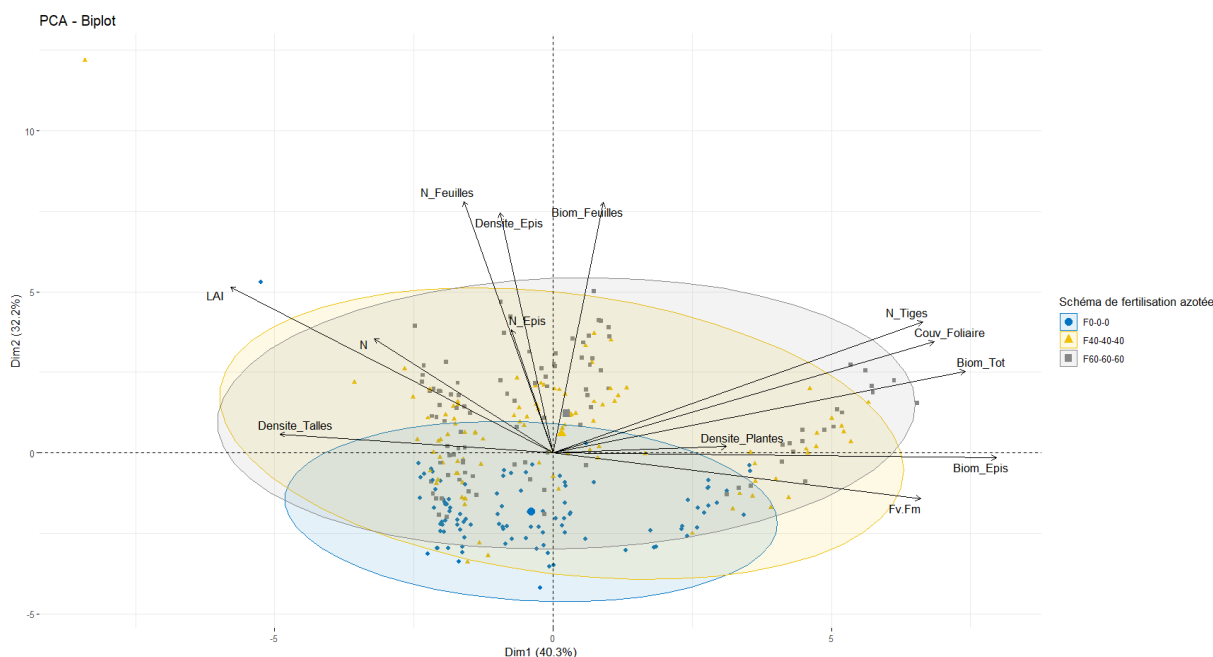


FIGURE 5.28 – Analyse en composantes principales du facteur fertilisation

La zéolithe n'a pas eu d'effet excepté sur la couverture foliaire pour le stade 65 et la densité de talles au stade 39 visible sur la tableau 5.2.

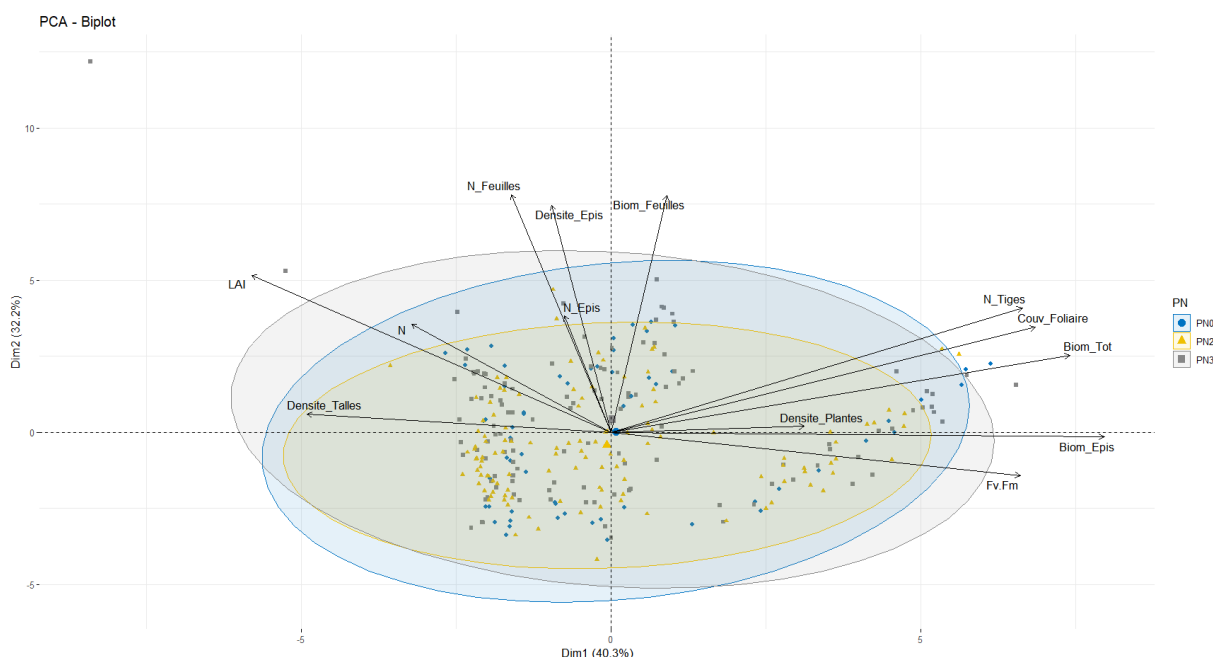


FIGURE 5.29 – Analyse en composantes principales du facteur PN

Le stade d'application : R-DN-DF semble être associé à des valeurs plus élevées de LAI et N. Cela signifie que ce stade d'application de la zéolithe est peut-être lié à une plus grande densité de feuillage ou de contenu en azote. Les groupes R-DN et R-DN-DF sont plus proches du centre du graphique, indiquant une contribution modérée ou moyenne à toutes les variables. Le groupe Aucun (pas d'application de zéolithe) se situe plus à droite et est associé aux variables comme Densité de plantes et densité épis, suggérant que l'absence de zéolithe pourrait être liée à une plus grande densité de plantes.

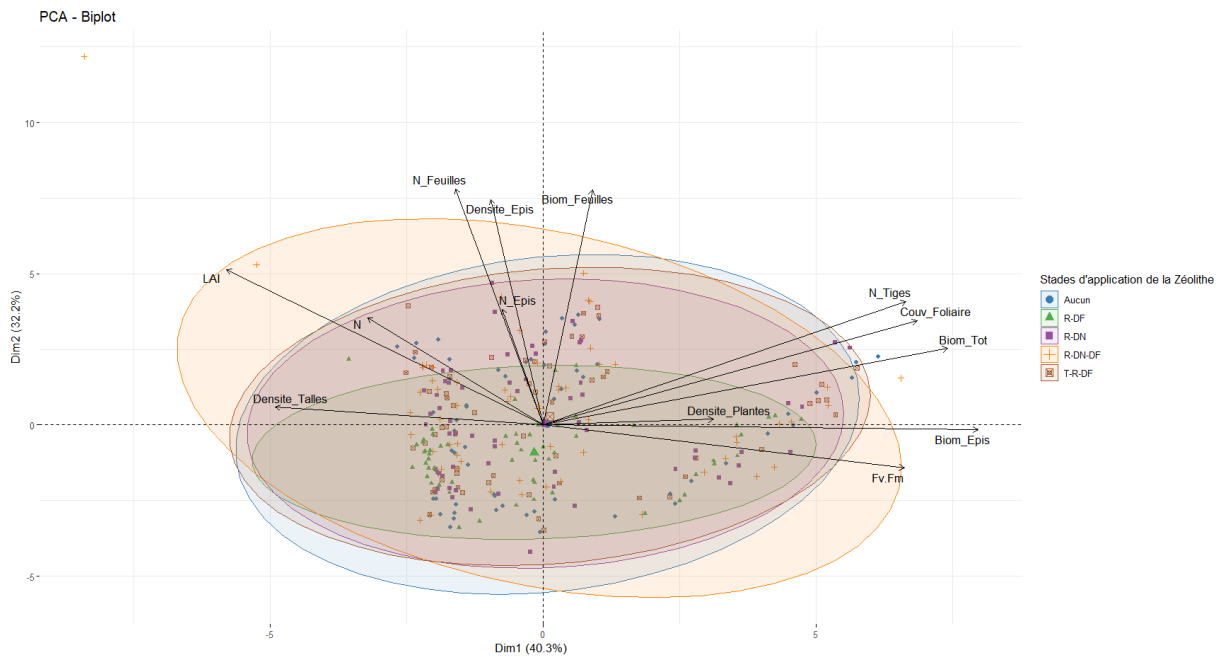


FIGURE 5.30 – Analyse en composantes principales du facteur stades d’application du PN

5.9 Compléments de discussion

Au moment de faire le point sur cette discussion des résultats, il convient de prendre un peu de hauteur quant à la méthode de collecte des observations de même que des conditions météorologiques froides et pluvieuses de cette saison culturale. Premièrement, l’activité photosynthétique n’a pu être mesurée de manière convenable étant donné la trop grande variabilité au niveau de la prise du temps de mesures et au moment où elle est réalisée. (DIGRADO 2018). La prise de recul est dès lors nécessaire au regard porté sur l’interprétation de cette mesure. Deuxièmement, les conditions météorologiques particulièrement froides et pluvieuses ont perturbés plusieurs étapes du développement physiologique du blé : comme la période de remplissage du grain. La qualité des grains se retrouvent être altérées et les rendements moyens en France sont de l’ordre 6,09 T/ha. (TERRE-NET 2024) Concernant les variables principales sur lesquelles peut potentiellement agir la zéolithe comme le prélèvement de l’azote ou encore la production de biomasse, seule une augmentation significative selon la fertilisation azotée est observée et entre en accord avec QUEZADA et BRAGAZZA 2023 et BAUMANN 2024. Selon BAUMANN 2024, il est possible d’observer en une augmentation moyenne du rendement de grain en blé d’hiver (variété Arina) de 6,7 % sur l’ensemble du gradient de fertilisation azotée (de 50 à 155kg N ha⁻¹). Il convient de se remémorer également que l’essai ne comporte pas de rendement moissonneuse. Par conséquent, il est pertinent de se remémorer que les variables collectées ont eu pour objectif de diriger vers les réponses des caractéristiques écophysiologiques du blé d’hiver en pré-récolte.

Chapitre 6

Contribution personnelle

Ce travail de fin d'études représente l'aboutissement de mon rêve depuis mes douze ans : devenir bioingénieur. Dès lors, il constitue un engagement personnel profond et une réelle motivation de mettre oeuvre les compétences acquises ainsi que d'en développer d'autres. Le sujet proposé par mon promoteur constitue un enjeu de taille dans la gestion de la fertilisation azotée de l'agriculture de demain. J'ai donc conscience de l'importance de mener à bien ce projet.

Le choix des variables étudiées ont fait l'objet d'une mûre réflexion par mon promoteur et moi-même afin de répondre aux objectifs fixés au départ tout en tenant compte de la contrainte liée au fait de ne pas disposer de parcelles de rendement.

Les relevés des données ont été effectués par mes soins ainsi qu'à l'aide de mes collègues Tfstes et du personnel du CEPICOP lors de mesures chronophages comme le prélèvement des biomasses.

La conduite de ce travail a nécessité une résilience face aux conditions météorologiques sur le terrain. L'improvisation et l'adaptation se sont révélées essentielles à cette étape. Ce qui semblait initialement être un formalisme est devenu un véritable défi. Certaines mesures, telles que le broyage des échantillons et LAI étaient relativement laborieuses en raison de leur durée et leur méthodologie. Ensuite, l'élaboration de l'analyse statistique a également nécessité une attention minutieuse pour la réaliser de la manière la plus pertinente possible.

Conclusion

L'objectif principal de la gestion de la fertilisation azotée du blé d'hiver est d'atteindre un rendement optimal tout en limitant la quantité d'azote appliqué pour limiter d'une part les impacts environnementaux par lessivage (NO_3^-) et d'autre part, minimiser les coûts de production. Le développement de moyen de réduire la nutrition azotée comme étudié ici par le biais de la zéolithe constitue un élément de réponse vers lequel se diriger. L'étude a pu montré l'importance du stade phénologique d'application de ce minéral bénéfique qui correspond au schéma de fractionnement de la fumure azotée recommandée du Livre Blanc Céréales : tallage-redressement-dernière feuille. Pratiquement, cela permet potentiellement aux agriculteurs d'appliquer l'azote et le biostimulant en un seul passage résultant d'un gain de passage au champs. De surcroît, l'étude a confirmé l'influence hautement significative de la fertilisation azotée sur l'ensemble des variables étudiées. La zéolithe permet tout de même d'augmenter la quantité d'azote prélevé ainsi que la production de biomasse. Son application dépend tout de même de la quantité et le stade phénologique d'application.

Perspectives et recommandations

Pour approfondir l'étude de l'effet des facteurs, il serait judicieux de reconduire l'étude sur plusieurs années et dans différentes régions.

Tout d'abord, disposer de parcelles dédiées aux rendements finaux permettraient de renforcer les constats et analyses issues des observations pré-récoltes prédominantes dans l'évaluation du rendement.

Ensuite, il serait pertinent d'effectuer le dosage de l'azote à maturité afin de pouvoir évaluer le NUE, l'azote remobilisé par la plante au stade de la maturité. D'ailleurs, le ratio d'absorption de l'azote aérien par rapport à l'azote du sol à différents stades clés du développement de la plante. En outre, il pourrait être opportun de doser la quantité de protéine dans le grain pour obtenir un indice sur la qualité du blé.

De plus, il conviendrait d'améliorer la prise de mesure de l'activité photosynthétique avec le Handy Pea (annexe D) : optimiser le temps de mesures et augmenter la fréquence du nombre de mesures.

De surcroît, une hypothèse intéressante à tester pourrait être celle du renforcement de l'interaction entre les plantes et les microorganismes du sol. Cela se traduirait par porter attrait à l'activité enzymatique extracellulaire du sol afin. Par ailleurs, il aurait été pertinent de réaliser une étude du ratio de l'absorption de l'azote en surface par rapport à l'azote souterrain. QUEZADA et BRAGAZZA 2023 a notamment souligné l'effet positif de la zéolithe. Cela incluerait de s'attarder sur la mesure de la biomasse racinaire.

Enfin, une analyse économique pourrait être réalisée afin de déterminer la rentabilité de la culture selon le schéma de fertilisation appliqué et la quantité de biostimulant employé. Pour cela, il serait intéressant de faire une analyse comparative du rendement phytotechnique et économique.

Bibliographie

- ARVALIS (2017). *Blé tendre - Guide de culture* | ARVALIS. URL : <https://www.arvalis.fr/editions/ble-tendre-guide-de-culture> (visité le 11/08/2024).
- (juin 2022). *Les Essentiels d'ARVALIS - Comment s'élabore le rendement des céréales à paille ?* fr. URL : <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/comment-selabore-le-rendement> (visité le 10/07/2024).
- (jan. 2023). *Fertilisation du blé tendre : fractionner l'azote en trois apports*. fr. URL : <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/fractionner-lazote-en-trois-apports> (visité le 02/07/2024).
- (jan. 2024). *Blé tendre : les besoins unitaires en azote des variétés réactualisés pour 2024*. fr. URL : <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/les-besoins-unitaires-en-azote-des-varietes-reactualises-pour-2024> (visité le 12/08/2024).
- BAUMANN, Tamara (juin 2024). *Effects of a Zeolite-based Foliar Biostimulant on Winter Wheat and Maize*. fr. URL : <https://www.agrarforschungschweiz.ch/en/2024/06/effects-of-a-zeolite-based-foliar-biostimulant-on-winter-wheat-and-maize/> (visité le 16/08/2024).
- CASSMAN, Kenneth G. et Achim DOBERMANN (jan. 2022). « Nitrogen and the future of agriculture : 20 years on ». en. In : *Ambio* 51.1, p. 17-24. ISSN : 1654-7209. DOI : 10.1007/s13280-021-01526-w. URL : <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01526-w> (visité le 03/08/2024).
- CATALDO, Eleonora et al. (août 2021). « Application of Zeolites in Agriculture and Other Potential Uses : A Review ». en. In : *Agronomy* 11.8. Number : 8 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 1547. ISSN : 2073-4395. DOI : 10.3390/agronomy11081547. URL : <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/8/1547> (visité le 02/08/2024).
- CÉRÉALES, Livre Blanc (2017). *Densité de semis – Livre Blanc Céréales*. en-US. URL : <https://livre-blanc-cereales.be/thematiques/semis/densite-de-semis/> (visité le 15/08/2024).
- (2023). *Résultats d'essais variétaux – Froment d'hiver – Livre Blanc Céréales*. en-US. URL : <https://livre-blanc-cereales.be/thematiques/varietes/fiches-varietes-froment/resultats-dessais/> (visité le 02/07/2024).
- (mars 2024). *2024-02 Livre – Livre Blanc Céréales*. en-US. URL : <https://livre-blanc-cereales.be/2024-02-livre/> (visité le 01/07/2024).
- CLARK, Michael et David TILMAN (juin 2017). « Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice ». en. In : *Environmental Research Letters* 12.6. Publisher : IOP Publishing, p. 064016. ISSN : 1748-9326. DOI : 10.1088/1748-9326/aa6cd5. URL : <https://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aa6cd5> (visité le 30/07/2024).
- COLELLA, Carmine et William S. WISE (mai 2014). « The IZA Handbook of Natural Zeolites : A tool of knowledge on the most important family of porous minerals ». In : *Microporous and Mesoporous Materials*. 17th International Zeolite Conference, Moscow, Russia, July 7-12, 2013 :Plenary-, Keynote- and Selected Papers dedicated to Dr. Michael Stocker on the occasion of his retirement as Editor-in-Chief of Microporous and Mesoporous Materials 189,

- p. 4-10. ISSN : 1387-1811. DOI : 10.1016/j.micromeso.2013.08.028. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1387181113004162> (visité le 13/08/2024).
- CPAR (2024). *Méthodes*. fr. URL : <https://www.brabantwallon.be/vivre-en-bw/agriculture-et-jardins/laboratoires-et-analyses/nos-methodes-danalyses> (visité le 06/03/2024).
- DE SMEDT, Caroline, Edward SOMEUS et Pieter SPANOGHE (2015). « Potential and actual uses of zeolites in crop protection ». en. In : *Pest Management Science* 71.10. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/ps.3999>, p. 1355-1367. ISSN : 1526-4998. DOI : 10.1002/ps.3999. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ps.3999> (visité le 16/08/2024).
- DIGRADO, Anthony (mars 2018). « Influence of combined environmental constraints on photochemical capacity and CO2 fluxes in a temperate managed grassland. » English. In : Publisher : ULiège. GxABT - Liège Université. Gembloux Agro-Bio Tech. URL : <https://orbi.uliege.be/handle/2268/221376> (visité le 17/07/2024).
- DUVIVIER, Maxime et al. (fév. 2018). « Schéma de traitement fongicide en blé : Peut-on retarder la première intervention fongicide dans les champs wallons ? » In : *Le Livre Blanc Céréales Gembloux*.
- EROGLU, Nazife, Mevlut EMEKCI et Christos G ATHANASSIOU (2017). « Applications of natural zeolites on agriculture and food production ». en. In : *Journal of the Science of Food and Agriculture* 97.11. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/jsfa.8312>, p. 3487-3499. ISSN : 1097-0010. DOI : 10.1002/jsfa.8312. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jsfa.8312> (visité le 15/08/2024).
- EUROPEAN, Union (juin 2019). *Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and repealing Regulation (EC) No 2003/2003 (Text with EEA relevance)*. en. Legislative Body : CONSIL, EP. URL : <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/1009/oj/eng> (visité le 12/08/2024).
- FAO (2022). *Inorganic fertilizers 1990–2020*. English. ISSN : 2709-006X. FAO ; ISBN : 978-92-5-136631-8. URL : <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cc0947en> (visité le 01/08/2024).
- GUO, Kaiyan et al. (mars 2023). « Biological nitrogen fixation in cereal crops : Progress, strategies, and perspectives ». English. In : *Plant Communications* 4.2. Publisher : Elsevier. ISSN : 2590-3462, 2590-3462. DOI : 10.1016/j.xplc.2022.100499. URL : [https://www.cell.com/plant-communications/abstract/S2590-3462\(22\)00346-7](https://www.cell.com/plant-communications/abstract/S2590-3462(22)00346-7) (visité le 07/08/2024).
- HANSATECH, Instruments (2024). *Handy PEA+*. en-GB. URL : <https://www.hansatech-instruments.com/product/handy-pea/> (visité le 16/07/2024).
- INRAE (2020). *L'origine des blés modernes révélée | INRAE*. fr. URL : <https://www.inrae.fr/actualites/lorigine-bles-modernes-revelee> (visité le 11/08/2024).
- IRM (2024a). *Atlas climatique*. fr. URL : <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/atlas-climatique/cartes-climatiques/temperature-de-lair/moyenne/annuel> (visité le 21/06/2024).
- (2024b). *Bilans climatologiques 2024*. fr. URL : <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/bilans-climatologiques/2024/mai> (visité le 01/07/2024).
- (2024c). *Le climat de la Belgique-Contexte général*. fr. URL : <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/mois-apres-mois/contexte-general> (visité le 01/07/2024).
- JARDIN, Patrick du (oct. 2015). « Plant biostimulants : Definition, concept, main categories and regulation ». In : *Scientia Horticulturae* 196. DOI : 10.1016/j.scienta.2015.09.021.

- JAROSZ, Renata et al. (juin 2022). « The use of zeolites as an addition to fertilisers – A review ». In : *CATENA* 213, p. 106125. ISSN : 0341-8162. DOI : 10.1016/j.catena.2022.106125. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816222001114> (visité le 13/08/2024).
- JUSTES, E. et al. (oct. 1994). « Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Wheat Crops ». In : *Annals of Botany* 74.4, p. 397-407. ISSN : 0305-7364. DOI : 10.1006/anbo.1994.1133. URL : <https://doi.org/10.1006/anbo.1994.1133> (visité le 14/07/2024).
- KALAJI, Hazem M. et al. (avr. 2017). « Frequently asked questions about chlorophyll fluorescence, the sequel ». eng. In : *Photosynthesis Research* 132.1, p. 13-66. ISSN : 1573-5079. DOI : 10.1007/s11120-016-0318-y.
- KASAJIMA, Ichiro et al. (août 2011). « Molecular distinction in genetic regulation of nonphotochemical quenching in rice ». In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108.33. Publisher : Proceedings of the National Academy of Sciences, p. 13835-13840. DOI : 10.1073/pnas.1104809108. URL : <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1104809108> (visité le 16/08/2024).
- KHALIQ, Abdul et al. (mars 2024). « Synergistic Effects of Urea, Poultry Manure, and Zeolite on Wheat Growth and Yield ». en. In : *Soil Systems* 8.1. Number : 1 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 18. ISSN : 2571-8789. DOI : 10.3390/soilsystems8010018. URL : <https://www.mdpi.com/2571-8789/8/1/18> (visité le 28/02/2024).
- LADHA, J. K. et al. (jan. 2016). « Global nitrogen budgets in cereals : A 50-year assessment for maize, rice and wheat production systems ». en. In : *Scientific Reports* 6.1. Publisher : Nature Publishing Group, p. 19355. ISSN : 2045-2322. DOI : 10.1038/srep19355. URL : <https://www.nature.com/articles/srep19355> (visité le 03/08/2024).
- LAZAR, THOMAS (mai 2003). « Taiz, L. and Zeiger, E. Plant physiology. 3rd edn. » In : *Annals of Botany* 91.6, p. 750-751. ISSN : 0305-7364. DOI : 10.1093/aob/mcg079. URL : <https://doi.org/10.1093/aob/mcg079> (visité le 16/08/2024).
- LIU, Wenwen et al. (2017). « Nitrogen Limitation Adaptation (NLA) is involved in source-to-sink remobilization of nitrate by mediating the degradation of NRT1.7 in Arabidopsis ». en. In : *New Phytologist* 214.2. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/nph.14396>, p. 734-744. ISSN : 1469-8137. DOI : 10.1111/nph.14396. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/nph.14396> (visité le 07/08/2024).
- LYNCH, John et al. (fév. 2021). « Agriculture's Contribution to Climate Change and Role in Mitigation Is Distinct From Predominantly Fossil CO2-Emitting Sectors ». English. In : *Frontiers in Sustainable Food Systems* 4. Publisher : Frontiers. ISSN : 2571-581X. DOI : 10.3389/fsufs.2020.518039. URL : <https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2020.518039/full> (visité le 30/07/2024).
- MALTER, Bruno (sept. 2010). *Au pays du blanc bleu belge*. fr. Section : regions,namur,gembloux. URL : <https://www.lavenir.net/regions/namur/gembloux/2010/09/20/au-pays-du-blanc-bleu-belge-TXUX32YB6NDXPLWZNHCOU5ATY/> (visité le 27/02/2024).
- MAXWELL, Kate et Giles N. JOHNSON (avr. 2000). « Chlorophyll fluorescence—a practical guide ». In : *Journal of Experimental Botany* 51.345, p. 659-668. ISSN : 0022-0957. DOI : 10.1093/jexbot/51.345.659. URL : <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659> (visité le 16/08/2024).
- MONDAL, Mousumi et al. (fév. 2021). « Zeolites Enhance Soil Health, Crop Productivity and Environmental Safety ». en. In : *Agronomy* 11.3, p. 448. ISSN : 2073-4395. DOI : 10.3390/agronomy11030448. URL : <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/3/448> (visité le 10/02/2024).

- MUHAMMAD, Ihsan et al. (avr. 2022). « Nitrogen Fertilizer Modulates Plant Growth, Chlorophyll Pigments and Enzymatic Activities under Different Irrigation Regimes ». en. In : *Agronomy* 12.4. Number : 4 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 845. ISSN : 2073-4395. DOI : 10.3390/agronomy12040845. URL : <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/4/845> (visité le 07/08/2024).
- MUMINJANOV, Hafiz et Murat KOYSHIBAYEV (avr. 2016). *EnteGuidelines for Monitoring Diseases, Pests and Weeds in Cereal Crops*. ISBN : 978-92-5-109180-7.
- MUMPTON, Frederick A. (mars 1999). « La roca magica : Uses of natural zeolites in agriculture and industry ». In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 96.7. Publisher : Proceedings of the National Academy of Sciences, p. 3463-3470. DOI : 10.1073/pnas.96.7.3463. URL : <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.96.7.3463> (visité le 11/08/2024).
- NATIONS, United (2024). *L'évolution démographique | Nations Unies*. fr. Publisher : United Nations. URL : <https://www.un.org/fr/un75/shifting-demographics> (visité le 02/08/2024).
- NIELSEN, David C., Juan J. MICELI-GARCIA et Drew J. LYON (2012). « Canopy Cover and Leaf Area Index Relationships for Wheat, Triticale, and Corn ». en. In : *Agronomy Journal* 104.6. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2134/agronj2012.0107n>, p. 1569-1573. ISSN : 1435-0645. DOI : 10.2134/agronj2012.0107n. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronj2012.0107n> (visité le 15/08/2024).
- PATRIGNANI, Andres et Tyson E. OCHSNER (2015). « Canopeo : A Powerful New Tool for Measuring Fractional Green Canopy Cover ». en. In : *Agronomy Journal* 107.6. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2134/agronj15.0150>, p. 2312-2320. ISSN : 1435-0645. DOI : 10.2134/agronj15.0150. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronj15.0150> (visité le 06/03/2024).
- PILON-SMITS, Elizabeth AH et al. (juin 2009). « Physiological functions of beneficial elements ». In : *Current Opinion in Plant Biology*. Physiology and Metabolism 12.3, p. 267-274. ISSN : 1369-5266. DOI : 10.1016/j.pbi.2009.04.009. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369526609000326> (visité le 12/08/2024).
- PROTECT'EAU (2024). *Réduction de la dérive | PROTECT'eau*. URL : <https://www.protecteau.be/fr/reduction-de-la-derive> (visité le 02/07/2024).
- QUEZADA, Juan Carlos et Luca BRAGAZZA (oct. 2023). « Foliar applications of a zeolite-based biostimulant affect soil enzyme activity and N uptake in maize and wheat under different levels of nitrogen fertilization ». In : *Journal of Plant Nutrition* 47.3. Publisher : Taylor & Francis _eprint : <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2280124>, p. 501-513. ISSN : 0190-4167. DOI : 10.1080/01904167.2023.2280124. URL : <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2280124> (visité le 07/02/2024).
- RITCHIE, Hannah et Max ROSER (fév. 2024). « Excess fertilizer use : which countries cause environmental damage by overapplying fertilizers? » In : *Our World in Data*. URL : <https://ourworldindata.org/excess-fertilizer> (visité le 13/08/2024).
- ROUPHAEL, Youssef et al. (août 2020). *Biostimulants for Sustainable Crop Production*. ISBN : 978-1-78676-336-5. DOI : 10.19103/AS.2020.0068.
- RUMBOS, C. I. et al. (juill. 2016). « Insecticidal potential of zeolite formulations against three stored-grain insects, particle size effect, adherence to kernels and influence on test weight of grains ». In : *Journal of Stored Products Research* 68, p. 93-101. ISSN : 0022-474X. DOI : 10.1016/j.jspr.2016.05.003. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022474X16300315> (visité le 16/08/2024).
- SEDAGHAT, Mojde, Saeid HAZRATI et Mojtaba OMRANI (mai 2022). « Use of zeolite and salicylic acid as an adaptation strategy against drought in wheat plants ». In : *South African Journal of Botany* 146, p. 111-117. ISSN : 0254-6299. DOI : 10.1016/j.sajb.2021.10.001.

- URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254629921004142> (visité le 16/08/2024).
- SHARMA, Radhika et al. (jan. 2024). « Chapter 1 - Current understanding and application of biostimulants in plants : an overview ». In : *Biostimulants in Plant Protection and Performance*. Sous la dir. d'Azamal HUSEN. Plant Biology, Sustainability and Climate Change. Elsevier, p. 1-20. ISBN : 978-0-443-15884-1. DOI : 10.1016/B978-0-443-15884-1.00003-8. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780443158841000038> (visité le 09/08/2024).
- SLAFER, Gustavo A. et al. (sept. 2022). « Facteurs physiologiques des réponses des grains par m² aux facteurs environnementaux et génétiques chez le blé ». In : *Field Crops Research* 285, p. 108593. ISSN : 0378-4290. DOI : 10.1016/j.fcr.2022.108593. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429022001642> (visité le 12/08/2024).
- SPF SANTÉ PUBLIQUE, Sécurité de la chaîne alimentaire (2019). *Le climat en Belgique*. fr. URL : <https://climat.be/en-belgique/climat-et-emissions/climat> (visité le 28/03/2024).
- STATISTA (2023a). *Blé : production mondiale en volume 2015-2022*. fr. URL : <https://fr.statista.com/statistiques/570403/ble-volume-de-production-dans-le-monde/> (visité le 11/08/2024).
- (2023b). *Global nitrogen fertilizer production by country*. fr. URL : <https://www.statista.com/statistics/1252656/nitrogen-fertilizer-production-by-country/> (visité le 01/08/2024).
- (2024). *Global fertilizer consumption by nutrient 1965-2021*. en. URL : <https://www.statista.com/statistics/438967/fertilizer-consumption-globally-by-nutrient/> (visité le 01/08/2024).
- SYNGENTA (avr. 2023). *SY REVOLUTION*. fr. URL : <https://www.syngenta.fr/cultures/semences/cereales/ble-tendre-dhiver/sy-revolution> (visité le 14/02/2024).
- TERRE-NET (2024). *Vous avez terminé votre moisson ? Partagez vos résultats pour les comparer à ceux de votre secteur !* fr-fr. URL : <https://www.terre-net.fr/moisson/article/869191/les-resultats-de-la-moisson-2024-directement-issus-du-terrain> (visité le 16/08/2024).
- TERRONES GAVIRA, François et Philippe BURNY (2012). « Evolution du marché mondial du blé au cours des cinquante dernières années ». French. In : ULg GxABT, CRA-w, Gembloux, Belgium. URL : <https://orbi.uliege.be/handle/2268/113246> (visité le 12/08/2024).
- WalOnMap (2024). en. URL : <http://geoportail.wallonie.be/walonmap> (visité le 23/06/2024).
- WILLENBORG, C. J. et R. C. VAN ACKER (sept. 2008). « The biology and ecology of hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.) and its implications for trait confinement ». en. In : *Canadian Journal of Plant Science* 88.5, p. 997-1013. ISSN : 0008-4220, 1918-1833. DOI : 10.4141/CJPS07144. URL : <http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.4141/CJPS07144> (visité le 11/08/2024).
- XING, Naichen et al. (oct. 2022). « Remote sensing retrieval of winter wheat leaf area index and canopy chlorophyll density at different growth stages ». In : *Big Earth Data* 6.4. Publisher : Taylor & Francis _eprint : <https://doi.org/10.1080/20964471.2021.1918909>, p. 580-602. ISSN : 2096-4471. DOI : 10.1080/20964471.2021.1918909. URL : <https://doi.org/10.1080/20964471.2021.1918909> (visité le 15/08/2024).
- YANN.POUPINEL (2024). *Power The Nature, produits pour une agriculture durable, France et Suisse, Nos solutions FertiRoc*. fr-FR. URL : <https://www.powerthenature.com/fertiroc/> (visité le 03/07/2024).
- ZADOKS, J. C., T. T. CHANG et C. F. KONZAK (1974). « A decimal code for the growth stages of cereals ». en. In : *Weed Research* 14.6. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>, p. 415-421. ISSN : 1365-3180. DOI : 10.1111/j.1365-3180.1974.

tb01084.x. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x> (visité le 13/08/2024).

Annexe A

Valeurs chiffrées et cartes interactives liées à l'azote

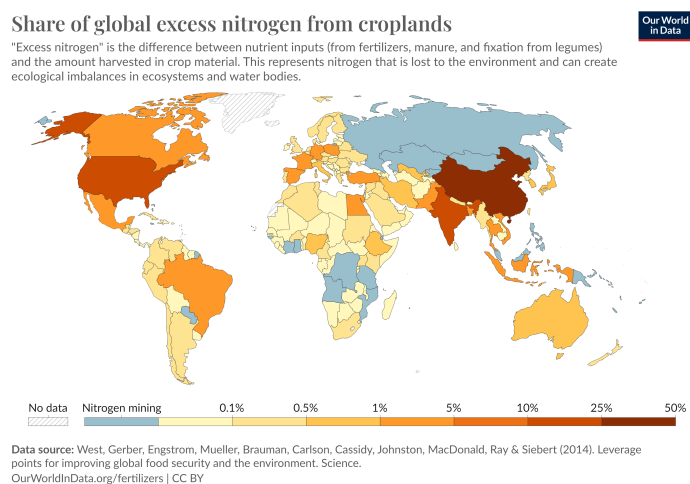


FIGURE A.1 – Share of global excess nitrogen from croplands (RITCHIE et ROSER 2024)

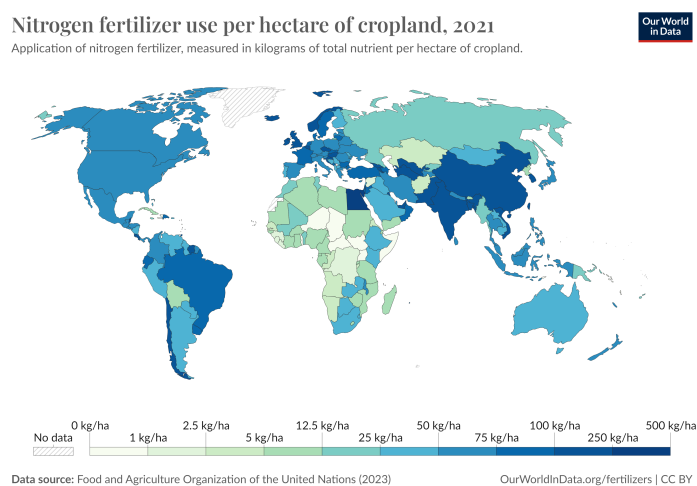


FIGURE A.2 – Nitrogen fertilizer application per hectare of cropland (RITCHIE et ROSER 2024)

Annexe B

Échelle BBCH améliorée du Livre Blanc
Céréales (2017) (ZADOKS, CHANG et
KONZAK 1974)

PRINCIPAUX STADES REPERES DE LA VEGETATION EN CEREALES

Échelle BBCH améliorée, les échelles individuelles

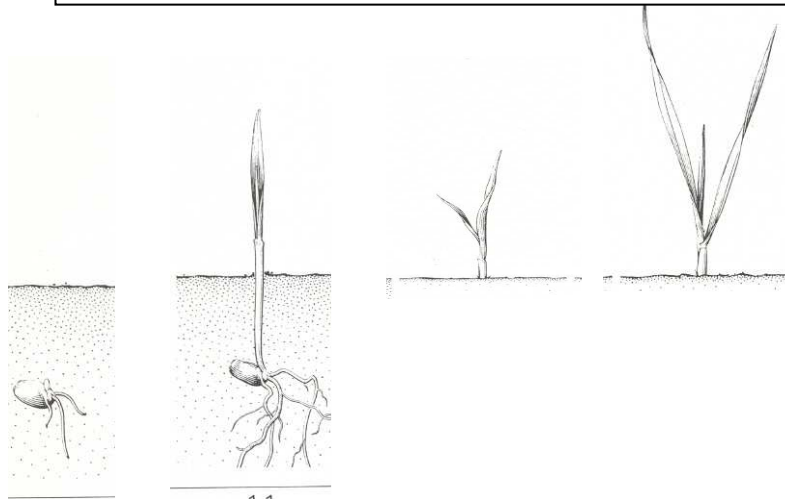
Céréales Witzemberger et al., 1989; Lancashire et al., 1991

Échelle BBCH des stades phénologiques des céréales

(froment, blé = *Triticum* sp. L., orge = *Hordeum vulgare* L., avoine = *Avena sativa* L., seigle = *Secale cereale* L.)

Stade principal 0: germination, levée

- 00 semence sèche (caryopse sec)
- 01 début de l'imbibition de la graine
- 03 imbibition complète
- 05 la radicule sort de la graine
- 06 élongation de la radicule, apparition de poils absorbants et développement des racines secondaires
- 07 le coléoptile sort de la graine
- 09 levée: le coléoptile perce la surface du sol



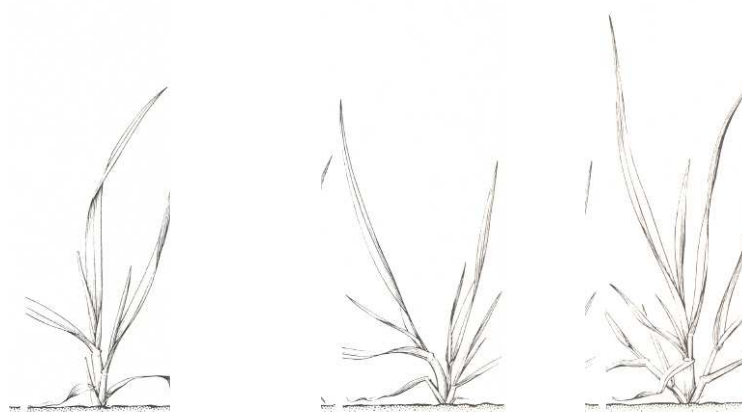
Stade principal 1: développement des feuilles 1, 2

- 10 la première feuille sort du coléoptile
- 11 première feuille étalée
- 12 2 feuilles étalées
- 13 3 feuilles étalées
- 1 . et ainsi de suite ...
- 19 9 ou davantage de feuilles étalées

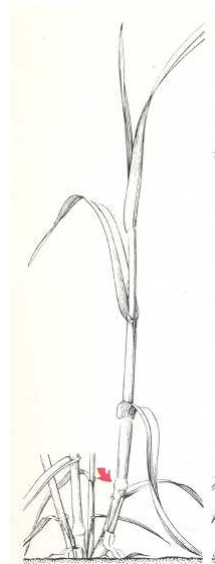
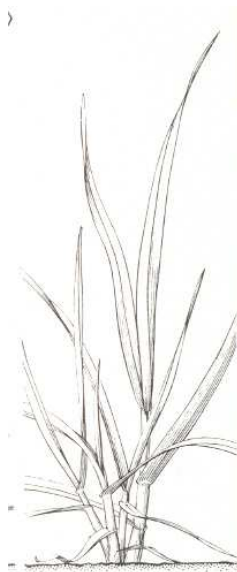
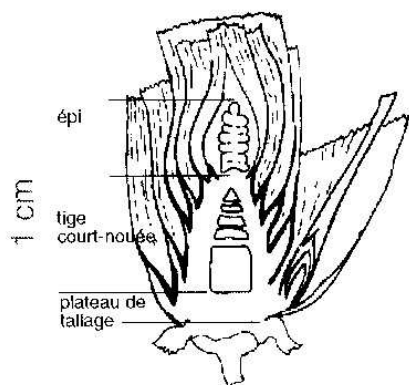
	Levée ³	Une feuille	Deux feuilles	Trois feuilles
Zadoks	10	11	12	13
Keller et Baggioloni	A	B	C	D
Feekes et Large	1	1	1	1

Stade principal 2: le tallage³

- 20 aucune talle visible
- 21 début tallage: la première talle est visible
- 22 2 talles visibles
- 23 3 talles visibles
- 2 . et ainsi de suite ...
- 29 fin tallage
- 1 Une feuille est étalée si sa ligule est visible ou si l'extrémité de la prochaine feuille est visible
- 2 Le tallage ou l'élongation de la tige principale peut intervenir avant le stade 13, dans ce cas continuez avec le stade 21
- 3 Si l'élongation de la tige principale commence avant la fin du tallage alors continuez au stade 30.



	Début tallage	Plein tallage	Fin tallage
Zadoks	21	26	30
Keller et Baggioloni	E	F	H
Feekes et Large	2	3	4



	Redressement	Premier nœud
Zadoks	30	31
Keller et Baggioloni	H	I
Feekes et Large	5	6

Stade principal 3: élongation de la tige principale

30 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.

31 le premier nœud est au plus à 1 cm au-dessus du plateau de tallage

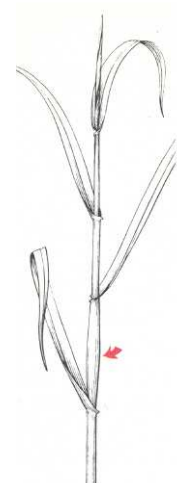
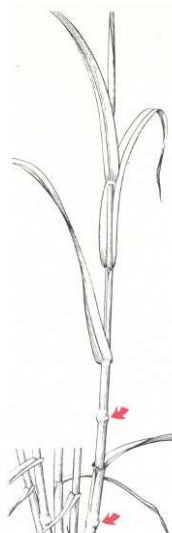
32 le deuxième nœud est au plus à 2 cm au-dessus du premier nœud

33 le troisième nœud est au plus à 2 cm au-dessus du deuxième nœud

3 . et ainsi de suite ...

37 la dernière feuille est juste visible, elle est encore enroulée sur elle-même

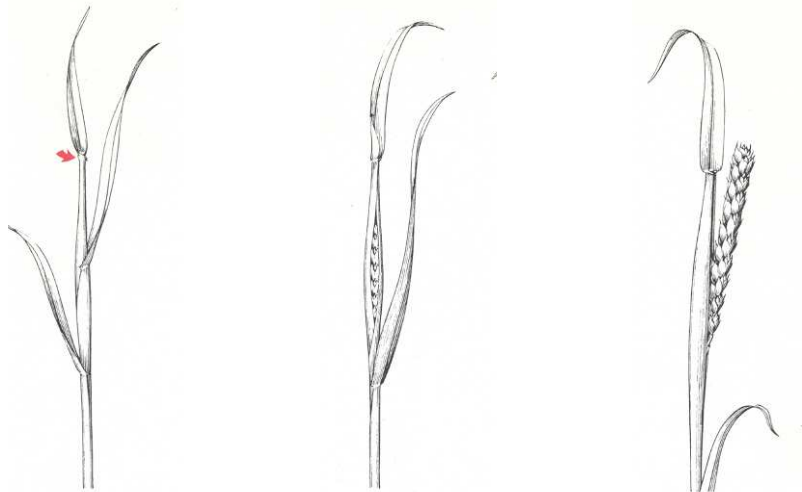
39 le limbe de la dernière feuille est entièrement étalé, la ligule est visible



	Deuxième nœud	Apparition de la dernière feuille
Zadoks	32	37
Keller et Baggioloni	J	K
Feekes et Large	7	8

Stade principal 4: gonflement de l'épi ou de la panicule, montaison

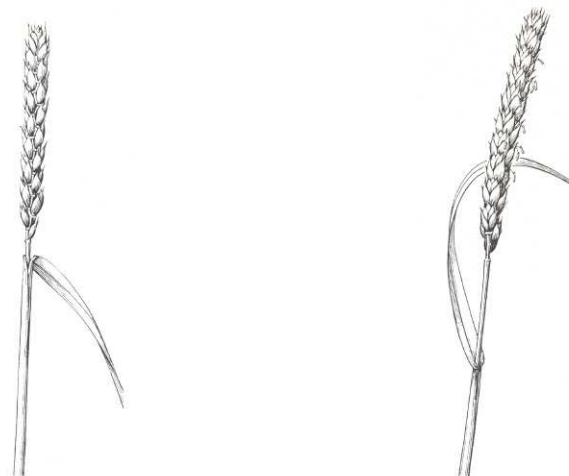
- 41 début gonflement: élongation de la gaine foliaire de la dernière feuille
- 43 la gaine foliaire de la dernière feuille est visiblement gonflée
- 45 gonflement maximal de la gaine foliaire de la dernière feuille
- 47 la gaine foliaire de la dernière feuille s'ouvre
- 49 les premières arêtes (barbes) sont visibles (pour les variétés aristées)



	Ligule visible	Gaine éclatée	Emergence de l'épi
Zadoks	39	45	50
Keller et Baggioloni	L	M	N
Feekes et Large	9	10	10.1

Stade principal 5: sortie de l'inflorescence ou épisaison

- 51 début de l'épisaison: 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
- 54 40% de l'inflorescence est sortie
- 55 mi-épisaison: 50% de l'inflorescence est sortie
- 56 60% de l'inflorescence est sortie
- 57 70% de l'inflorescence est sortie
- 58 80% de l'inflorescence est sortie
- 59 fin de l'épisaison: l'inflorescence est complètement sortie de la gaine



	Epi dégagé	Début floraison
Zadoks	58	60
Keller et Baggioloni	O	P
Feekes et Large	10.5	10.5.1

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

Stades repères

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 milaitéux: 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 C

Etiquette du produit FertiRoc®



FERTIRoc®

POWER THE NATURE®



NATURAL PLANT BIOSTIMULANT 500 Gr NET

CAO 32,00 % - SiO₂ 16,20 % - MgO 3,40 % - K₂O 1,60 % - SO₃ 1,20 %

NON-MICROBIAL PLANT BIOSTIMULANT

IN COMPLIANCE WITH PFC 6B OF EC REGULATION 2019/1009
COMPOSED EXCLUSIVELY OF CONSTITUENT MATERIALS CMC1
SUBSTANCES AND MIXTURES BASED ON VIRGIN MATERIALS

Formulation : wettable powder.

Average particle size : 6 µm (90% less than 9 µm)

POSSIBLE MIXING - NO KNOWN INCOMPATIBILITIES

Store in a dry place protected from humidity in a closed container

COMPOSED OF : - ZEOLITE CMC1

- CALCIUM CARBONATE CMC1

Contact us, or consult our protocols, to know the key stages of each crop.

BIOSTIMULANT NON MICROBIEN DES VEGETAUX

CONFORME AU PFC 6B DU REGLEMENT CE 2019/1009
COMPOSE EXCLUSIVEMENT DE MATIERES CONSTITUTIVES CMC1
SUBSTANCES ET MELANGES A BASE DE MATIERE VIERGE

Formulation : poudre mouillable.

Granulométrie moyenne : 6 µm (90% inférieur à 9 µm)

MELANGE POSSIBLE - AUCUNE INCOMPATIBILITE CONNUE

Stockez au sec à l'abri de l'humidité dans un contenant fermé

COMPOSE DE : - ZEOLITE CMC1

- CALCIUM CARBONATE CMC1

Nous contacter, ou consulter nos protocoles, pour connaître les stades
clés de chaque culture.

STIMULATES THE NATURAL PROCESSES OF PLANTS

Fonction : biostimulant improves plant nutrition, on all plants.

Mode of application : to be applied in foliar pulverizations spaced out from 7
to 14 days, minimum dilution of 2 kg for 100 liters of water imperative.

Add the product progressively and maintain constant agitation.

Field crops	3 to 5 kg/ha	3 applications
Spring field crops	3 to 5 kg/ha	2 applications
Viticulture	6 to 12 kg/ha	4 applications
Arboriculture	6 to 12 kg/ha	4 applications
Vegetable growing	6 to 12 kg/ha	4 applications
Horticulture	6 to 12 kg/ha	4 applications

STIMULE LES PROCESSUS NATURELS DES PLANTES

Fonction : biostimulant améliore la nutrition des végétaux sur tous végétaux

Mode d'application : à appliquer en pulvérisations foliaires espacées de 7 à
14 jours, dilution minimum de 2 kg pour 100 litres d'eau impératif.

Ajouter le produit progressivement et maintenir en permanence l'agitation.

Grandes cultures	3 à 5 kg/ha	3 applications
Grandes cultures printemps	3 à 5 kg/ha	2 applications
Viticulture	6 à 12 kg/ha	4 applications
Arboriculture	6 à 12 kg/ha	4 applications
Maraichage	6 à 12 kg/ha	4 applications
Horticulture	6 à 12 kg/ha	4 applications

SAFETY AND ENVIRONMENTAL INFORMATION

Classification (EC)1272/2008 : Eye irritant (cat. 2)

Warning statement: Caution

Hazard statement: H319: may cause eye irritation

Precautionary statements : P102: Keep out of reach of children - P301+P312:

IF SWALLOWED: Call a POISON CENTER or doctor if you feel unwell - P280:

Wear eye protection - P337+P313: If eye irritation persists: seek medical
attention

Protection : Wear respiratory protection and eye protection

Disposal : Natural rock - no specific recommendations, disposal as inert
waste preferred

Other information : Stable and non-reactive product

General information : FOR PROFESSIONAL USE ONLY

INFORMATION SECURITE ET ENVIRONNEMENT

Classement (EC)1272/2008 : Irritant oculaire (cat. 2)

Mention d'avertissement : Attention

Mention de danger : H319 : peut provoquer une irritation des yeux

Conseils de prudence : P102: Tenir hors de portée des enfants - P301+P312:

EN CAS D'INGESTION: Appeler un CENTRE ANTIPOISON ou un médecin en cas

de malaise - P280 : Porter un équipement de protection des yeux -

P337+P313: Si l'irritation oculaire persiste: consulter un médecin

Protection : Portez un masque de protection des voies respiratoires et un

équipement de protection des yeux

Elimination : Roche naturelle - pas de préconisations particulières,

élimination en catégorie déchets inertes de préférence

Autres informations : Produit stable et non réactif

Informations générales : POUR UN USAGE PROFESSIONNEL UNIQUEMENT

Power the Nature SAS - SOCIETE ACTIONS SIMPLIFIEE

Rue du Louvre, 15 - 75001 Paris - France

RCS Paris : 909 451 023 - N° TVA : FR 349 094 510 231

Power the Nature SAS - SOCIETE ACTIONS SIMPLIFIEE

Rue du Louvre, 15 - 75001 Paris - France

RCS Paris : 909 451 023 - N° TVA : FR 349 094 510 231

Product number:

Date of manufacture:

Lot number :

Expiration date :

Produit numéro :

Date de fabrication :

Lot numéro :

Date de péremption :

Annexe D

Description de l'analyseur d'efficacité des plantes (PEA)(HANSATECH 2024)

Handy PEA+

Advanced continuous excitation
chlorophyll fluorimeter



Hansatech
Instruments



Handy PEA+

Advanced continuous excitation chlorophyll fluorimeter

- > Compact (170 x 85 x 40mm), lightweight (565gms)
- > USB2.0 Communications
- > Large-scale screening capacity up to 1000 full trace data files
- > High time resolution detection for discrimination of fast chlorophyll fluorescence induction kinetics
- > Full suite of OJIP analysis parameters (Strasser *et al* 2000)
- > Saturating high-intensity focused LED array for accurate determination of Fm
- > Upload user-defined, repeatable protocols for automatic field execution
- > Interchangeable sensor unit cables with lengths of up to 10 metres
- > Powerful Windows® data transfer & analysis software included

Handy PEA+ chlorophyll fluorimeter

Handy PEA+ consists of a compact, light-weight control unit encapsulating sophisticated electronics. This provides the high-time resolution which is essential in performing measurements of fast chlorophyll fluorescence induction kinetics.



Simple to configure and operate, basic measurement functionality can be defined directly on the Handy PEA+. More complex experimental design may be achieved using the protocols feature which allows up to 5 user-defined protocols to be stored in memory for different field applications. Protocols are written using a custom Windows® software package, PEA+ (supplied). A tactile keypad allows selections and inputs to be made and a liquid crystal display module presents menu options and data.

The sensor unit consists of an array of 3 ultra-bright red LED's which are optically filtered to a peak wavelength of 650 nm (which is readily absorbed by chlorophyll) at a maximum intensity of up to 3500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ at the sample surface. The LED's are focused via lenses onto the leaf surface to provide uniform illumination over the area of leaf exposed by the leafclip (4mm dia). An optical feedback circuit monitors and corrects changes in the output intensity of the LED's which can be caused by internal heat build-up within the LED's themselves. The circuit also compensates for intensity changes caused by variation in ambient temperature.

The sensor unit is fitted with a high-performance pin photodiode. Optical design and filtering ensure that it responds maximally to the longer wavelength fluorescence signal and blocks the reflected shorter wavelength LED light used as the source of illumination. Variable rate analysis allows fluorescence signals to be sampled at different acquisition rates throughout the different phases of the induction kinetic. Initially, data is sampled at 10 μsecond intervals for the first 300 $\mu\text{seconds}$ with subsequent induction phases analysed at lower acquisition intervals as the rate of kinetic activity reduces.

Up to 1000 recordings of between 0.1 – 300 seconds may be saved in the onboard memory of the Handy PEA+. Calculated parameters may be viewed onscreen with more comprehensive data display achieved by transferring saved data via USB to a PC where the supplied PEA+ Windows software allows a variety of numerical and graphical presentation options.

Leafclips and sample dark adaptation



Continuous excitation fluorescence systems rely on the use of a suitable leafclip system with 2 functions. Firstly, the leafclip shields the fluorescence detector from ambient light which would otherwise "blind" the sensor due to the comparatively high levels of red/infra-red light within the same waveband as fluorescence itself. Secondly, the leafclip pre-conditions or dark adapts a section of the sample prior to the measurement.

Any measurement of the maximum photochemical efficiency of Photosystem II (F_v/F_m) requires the sample to be fully dark adapted prior to measurement. During dark adaptation, all reaction centres within the sample are fully oxidised making them available for photochemistry and any latent chlorophyll fluorescence yield is quenched. This process takes a variable amount of time and depends upon plant species, light history prior to the dark transition and whether or not the plant is stressed. Typically, 15 – 20 minutes may be required to dark adapt effectively.

Handy PEA+ leafclips are constructed from white plastic making them small and lightweight. The locating ring (which interfaces with the Handy PEA+ sensor) is positioned over the required area of sample and has a central 4mm diameter hole which is covered using a shutter plate. During measurement, this shutter slides back to expose the dark adapted sample to the focussed LED's and fluorescence detector. A silvered underside reflects incident light minimising the build-up of heat on the sample and ensuring that the measurement is unaffected when measuring in high ambient light conditions.

Parameters measured

Common parameters

Fo - Represents emission by excited chlorophyll *a* molecules in the antennae structure of Photosystem II. The true Fo level is only observed when the first stable electron acceptor of Photosystem II called Qa is fully oxidised. This requires thorough dark adaptation.

Fm - The maximum fluorescence value obtained for a continuous light intensity. This parameter may only be termed as maximal if the light intensity used is fully saturating and the electron acceptor Qa is fully reduced.

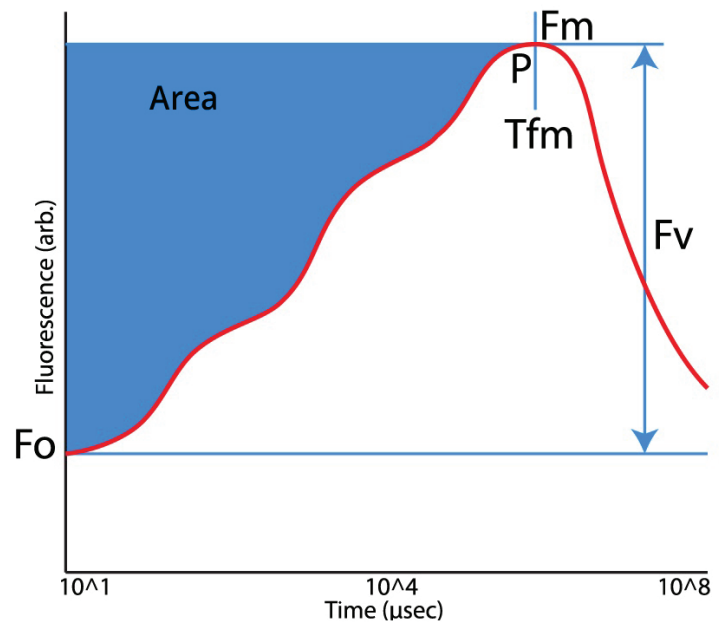
Fv - Indicates the variable component of the recording and relates to the maximum capacity for photochemical quenching. Calculated by subtracting the Fo value from the Fm value.

Fv/Fm - An indication of the maximum quantum efficiency of Photosystem II and widely considered to be a sensitive indication of plant photosynthetic performance.

Presented as a ratio between 0 and 1, healthy samples typically achieve a maximum Fv/Fm value of approx. 0.85. Values lower than this will be observed if a sample has been exposed to some type of biotic or abiotic stress factor which has reduced the capacity for photochemical quenching within PSII. Fv/Fm is presented as a ratio of variable fluorescence (Fv) over the maximum fluorescence value (Fm).

Tfm - Indicates the time at which the maximum fluorescence value (Fm) was reached. May be used to indicate sample stress which causes the Fm to be reached much earlier than expected.

Area - The area above the fluorescence curve between Fo and Fm is proportional to the pool size of the electron acceptors Qa on the reducing side of Photosystem II. If electron transfer from the reaction centres to the quinone pool is blocked (such as is the mode of action of the photosynthetically active herbicide DCMU), the area will be dramatically reduced.



OJIP analysis

PEA+ software extracts fluorescence values from the recorded data at 5 pre-defined Time Marks. The times are:

- > T1 = 50 microseconds
- > T2 = 100 microseconds
- > T3 = (K step) 300 microseconds
- > T4 = (J step) 2 milliseconds
- > T5 = (I step) 3 milliseconds

Chlorophyll fluorescence values at these Time Marks are used in conjunction with other measured and calculated values to derive a series of further biophysical parameters, all referring to time base 0 (onset of fluorescence induction).

These parameters quantify the photosystem II behaviour for specific energy fluxes (per reaction centre) for absorption, trapping, dissipation and electron transport in addition to the maximum yield of primary photochemistry, the efficiency with which a trapped exciton can move an electron into the electron transport chain further than QA- and the quantum yield of electron transport.



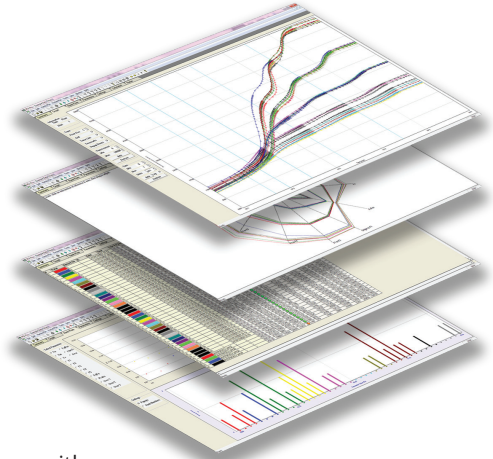
PEA+ software

PEA+ is a multi-function Windows® program supplied with Handy PEA+ for system configuration, data acquisition and post-measurement analysis.

Several different data presentation techniques have been combined in order to effectively demonstrate subtle differences in the fluorescence signature of samples which could be indicative of stress factors affecting the photosynthetic efficiency of the plant. Data may be presented in graphical, tabulated or radial plots which can all be tailored to display any number of the 58 parameters measured by Handy PEA+. Transferred data may be exported to CSV format for further statistical analysis in external software packages.

PEA+ allows enhanced configuration of the Handy PEA via the Protocol Editor feature. Protocols may be defined to include single or multiple measurement assays with optional pre-illumination periods which can then be uploaded to the memory of Handy PEA+ via USB communications. The use of protocols ensures maximum reproducibility of results during field applications involving large-scale screening away from a laboratory environment.

PEA+ will run on all supported Microsoft operating systems.



System components

Handy PEA+ systems are supplied with the following components

- > Handy PEA+ control unit and sensor
- > HPEA/LC x 2: (20 Leafclips)
- > Mains powered battery charger
- > Protective carry bag
- > USB data transfer cable
- > USB Drive containing PEA+ software and manuals.



Related systems

Pocket PEA is designed to be a powerful, effective screening tool capable of performing single flash measurements. Configuration is limited compared with Handy PEA+ with the only configurable options being measurement duration (1, 3 or 10 seconds) and light intensity (up to $3500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). M-PEA is a more advanced fluorescence system with the added functionality of P700+ absorbance and delayed fluorescence capability.



Technical specifications

Handy PEA Fluorimeter

Dimensions:	170 (l) x 85 (w) x 40mm (d). Weight: 565g
Communications:	USB2.0
Operating Conditions:	0 - 40°C. Non-condensing humidity
Battery:	3 x rechargeable Ni-MH 3.6V, 1.8Ahr
Battery Charger:	Integral switch mode charger 8-13.5V input (nominal 12V input)
Display:	8 line x 20 character LCD display
Illumination:	Focused array of ultra-bright red LED's with NIR short pass cut-off filters. Peak wavelength 650 nm. Spectral-line half width 22 nm.
Max. intensity at sample:	Up to 3500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Detector:	Fast response PIN photodiode with RG9 long pass filter
Electronics:	16-bit microprocessor. 12-bit resolution. A/D 10 μsec acquisition rate. 8-bit DAC for light control. Real time clock
Record Length:	0.1 - 300 seconds
Memory:	512K battery backed RAM. (Up to 1000 one second duration recordings with full trace data)
Leafclips:	20 x injection moulded clip system with silvered locating ring, 4mm sample aperture and sliding shutter blade.

Parameters measured

OJIP Data:

tFm, Area, Fo, Fm, Fv

Normalised data:

Fo/Fm, Fv/Fm, Fv/fo, Vj = (Fj-Fo)/(Fm-Fo), Vi = (Fi-Fo)/(Fm-Fo)

Specific fluxes:

ABS/RC, Dlo/RC, TRo/RC, ETo/RC, REo/RC

Apparent fluxes per CSO:

ABS/RC, Dlo/RC, TRo/RC, ETo/RC, REo/RC

Partial performances:

$\Gamma(\text{RC})/(1-\Gamma(\text{RC}))$, $\Phi(\text{Po})/(1-\Phi(\text{Po}))$, $\Psi(\text{Eo})/(1-\Psi(\text{Eo}))$, PI(abs), $\Delta(\text{Ro})/(1-\Delta(\text{Ro}))$

Time marks:

Ft1, Ft2, Ft3, Ft4, Ft5

Partial areas:

Fo to Ft1, Ft1 to Ft3, Ft1 to Ft4, Ft1 to Ft5, Ft3 to Ft4, Ft4 to Ft5, Ft5 to Fm

Slopes & integrals:

dVg/dto, dV/dto, Sm = Area/Fv, N = Sm/Ss, Sm/tFm

Yield = flux ratios:

TRo/ABS = $\Phi(\text{Po})$, ETo/TRo = $\Psi(\text{Eo})$, ETo/ABS = $\Phi(\text{Eo})$, REo/ETo = $\Delta(\text{Ro})$, REo/ABS = $\Phi(\text{Ro})$

Apparent fluxes per CSM:

(ABS/CSm)-Fm, Dlo/CSm, TRo/CSm, ETo/CSm, REo/CSm

Total performance, driving force & rates:

PI(total), DF(abs), DF(total), kP/ABS * kF, kN/ABS * kF

User parameter:

3 User-entered values



Hansatech Instruments is a British company that has been developing high quality scientific instrumentation for over 40 years. Our systems are used widely for teaching & research in cellular respiration & photosynthesis programs in more than 100 countries throughout the world. We have gained an enviable reputation for quality, reliability & excellent price/performance.



Our product range consists of a range of modular solutions for the measurement of oxygen using Clark type polarographic sensors. We also develop chlorophyll fluorescence measurement systems using both continuous excitation & pulse-modulated measurement techniques with further optical instrumentation for the measurement of sample chlorophyll content.



Purchasers of Hansatech Instruments products can be assured of ongoing support & prompt & efficient attention to enquiries at all times. Support is available both directly & from our global distributor network. Customers are encouraged to register their instruments on our website which allows access to our Support Ticketing System in addition to instruments manuals & software upgrades.

Hansatech Instruments Ltd
Narborough Road, Pentney, King's Lynn, Norfolk PE32 1JL, UK
Tel: +44 (0)1760 338877 Fax: +44 (0)1760 337303
info@hansatech-instruments.com
www.hansatech-instruments.com

Hansatech
Instruments

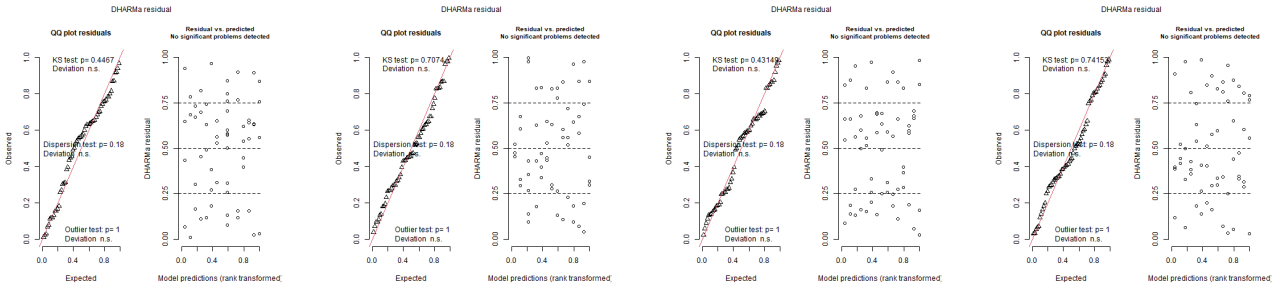
Annexe E

Résultats des tests de normalité et d'égalité des variances des variables : DHARMa residual

Les tableaux reprennent les tests de normalité et d'égalité des variances pour les variables étudiées. Sur le graphique fourni par DHARMa, le QQ plot des résidus simulés (à gauche) permet de vérifier la normalité des résidus. Au plus les résidus observés (points) se situent près de la ligne diagonale, cela indique qu'ils suivent une distribution proche de la normale. Le test de Kolmogorov-Smirnov (KS test) permet de le confirmer en mentionnant avec une p-valeur. Si cette p-valeur se situe au dessus du seuil de significativité qui est de 0.05, une déviation non significative (ns) est affichée.

Pour l'homogénéité des variances, le graphique Residuals vs. Predicted (à droite) permet de répondre à cette hypothèse. Ce graphique présente les résidus DHARMa standardisés par rapport aux valeurs prédites du modèle (rang transformé). Si les résidus semblent répartis de manière aléatoire autour de la ligne médiane, sans motif particulier ou tendance, cela suggère qu'il n'y a pas de problème majeur d'hétéroscédasticité.

Lors de l'application de ces test, l'ensemble des variables présentent des données normales mais une égalité des variances moins respectées étant donné le faible nombre d'observations par répétitions.

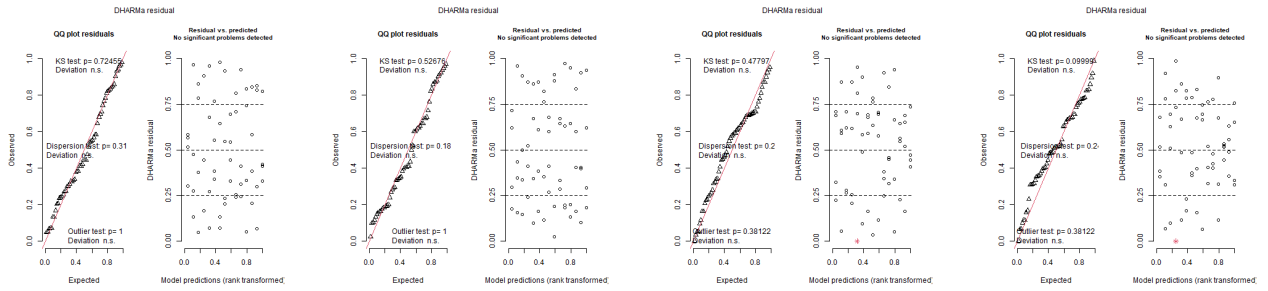


(a) DHARMA residual de la densité de plantes au stade Z30

(b) DHARMA residual de la densité de plantes au stade Z39

(c) DHARMA residual de la densité de talles au stade Z30

(d) DHARMA residual de la densité de talles au stade Z39

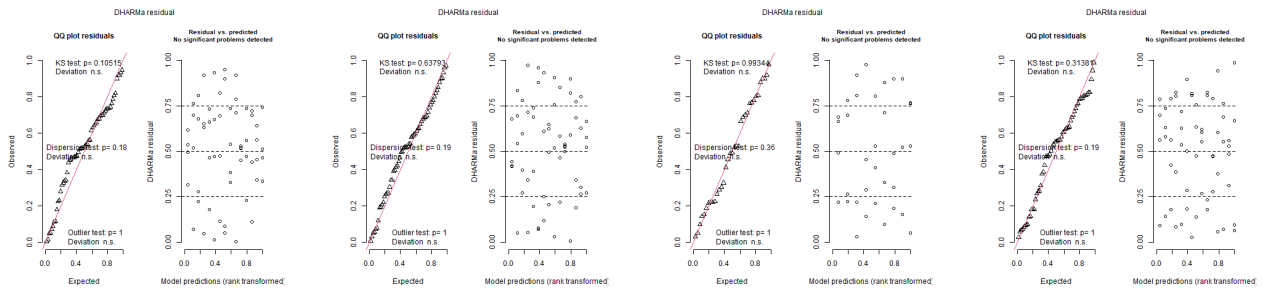


(e) DHARMA residual de la densité des épis au stade Z65

(f) DHARMA residual de la densité des épis au stade Z89

(g) DHARMA residual de la couverture foliaire au stade Z30

(h) DHARMA residual de la couverture foliaire au stade Z32

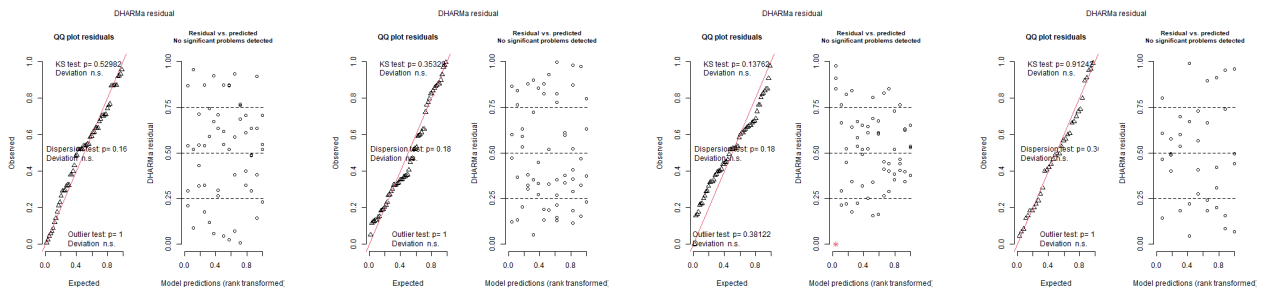


(i) DHARMA residual de la couverture foliaire au stade Z39

(j) DHARMA residual de la couverture foliaire au stade Z65

(k) DHARMA residual de l'indice de surface foliaire au stade Z39

(l) DHARMA residual de l'activité photosynthétique au stade Z30



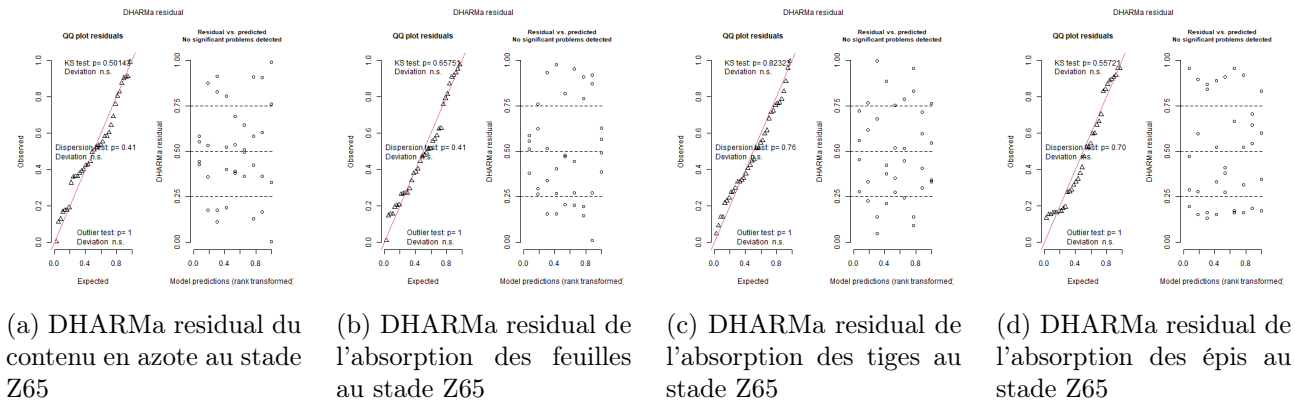
(m) DHARMA residual de l'activité photosynthétique au stade Z32

(n) DHARMA residual de l'activité photosynthétique au stade Z39

(o) DHARMA residual de l'activité photosynthétique au stade Z65

(p) DHARMA residual du contenu en azote au stade Z32

FIGURE E.1 – Première série de graphes : DHARMA residual

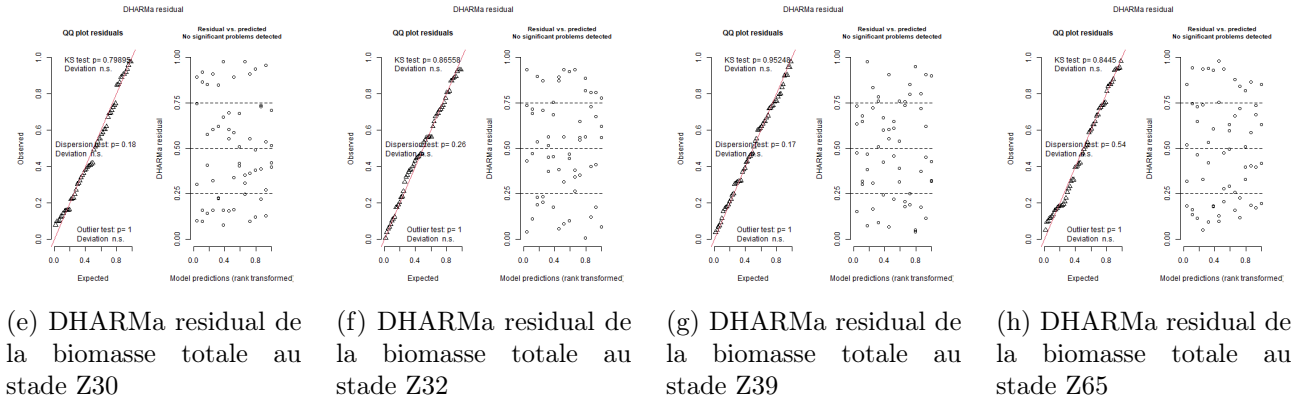


(a) DHARMA residual du contenu en azote au stade Z65

(b) DHARMA residual de l'absorption des feuilles au stade Z65

(c) DHARMA residual de l'absorption des tiges au stade Z65

(d) DHARMA residual de l'absorption des épis au stade Z65

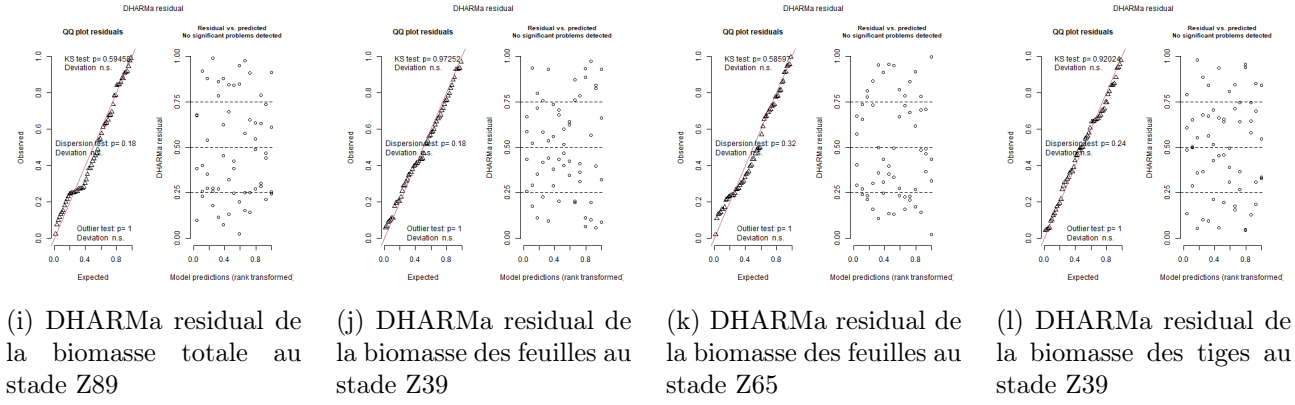


(e) DHARMA residual de la biomasse totale au stade Z30

(f) DHARMA residual de la biomasse totale au stade Z32

(g) DHARMA residual de la biomasse totale au stade Z39

(h) DHARMA residual de la biomasse totale au stade Z65

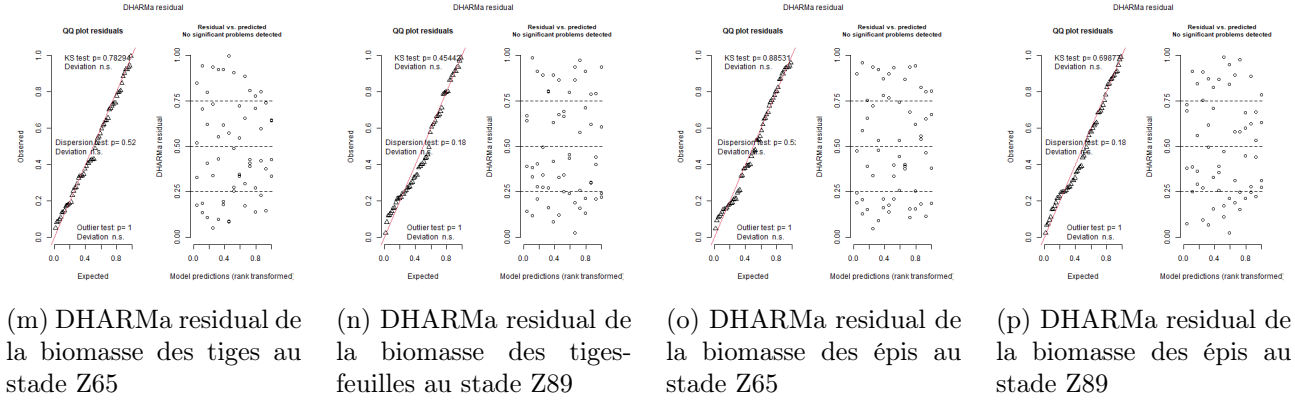


(i) DHARMA residual de la biomasse totale au stade Z89

(j) DHARMA residual de la biomasse des feuilles au stade Z39

(k) DHARMA residual de la biomasse des feuilles au stade Z65

(l) DHARMA residual de la biomasse des tiges au stade Z39



(m) DHARMA residual de la biomasse des tiges au stade Z65

(n) DHARMA residual de la biomasse des tiges-feuilles au stade Z89

(o) DHARMA residual de la biomasse des épis au stade Z65

(p) DHARMA residual de la biomasse des épis au stade Z89

FIGURE E.2 – Deuxième série de graphes : DHARMA residual

Annexe F

Résultats de l'analyse en composantes principales : cercle de corrélation et matrice des corrélations des variables avec les dimensions

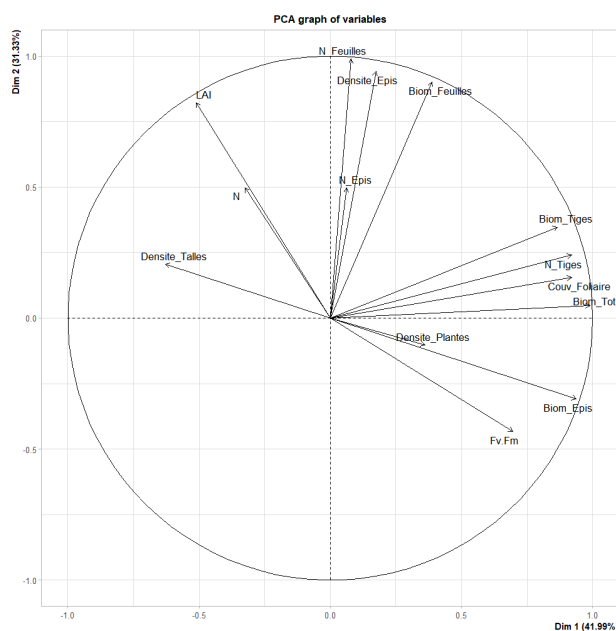


FIGURE F.1 – Cercle de corrélation des variables explicatives par rapport aux deux premières dimensions

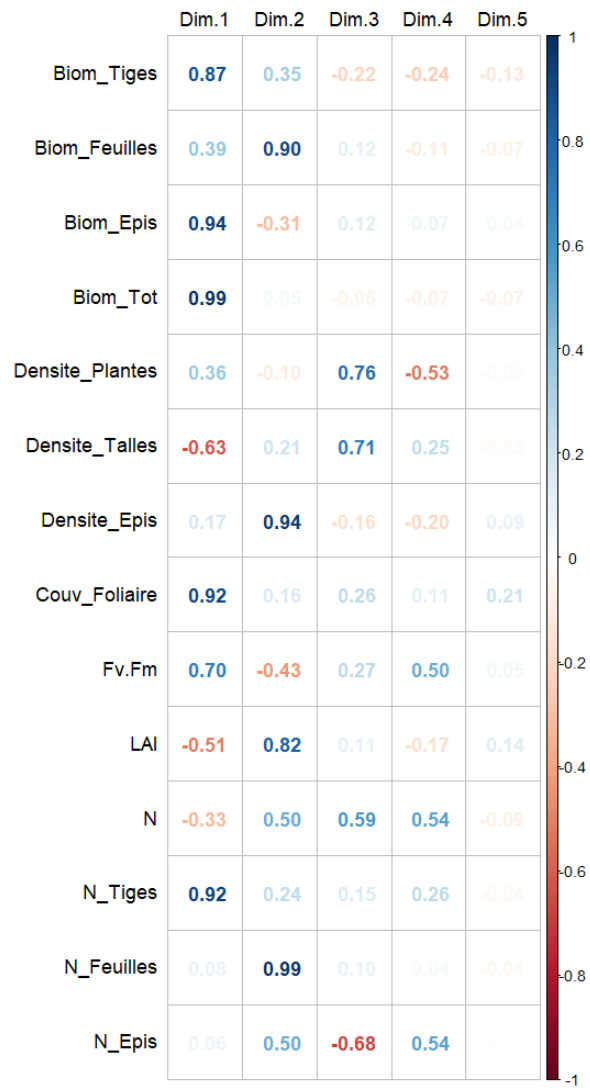


FIGURE F.2 – Graphe de corrélations des variables aux cinq premières dimensions

