

Etude du potentiel de substitution des matières organiques au regard de l'efficience de la nutrition azotée du froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.)

Auteur : Collart, Mathieu

Promoteur(s) : Dumont, Benjamin

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

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

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/22331>

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.

**ÉTUDE DU POTENTIEL DE SUBSTITUTION DES
MATIÈRES ORGANIQUES AU REGARD DE
L'EFFIENCE DE LA NUTRITION AZOTÉE DU
FROMENT D'HIVER (*TRITICUM AESTIVUM* L.)**

MATHIEU COLLART

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

ANNÉE ACADÉMIQUE 2024-2025

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 auteur.

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

**ÉTUDE DU POTENTIEL DE SUBSTITUTION DES
MATIÈRES ORGANIQUES AU REGARD DE
L'EFFIENCE DE LA NUTRITION AZOTÉE DU
FROMENT D'HIVER (*TRITICUM AESTIVUM* L.)**

MATHIEU COLLART

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

ANNÉE ACADÉMIQUE 2024-2025

PROMOTEUR : BENJAMIN DUMONT

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mon promoteur, Benjamin Dumont, pour la proposition du sujet, son encadrement et ses conseils judicieux quant à la réalisation de ce mémoire.

Je remercie les membres du Centre Pilote Céréales et Oléo-Protéagineux (CePiCOP) pour leur accueil chaleureux et leur disponibilité pour la prise de mesures. Je tiens à remercier Benjamin Van Der Verren, Alice Nysten et Noémie Vannoppen pour leurs conseils et leur encadrement. Je remercie également l'équipe technique : Jean-François, Patrick, Laurent, Olivier et Baptiste pour l'application du protocole ainsi que pour leur aide lors de certaines prises de mesures. Je tiens aussi à remercier mes comparses Tfstes Thomas Radu et Anne-Sophie Emplit pour leur précieuse aide dans la prise de mesures notamment celle de biomasse qui fut fastidieuse.

Je remercie le professeur Yves Beckers et l'équipe zootechnique pour la mise à disposition des broyeurs. Je tiens à remercier Sylvie Mabilie pour son aide et sa disponibilité pour le broyage.

Je remercie également Mr Christophe Vandenberghe pour ses conseils lors de la mise en place du protocole et pour son avis sur les résultats d'analyse de sol. Je remercie également l'équipe du GRENeRA pour le prêt des sondes ainsi que l'analyse des teneurs en nitrates contenu dans le sol. Merci plus particulièrement à Florent et Aurore pour leur précieuse aide et leur bonne humeur lors des prélèvements d'échantillons de sol.

Je tiens à remercier les doctorants de l'open space du bureau phytotechnie pour l'accueil et la bonne ambiance présente au sein du bureau. Mais également pour leurs précieuses réponses à mes questions rédactionnelles et statistiques.

Un tout grand merci particulièrement à Christophe Lacroix, Noémie Vannoppen et Charles Nickmilder pour leur relecture respective des parties de ce mémoire.

Je remercie tous mes colocataires, notamment Jérôme et Zacharie, ainsi que la team agro et la commission Cinsî avec qui j'ai partagé de bons moments et de belles soirées estudiantines.

Je remercie également l'équipe soft avec qui j'ai passé les meilleurs 120h brouettes.

Enfin, je remercie également ma famille et ma cousine Ariane, qui m'ont donné un précieux coup de main pour un prélèvement de biomasse lors de ma session d'examens de juin.

Je te tiens à remercier mes parents qui m'ont permis de réaliser ces études. Mais surtout de m'avoir toujours encouragé, soutenu et de m'avoir fait relever la tête lorsque je baissais les bras. Je vous dis un grand merci !

Résumé

Le blé d'hiver (*Triticum aestivum* L.) est la deuxième céréale cultivée après le maïs dans le monde. L'azote influence la croissance et le développement de cette céréale. Il est recommandé d'appliquer 180N au total par fractionnement. Cependant, l'azote engendre des pollutions environnementales notamment par sa lixiviation dans les eaux souterraines et par sa production qui induisent des gaz à effet de serre.

La gestion de la fertilisation azotée est donc un enjeu majeur afin d'assurer un développement optimal du blé tendre tout en limitant les pollutions environnementales. Dans ce cadre, une étude a été réalisée en Belgique, sur un sol limoneux, dont l'objectif est de subsister les engrais minéraux par des matières organiques azotées. Pour atteindre cet objectif, trois engrais organiques : le compost, le digestat et les fientes des poules ont été testées à trois doses différentes : 60, 120, 180 unités d'azotes (N). Les doses organiques de 60 et 120N ont été complétées par des doses minérales respectives de 120 et 60N afin que toutes les modalités de traitement aient reçu une dose totale de 180N. La dose 60N des engrais organiques a été apportée au stade tallage, tandis que les doses 120N et 180N de ceux-ci, ont été fractionnées au stade tallage et redressement. A l'exception de la fumure 180N, les doses organiques 60N et 120N ont été complétées par des apports d'ammonitrate au stade redressement et/ou au stade dernière feuille. Pour atteindre, cet objectif, le suivi phénologique de la plante a été réalisé par des mesures de productivité de biomasse et de densité d'épis de la plante ainsi que par la mesure de reliquats azotés lors de la période culturale.

En conclusion, les modalités possédant le meilleur rendement sont dans l'ordre décroissant : la fumure du livre blanc (180N de minéral), les trois doses organiques de compost et le digestat 60N. Le compost, enrichi en vinasse de chicorée, est donc l'engrais organique possédant le meilleur rendement grâce à sa teneur élevée en azote ammoniacal. La dose organique de 60N pour les trois engrais est celle qui présente le meilleur rendement car elle bénéficie d'un apport complémentaire de 120N minéral. Il est à noter que les conditions climatiques au printemps n'étaient pas propices à la minéralisation de l'azote organique lors saison cultural 2023-2024.

Mots clés : Blé d'hiver, Fertilisation, Azote, Compost, Digestat, Fientes de poules, Rendement

Abstract

Winter wheat (*Triticum aestivum* L.) is the second widely grown cereal after maize in the world. Nitrogen influences the growth and development of this cereal. It is recommended that a total of 180N be applied in divided doses. However, nitrogen causes environmental pollution, particularly through its leaching into groundwater and its production, which generate greenhouse gases.

Managing nitrogen fertilisation is therefore a major challenge in order to ensure optimum development of soft wheat while limiting environmental pollution. In this context, a study was carried out in Belgium on a loamy soil, with the aim of replacing mineral fertilisers with nitrogenous organic matter. To achieve this, three organic fertilisers - compost, digestate and hen droppings - were tested at three different doses : 60, 120 and 180 nitrogen units (N). The organic doses of 60 and 120N were supplemented by respective mineral doses of 120 and 60N so that all the treatment methods received a total dose of 180N. The 60N dose of organic fertiliser was applied at the tillering stage, and the 120N and 180N doses were split between the tillering and recovery stages. With the exception of the 180N fertiliser, the 60N and 120N doses were supplemented with ammonium nitrate at the recovery stage and/or at the last leaf stage. To achieve this objective, phenological monitoring of the plant was carried out by measuring biomass productivity and plant spike density, and by measuring nitrogen residues during the cropping period.

In conclusion, the methods with the best yields were, in descending order: the white book fertiliser (180N of mineral), the three organic doses of compost and the 60N digestate. Compost, enriched with chicory vinasse, is therefore the organic fertiliser with the best yield thanks to its high ammoniacal nitrogen content. The organic dose of 60N for the three fertilisers is the one with the best yield, as it benefits from an additional mineral input of 120N. It should be noted that spring weather conditions were not conducive to the mineralisation of organic nitrogen during the 2023-2024 cropping season.

Keywords : Winter wheat, Fertilization, Nitrogen, Compost, Digestate, Hen droppings, Yield

Table des matières

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | Introduction | 15 |
| 2. | Etat de l'art..... | 16 |
| 2.1. | Ecophysiologie du froment d'hiver..... | 16 |
| 2.1.1. | Ecophysiologie..... | 16 |
| a) | Origine et biologie..... | 16 |
| b) | L'appareil végétatif | 16 |
| c) | Appareil reproducteur..... | 17 |
| d) | La graine | 17 |
| 2.1.2. | Nutrition de la plante..... | 18 |
| a) | Prélèvement d'azote | 18 |
| b) | Besoins en azote..... | 18 |
| c) | Apports d'azote en fonctions des stades clés..... | 18 |
| 2.1.3. | Plasticité de la plante et réponse à la nutrition azotée | 20 |
| 2.2. | Gestion des matières nutritives azotées | 22 |
| 2.2.1. | Cycle de l'azote..... | 22 |
| 2.2.2. | Minéralisation de la matière organique | 24 |
| a) | Facteurs influençant la décomposition de la matière organique..... | 24 |
| b) | Pouvoir fertilisant des engrais organiques..... | 25 |
| 3. | Objectifs | 27 |
| 4. | Méthodologie..... | 28 |
| 4.1. | Conditions climatiques | 30 |
| 4.2. | Itinéraire technique..... | 32 |
| 4.3. | Caractéristique de la variété implantée..... | 32 |
| 4.4. | Protocole et dispositif expérimental | 34 |
| 4.4.1. | Dispositif de l'essai | 34 |
| 4.4.2. | Protocole | 35 |
| 4.5. | Matières organiques | 36 |
| 4.5.1. | Le compost..... | 36 |
| 4.5.2. | Le digestat..... | 37 |
| 4.5.3. | Les fientes de poules | 38 |
| 4.5.4. | Composition des matières organiques..... | 38 |
| 4.6. | Observations et paramètres mesurés | 39 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4.6.1. | Stades phénologiques | 40 |
| 4.6.2. | Densité de plantes, de talles et d'épis | 40 |
| a) | Densité d'épis..... | 40 |
| 4.6.3. | Teneur de l'azote dans la plante : N uptake..... | 40 |
| 4.6.4. | Prélèvement de biomasse..... | 41 |
| 4.6.5. | Teneur en azote dans le sol | 42 |
| 4.6.6. | Le rendement | 43 |
| 4.6.7. | Le poids de mille grains..... | 43 |
| 4.6.8. | La teneur en protéines du grain..... | 43 |
| 4.7. | Ligne du temps des observations réalisées | 44 |
| 5. | Analyse des données | 45 |
| 5.1. | Manipulation de données | 45 |
| 5.2. | Sources de variations : Facteurs étudiés | 45 |
| 5.2.1. | Facteurs fixes | 45 |
| 5.2.2. | Facteur aléatoire..... | 45 |
| 5.3. | Analyse statistique..... | 46 |
| 6. | Résultats | 48 |
| 6.1. | Résultats des tests de significativité des facteurs | 48 |
| 6.2. | Le rendement et la teneur en protéines..... | 52 |
| 6.2.1. | Le rendement | 52 |
| 6.2.2. | La teneur en protéines du grain..... | 53 |
| 6.3. | Les composantes du rendement | 54 |
| 6.3.1. | La densité de grains..... | 55 |
| 6.3.2. | Le poids de mille grains..... | 55 |
| 6.3.3. | La fertilité des épis | 56 |
| 6.3.4. | La densité d'épis | 57 |
| 6.4. | Elaboration des composantes de rendements..... | 57 |
| a) | La densité de grains..... | 57 |
| b) | La fertilité des épis | 60 |
| c) | Le poids de mille grains..... | 62 |
| 6.5. | Teneur en azote dans le sol | 63 |
| 7. | Discussion | 66 |
| 7.1. | Le rendement..... | 66 |
| 7.2. | La teneur en protéines | 67 |

| | | |
|--------|--|----|
| 7.3. | Les engrais organiques | 68 |
| 7.3.1. | Minéralisation de l'azote organique | 68 |
| 7.3.2. | Le compost..... | 68 |
| 7.3.3. | Le digestat et les fientes..... | 69 |
| 7.4. | La dose organique | 70 |
| 7.5. | Teneur en azote dans le sol | 70 |
| 8. | Conclusion et perspectives | 72 |
| 9. | Contribution personnelle..... | 73 |
| 10. | Bibliographie | 74 |
| 11. | Annexes | 78 |
| | Annexe A : Échelle BBCH améliorée du Livre Blanc Céréales (2017a) | 78 |
| | Annexe B : Valeurs de coefficients de corrélations entre les composantes de rendement et le rendement | 80 |
| | Annexe C : Valeurs des reliquats azotés pour chaque modalité de traitement | 81 |
| | Annexe D : Courbe critique de dilution de l'azote | 83 |
| | Annexe E : Moyenne et groupe emmeans des variables non présentées..... | 84 |
| | Annexe F : Résultats des tests de normalité et d'égalité des variances des variables : DHARMA residual | 88 |

Table des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Blé tendre (<i>Triticum aestivum</i> L.) au stade tallage (A) et au stade maturité (B) (Taulemesse, 2015)..... | 17 |
| Figure 2: Graphique de la phénologie du blé d'hiver présentant les principaux stades de développement et illustrant l'évolution de l'épi sur l'élaboration du rendement (Slafer et al., 2023). | 19 |
| Figure 3 : Cycle de l'azote (Havlin et al., 2017). | 22 |
| Figure 4 : Image satellite de l'essai FH24-11 (WalOnMap, 2024)..... | 28 |
| Figure 5 : Carte Numérique des sols de Wallonie de l'essai FH24-11 (WalOnMap, 2024). ... | 29 |
| Figure 6 : Graphique des températures et de la pluviométrie de la saison culturale 2023-2024 (Sombreffe). | 31 |
| Figure 7 : Dispositif de l'essai FH24-11 (CePiCOP, 2024). | 34 |
| Figure 8 : Exemple de numérotation d'une parcelle (CePiCOP). | 34 |
| Figure 9 : Courbe de régression du rendement selon la biomasse des épis. | 36 |
| Figure 10 : Application de compost (Photo M.Collart). | 37 |
| Figure 11 : Application de digestat (Photo M.Collart). | 37 |
| Figure 12 : Application des fientes de poules (Photo M.Collart) | 38 |
| Figure 13 : Pré-broyage et broyage des biomasses aériennes (Photo M.Collart) | 41 |
| Figure 14 : Prélèvement de biomasse aérienne (Photo M.Collart) | 41 |
| Figure 15 : Prélèvements d'échantillons de sol (Photo M.Collart)..... | 42 |
| Figure 16 : Récolte du froment (Photo M.Collart)..... | 43 |
| Figure 17 : Ligne du temps des observations réalisées | 44 |
| Figure 18 : Boxplots du rendement selon les modalités de traitements. | 52 |
| Figure 19 : Boxplots du rendement selon le type d'engrais (A) et selon la dose organique (B). | 53 |
| Figure 20 : Boxplots de la teneur en protéines selon les 10 modalités de traitements (A) et selon les engrais organiques (B)..... | 54 |
| Figure 21 : Graphes de régression du rendement en fonction de la densité grains selon les 10 traitements (A) et pour chaque traitement (B). | 55 |
| Figure 22 : Graphes de régression du rendement en fonction du PMG selon les 10 traitements (A) et pour chaque traitement (B). | 56 |
| Figure 23 : Graphes de régression du rendement en fonction de la fertilité des épis selon les 10 traitements (A) et pour chaque traitement (B). | 56 |
| Figure 24 : Graphes de régression du rendement en fonction de la densité d'épis selon les 11 traitements (A) et pour chaque traitement (B). | 57 |
| Figure 25 : Boxplots au stade redressement selon les modalités d'engrais pour la densité de plants (A) et la densité de talles (B). | 58 |
| Figure 26 : Boxplots de la densité de talles au stade dernière feuille selon les modalités de traitements (A) et selon les engrais organiques (B). | 59 |
| Figure 27 : Boxplots de la densité d'épis au stade maturité selon les modalités d'engrais organiques. | 60 |
| Figure 28 : Boxplots de la biomasse totale au stade dernière feuille selon les modalités de traitements (A) et selon les engrais organiques (B). | 61 |

| | |
|--|----|
| Figure 29 : Boxplots de la biomasse totale au stade mi-floraison selon les modalités de traitements (A) et selon les engrais organiques (B). | 61 |
| Figure 30 : Boxplots de la biomasse totale au stade maturité selon les modalités de traitements (A) et selon les engrais organiques (B)..... | 62 |
| Figure 31 : Boxplots du PMG selon les 10 modalités de traitements. | 63 |
| Figure 32 : Courbes d'évolution de la teneur en nitrates dans l'horizon 0-30 (A), horizon 30-60 (B), horizon 60-90 (C) et l'horizon 0-90 (D) du sol. Les échelles diffèrent selon les points (A, B, C, D)..... | 64 |
| Figure 33 : Prélèvement de biomasse réalisé par l'équipe technique du CePiCOP, les TFistes et moi-même (Photo de A.Nysten)..... | 73 |
| Figure 34 : Courbe de dilution critique de l'azote | 83 |
| Figure 35 : Première série de graphes des CA : DHARMA residual | 88 |
| Figure 36 : Deuxième série de graphes des CA : DHARMA residual | 89 |
| Figure 37 : Troisième série de graphes des CA : DHARMA residual | 90 |
| Figure 38 : Quatrième série de graphes des CA : DHARMA residual..... | 91 |

Table des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1: Apport N disponible en fonction des différents PRO (Levavasseur et Houot, 2021) | 26 |
| Tableau 2 : Légende de la carte numérique des sols de Wallonie (WalOnMap 2024). | 29 |
| Tableau 3 : Itinéraire technique de l'essai FH24-11. | 32 |
| Tableau 4 : Caractéristiques agronomiques de la variété Chevignon (Arvalis, 2023; Livre Blanc Céréales, 2024b). | 33 |
| Tableau 5 : Comportement de la variété Chevignon face aux maladies et au ravageur (Livre Blanc Céréales, 2024b). | 33 |
| Tableau 6 : Protocole de l'expérimentation. | 35 |
| Tableau 7 : Composition des engrais. | 39 |
| Tableau 8 : Synthèse des mesures | 39 |
| Tableau 9 : Synthèse des variables étudiées à l'aide des tests de significativité. | 47 |
| Tableau 10 : Résultats de la significativité des facteurs traitement et engrais et dose organique. | 48 |
| Tableau 11: Moyenne et groupes emmeans selon le facteur traitement. | 49 |
| Tableau 12 : Moyenne et groupes emmeans selon les facteurs engrais et dose organique | 50 |
| Tableau 13 : Valeurs des coefficients de corrélation pour chaque modalité de traitement. | 80 |
| Tableau 14 : Valeur des teneurs en nitrates dans les horizons de sol. | 81 |
| Tableau 15 : Moyenne et groupes emmeans des variables non présentées selon le facteur traitement | 84 |
| Tableau 16 : Moyenne et groupes emmeans des variables non présentées selon les facteurs engrais et dose organique. | 86 |

Table des équations

| | |
|---|----|
| Equation 1 : Formule de l'expression du rendement | 20 |
| Equation 2 : Formule de l'expression du rendement | 20 |
| Equation 3 : Synthèse des équations de manipulations de données | 45 |
| Equation 4 : Formule de la courbe de dilution de l'azote | 47 |

Liste des abréviations

ATISA : Aide à la transposition de l'innovation dans le secteur alimentaire

B.E.A.Gx : Bureau environnement et analyse

CA : Conditions d'applications

CePiCOP : Centre pilote pour les céréales et oléo-protéagineux

CH₄ : Méthane

CIPAN : Culture intercalaire piège à nitrate

CO₂ : Dioxyde de carbone

CPAR : Centre provincial de l'agriculture et de la ruralité

CPL-Végémar : Centre provincial de liège pour la promotion des végétaux et du maraîchage

C/N : Carbone total/ azote total

GRENeRA : Groupe de recherche environnemental et ressources azotées

Ha : Hectare

MO : Matière organique

N : Unité d'azote

NH₄⁺ : Ion ammonium

NO : Monoxyde d'azote

NO₃⁻ : Ion nitrate

N₂O : Protoxyde d'azote

PMG : poids de milles grains

PRO : Produits résiduaire organiques

SCAM : Société coopérative agricole de la meuse

T : Tonne

1. Introduction

A l'échelle mondiale, le blé d'hiver (*Triticum aestivum* L.) est la deuxième céréale la plus produite avec 784,91 millions de tonnes, après le maïs (Statista, 2024).

En Belgique, le froment d'hiver est la principale culture implantée ainsi que la céréale la plus cultivée (63%). La surface consacrée était de 199 405 ha en 2023 (Statbel, 2024). Le débouché principal de cette céréale est l'alimentation animale. Elle peut également être valorisée dans l'alimentation humaine ou dans la production de bioéthanol (Delcour et al., 2014).

L'azote influence la croissance et le développement de la plante (Li & Gao, 2024). Appliqué sur les céréales, il permet d'augmenter le nombre de talles, le nombre d'épis et le nombre de grains par épis, par conséquent d'accroître le rendement (Ali et al., 2011).

Le besoin en azote pour cette culture est estimé entre 2,8 et 3,2 kg par quintal produit (Arvalis, 2023d). Pour assurer ce besoin, il est recommandé d'appliquer par fractionnement en deux ou trois apports, une totalité de 180 unités d'azote par hectare (Livre Blanc Céréales, 2024a).

En revanche, seulement 40-50% de l'azote appliqué, est utilisé par la plante. Le solde peut être lixivié (NO_3^-) dans les eaux souterraines impactant la qualité de l'eau ainsi que les écosystèmes aquatiques. La qualité de l'air peut également être diminuée à cause des pertes de gaz ammoniacales (NO_2) ou par volatilisation (NH_3). Ces gaz étant des gaz à effets de serre, participent donc au réchauffement climatique (Cassman & Dobermann, 2022).

L'azote est l'engrais le plus utilisé à travers le monde, la production mondiale pour le secteur agricole était de 118 millions de tonnes en 2022. En Europe, ce chiffre atteint 22,5 millions de tonnes en 2022 (FAOSTAT, 2024). Cette production engendre également des pollutions environnementales par ses émissions de gaz dans l'atmosphère. En effet, les engrais azotés sont produits par le procédé Haber-Bosch qui convertit l'hydrogène et l'azote en ammoniac (NH_3). Ce procédé émet 1% des émissions mondiales de dioxyde de carbone (CO_2) (Krietsch Boerner, 2019).

En outre, le prix de l'azote minéral dépend du marché mondial. Ainsi, des conflits géopolitiques comme celui entre l'Ukraine et la Russie, ou une crise sanitaire comme celle de la pandémie du Covid-19, ont engendré une augmentation considérable du prix d'achat (Alexander et al., 2023).

Par conséquent, l'objectif de ce mémoire porte sur l'étude de la substitution des engrais minéraux par des engrais organiques dans le but de diminuer l'impact environnemental liés à leurs productions et leurs applications tout en maintenant un rendement équivalent.

2. Etat de l'art

Divers facteurs influencent l'optimisation du rendement du froment d'hiver. En effet, ce dernier résulte de l'équation $P = G \times E \times M$, où P représente la productivité, G le potentiel génétique de la plante, E l'environnement et M les pratiques culturales. Ces facteurs ainsi que leurs interactions influencent de manière positive ou négative le rendement (Slafer et al., 2022). Cet état de l'art sera structuré autour de ce cadre, et se concentrera en particulier sur deux des composantes, à savoir "G", à travers l'étude de l'écophysiologie du froment d'hiver, et "M" à travers la gestion des matières nutritives azotées, d'origine minérale et/ou organique.

2.1. Ecophysiologie du froment d'hiver

2.1.1. Ecophysiologie

a) Origine et biologie

Le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) ou froment d'hiver (communément appelé en Belgique) est apparu au Néolithique dans le Croissant fertile (anciennement le Moyen Orient) (Weiss et al., 2012). Le blé tendre est une espèce hexaploïde résultant d'une hybridation entre un blé tétraploïde cultivé et d'un blé diploïde d'une espèce sauvage (Gouvernement du Canada, 2012). Le blé d'hiver est donc constitué de 3 sous-génomes diploïdes ancestraux (Taulemesse, 2015).

Le froment est une graminée annuelle hivernale à croissance définie. Cette espèce herbacée monocotylédone appartient à la famille des *Poaceae* qui regroupe près de 12 000 espèces (Taulemesse, 2015). Cette culture est principalement adaptée à un climat tempéré où le régime des pluies est régulier (Abis, 2015). La culture est implantée à l'automne et récoltée à l'été suivant (Soltner, 2005).

b) L'appareil végétatif

L'appareil végétatif est composé d'un système racinaire de type fasciculaire et d'un système aérien. Ce dernier est constitué de tiges creuses et de feuilles engainantes appelées talles qui comportent également un épi, illustré par le point B de la figure 1 (Soltner, 2005). Le maître brin désigne la première talle émise, celle-ci étant issue du bourgeon apical. Les talles secondaires sont des ramifications du maître brin et proviennent des bourgeons axillaires localisés à la base de la plante au niveau du plateau de tallage, comme le démontre le point A de la figure 1 (Taulemesse, 2015). Les talles comportent cinq à sept nœuds, des entre-nœuds et trois ou quatre feuilles véritables (Gouvernement du Canada, 2012). Les nœuds servent de point d'attaches aux feuilles. Celles-ci comportent une partie supérieure et inférieure désignant respectivement le limbe et la gaine (Bourak, 2018).

Le système racinaire est constitué d'un système séminal secondé par un système racinaire adventif, permettant la nutrition de la plante lors de sa phase active (Bourak, 2018).

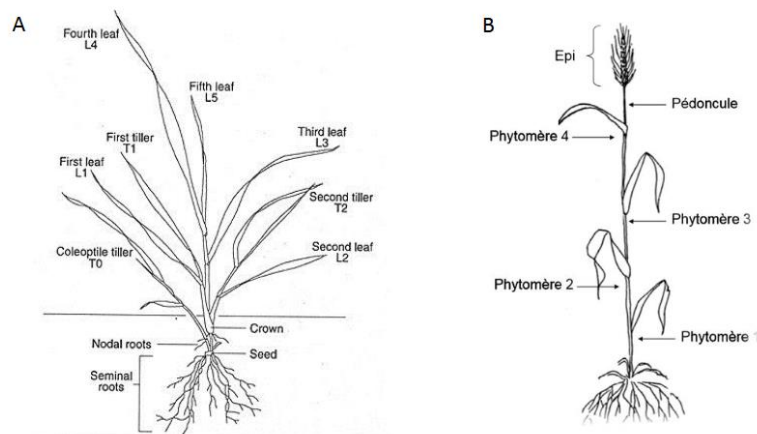


Figure 1 : Blé tendre (*Triticum aestivum* L.) au stade tallage (A) et au stade maturité (B) (Taulemesse, 2015).

c) Appareil reproducteur

Le blé est une plante autogame, cela signifie que la plante se reproduit par autofécondation (Soltner, 2005). Le froment d'hiver a besoin de conditions hivernales telles qu'une période de froid et de jours courts afin d'initier son appareil reproducteur, ce processus est appelé la vernalisation. Ce phénomène permet à la plante de passer du stade végétatif au stade reproducteur qui se produit au printemps (Taulemesse, 2015).

La dernière feuille, étant la plus haute de la tige, porte l'inflorescence en épi composé. Ce dernier est composé de sous-entité, appelés épillets. Ceux-ci sont portés par le rachis et sont disposés sur deux rangées opposées en position alterne. Chaque épillet est un axe reproducteur condensé et contient généralement entre trois à cinq fleurs hermaphrodites, enveloppées par deux bractées stériles nommées glumes. Chaque fleur possède à sa base deux glumelles et trois étamines se terminant par une grande anthère. Le pistil comprend un ovaire unique, ayant un unique ovule et deux styles, chacun se finissant par un stigmate plumeux et ramifié (Gouvernement du Canada, 2012; Taulemesse, 2015).

d) La graine

La graine est un caryopse correspondant à un fruit sec indéhiscant dont les parois sont soudées à celles de la graine. Le caryopse du froment est dit nu par le fait que les glumelles n'adhèrent pas au caryopse (Soltner, 2005).

Le grain est composé de trois parties : le germe (1,4%), les enveloppes (14-15%) comprenant le péricarpe, le tégument et l'assise protéique, et enfin l'albumen ou amande qui représente 83-85% du poids du grain. Ce dernier est composé majoritairement d'amidon (70%) et de gluten (7%) (Bourak, 2018; Soltner, 2005).

2.1.2. Nutrition de la plante

a) Prélèvement d'azote

L'azote permet d'améliorer le processus de la photosynthèse, contribue à la structure des tissus ainsi qu'à la formation de molécules organiques.

Cet élément, présent dans le sol, est principalement absorbé par la plante sous deux formes : le nitrate (NO_3^-) et l'ammonium (NH_4^+). Toutefois, la plante assimile préférentiellement l'azote sous forme de nitrate. Cette assimilation requiert de l'énergie, fournie par la photosynthèse en présence de lumière ou par la respiration dans l'obscurité (Gate, 1995; Taulemesse, 2015).

Le nitrate, une fois prélevé, est réduit par l'enzyme nitrate réductase en ammonium.

En revanche, lorsque l'ammonium est prélevé, il n'est pas soumis à une réduction. Ensuite, l'azote sous forme d'ammonium présent dans la plante, est incorporé dans des molécules carbonées afin de former des acides aminés qui constituent les éléments de base des protéines (Maathuis, 2009; Taulemesse, 2015).

b) Besoins en azote

Les besoins en azote du froment d'hiver varient selon sa phase de croissance. À certains stades, des apports élevés sont primordiaux afin d'éviter des pertes de rendement, tandis que d'autres stades de croissance nécessitent des besoins moindres en azote (Li & Gao, 2024).

Il est crucial d'adapter les apports d'engrais azotés aux besoins spécifiques de la plante, de les fournir à des moments précis pour optimiser le rendement et éviter le gaspillage (Li & Gao, 2024). Des doses insuffisantes peuvent entraîner des carences qui se manifestent par des plantes chétives et un jaunissement des feuilles (chlorose), résultant de l'arrêt de la photosynthèse (Gate, 1995).

À l'inverse, un apport excessif d'azote peut provoquer une consommation de luxe, où la croissance de la plante atteint son maximum et l'excès d'azote ne contribue plus à celle-ci mais augmente la teneur en protéines du produit final. Cela peut être recherché pour accroître la concentration en protéines dans le produit final (Lenoir et al., 2023).

De plus, une trop forte concentration d'azote nuit à la croissance de la plante. Effectivement, chez les céréales, cela se traduit par le phénomène de verse où le rapport C/N des premiers entre-nœuds de la tige est réduit (Arvalis, 2024a). De plus, le calibrage sera diminué, entraînant un excès d'épis par mètre carré et une sensibilité accrue à la sécheresse dans les zones à faible disponibilité en eau (Gate, 1995).

Enfin, l'azote peut être perdu par lixiviation, contribuant à la pollution de l'environnement en contaminant les eaux souterraines ou l'azote peut être perdu par volatilisation contribuant au gaz à effet de serre. (Li & Gao, 2024).

c) Apports d'azote en fonctions des stades clés

Le prélèvement d'azote par la plante varie en fonction de sa croissance et coïncide avec le développement de sa biomasse jusqu'au stade de floraison, comme illustré par la figure 2.

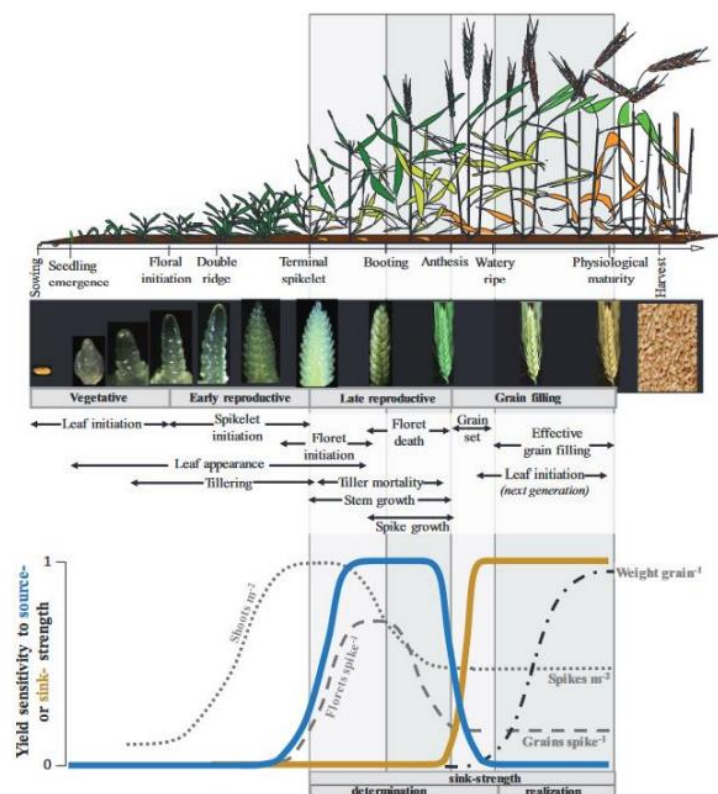


Figure 2: Graphique de la phénologie du blé d'hiver présentant les principaux stades de développement et illustrant l'évolution de l'épi sur l'élaboration du rendement (Slafer et al., 2023).

Lors de la **phase semis-levée**, la plantule se développe via les réserves d'azote se trouvant dans la graine. Par la suite, une faible quantité d'azote sera prélevée, 15-25 % de celle accumulée à floraison (Gate, 1995).

Lors du **stade de tallage**, une carence en azote provoque une diminution de l'émission des feuilles et peut même bloquer leur croissance en cas de carence prolongée. Cela peut également entraîner un saut de talles ou un arrêt anticipé du tallage si la pénurie persiste. Ce sont les talles les plus jeunes qui sont les plus impactées, étant particulièrement sensibles en déficit d'azote. C'est pourquoi les talles de moins de trois feuilles ont le taux de régression le plus élevé. Ainsi, l'azote influence directement le tallage secondaire, bien que celui-ci contribue peu au rendement final (Gate, 1995).

Lors de la première partie du tallage, la minéralisation automnale des résidus organiques satisfait les besoins de la plante en azote (Livre Blanc Céréales, 2017b).

Ensuite, un apport en sortie d'hiver peut être effectué et doit être limité si les reliquats disponibles sont importants (Arvalis, 2023b). L'excès doit être évité afin de limiter les pertes par lixiviation, la consommation de luxe ou la formation de jeunes talles ayant un impact réduit sur le rendement (Gate, 1995).

Le **stade de redressement** est le stade crucial pour satisfaire les besoins de la plante afin d'assurer la mise en place de l'appareil photosynthétique et le développement de l'épi (Livre Blanc Céréales, 2017b).

Une carence en azote au stade de montaison induit une diminution du nombre épillets fertiles et de la croissance de l'épis engendrant respectivement une réduction du nombre grains/m² et du nombre de grain/épis. Il est également fort probable que la biomasse des organes sources telles que l'avant dernière feuille et la dernière feuille soient réduits.

Lors de ce stade, la plante bénéficie de la minéralisation printanière mais cela ne satisfait pas ses besoins. Un deuxième apport est donc indispensable mais doit être adapté en fonction des reliquats et de la minéralisation. Si celui-ci est conséquent (au-delà de 100 U.N), il est important de le fractionner de sorte que 2/3 de la dose soit appliqué au stade épis 1cm. Le dernier tiers sera appliqué entre le stade deux nœuds et le stade dernière feuille (Arvalis, 2023b; Gate, 1995; Livre Blanc Céréales, 2017b).

Enfin, au stade **dernière feuille**, un dernier apport conséquent est effectué afin d'influencer l'élaboration du nombre de grains/m² en assurant une fertilité maximale des épis, un bon remplissage et une qualité maximale des grains. La dose à fournir dépend des deux autres apports déjà appliqués ainsi que du potentiel de rendement (Livre Blanc Céréales, 2017b).

Une fois le stade dernière feuille passé, l'apport d'azote influence peu la croissance de la plante mais enrichit plutôt la teneur en protéines des parties végétatives puis celle du grain.

En effet, selon Gate (1995) l'azote présent dans le grain au stade maturité provient majoritairement de l'azote absorbé par les parties végétatives jusqu'au stade de floraison, et cette quantité serait de 70%. Cette remobilisation est majoritairement fournie par la dernière et avant dernière feuille ainsi que leur limbe (Taulemesse, 2015).

De plus, un déficit en azote aux alentours de la floraison, impacte la fécondation par une augmentation du nombre de fleurs avortées engendrant par conséquent une réduction du nombre de grains/épis (Gate, 1995).

2.1.3. *Plasticité de la plante et réponse à la nutrition azotée*

Dans la littérature, différentes composantes permettent d'exprimer le rendement. Parmi elles, quatre sont généralement retenues. Il s'agit de :

- *Le nombre de plantes/m²* se rapportant à la densité de plantes. Elle est liée à la densité de semis, aux taux de germination et de levée des plantes ainsi qu'à la survie des plantes.
- *Le nombre d'épis/m²* correspondant à la faculté de tallage, c'est-à-dire à la période de tallage et à la montaison des talles.
- *Le nombre de grain/épis* se rapportant à la fertilité de l'épi. Elle dépend du nombre épillets par épi, nombre de fleurs par épillet et du pourcentage de fertilité.
- *Le poids du grain*. Cette composante est souvent exprimée dans la littérature par le poids de mille grains (PMG)

(Lenoir et al., 2023; Sadras & Slafer, 2012; Slafer et al., 2022)

D'autre part, le rendement est souvent exprimé par les équations suivantes (Lenoir et al., 2023; Slafer et al., 2022) :

$$\text{Rendement} = \text{nombre de grains/m}^2 \times \text{PMG} \quad (1)$$

$$\text{Rendement} = \text{nombre d'épis/m}^2 \times \text{fertilité des épis} \times \text{PMG} \quad (2)$$

En effet, la première équation résulte du produit de deux composantes principales : le nombre de grains/m² et le poids de milles grains (PMG). Néanmoins, le nombre de grains/m² influence principalement le rendement et est étroitement lié à ce dernier. Il est un trait possédant une grande plasticité donc capable de s'adapter à des changements. A contrario, le PMG est un trait

héréditaire et par conséquent moins plastique (Lenoir et al., 2023; Slafer et al., 2014; Taulemesse, 2015).

Comme illustré par la deuxième équation, la composante du nombre de grains/m² peut être décomposée en deux autres composantes : le nombre d'épis/m² (= densité d'épis) et la fertilité des épis (= nombre de grains/épis).

Une augmentation du nombre d'épis/m² est favorisée par un tallage abondant. Ainsi la combinaison des apports au tallage et au redressement influence positivement cette composante. Tandis qu'une meilleure survie des fleurons distaux, influencée par l'azote résiduel du sol, permet d'augmenter le nombre de grains/épis. Effectivement, l'initiation de la fertilité des épis se déroule plus tard que la densité des épis. L'azote résiduel serait disponible en plus grande quantité lors de cette phase (Lenoir et al., 2023; Sadras & Slafer, 2012; Slafer et al., 2022; Taulemesse, 2015).

La plasticité phénotypique se définit comme « la quantité par laquelle les expressions des caractéristiques individuelles d'un génotype sont modifiées par des environnements différents », selon Bradshaw (1965, cité dans Lenoir et al., 2023). En d'autres termes, elle désigne la capacité d'un organisme, d'un trait à s'adapter au changement de son environnement.

Chaque composante de rendement possède une certaine plasticité phénotypique élevée ou faible face aux sources de variations mais suffisante afin de pouvoir s'adapter à des changements mineurs de rendement. Il existe une certaine hiérarchie de plasticité entre les composantes (Sadras & Slafer, 2012). Celle-ci se présente par ordre décroissant de plasticité : le nombre de tiges, nombre de grains/épis, nombre épis/m² et enfin le PMG (Lenoir et al., 2023; Slafer et al., 2022).

Le nombre d'épis/m² possède une meilleure plasticité que le nombre de grains/épis par le fait que la survie des talles reproductrices requiert moins d'énergie que la survie des jeunes fleurons (Slafer et al., 2022).

En revanche, une relation négative existe entre le nombre d'épis/m² et le nombre de grains/épis. La première composante est influencée par l'environnement et induit un nombre de grains/épis plus faible. Cependant, cette dernière est influencée par la génétique et engendre une réduction du nombre d'épis/m² (Lenoir et al., 2023; Slafer et al., 2022).

En somme, il est de même pour le nombre de grains/m² et le PMG où une relation négative existe également. Des changements de rendement peuvent donc impacter ces composantes. Dès lors, des différences génotypiques induisent une augmentation du nombre d'épis/m² mais cela est associé par un PMG plus faible et donc des grains de plus petites tailles. En revanche, des facteurs environnementaux engendrent une augmentation de la taille des grains et par conséquent une augmentation du PMG mais conduit à une diminution du nombre de grains/m² (Lenoir et al., 2023; Slafer et al., 2022; Taulemesse, 2015).

De plus, la densité de grains est influencée par la dynamique des apports et par la quantité totale d'azote fournie. La densité de grains dépend également de la remobilisation de l'azote venant des tissus végétatifs qui est influencée par la fertilisation azotée (Lenoir et al., 2023).

Par conséquent, les engrais azotés vont accroître la densité de grains mais induisent une proportion de grains plus petit à l'échelle du couvert. A contrario, une faible fertilisation azotée est associée à un PMG élevé (Beral et al., 2022).

Enfin, le nombre de grains/m² possédant la plasticité la plus élevée, permet de réguler de manière grossière le rendement, capable de s'adapter et de répondre à des changements considérables tels que l'azote et l'eau (Lenoir et al., 2023; Slafer et al., 2022).

2.2. Gestion des matières nutritives azotées

2.2.1. Cycle de l'azote

Le cycle de l'azote est présenté ci-dessous par la figure 3. La plante prélève l'azote dans la solution du sol sous forme de NH_4^+ et de NO_3^- , comme le montre le point 4 de la figure 3 mais ayant une préférence pour cette dernière forme d'azote. L'azote peut être apporté sous différentes formes (Maathuis, 2009).

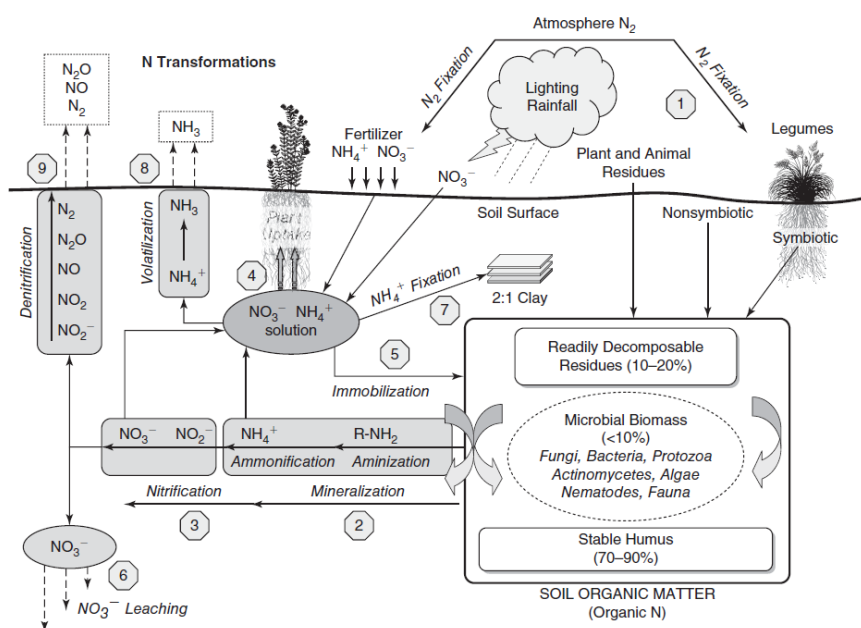


Figure 3 : Cycle de l'azote (Havlin et al., 2017).

Tout d'abord, les dépôts d'azote atmosphériques, apportés sous formes humides ou secs, constituent une première source d'azote pour la plante, comme illustré par le point 1 de la figure 3. En effet, les micro-organismes permettent la fixation d'azote atmosphériques en réduisant le N_2 en NH_4^+ . L'ammonium peut être alloué à la plante ou être incorporé dans le sol. Ces bactéries fixatrices sont aérobies ou anaérobies et sont soit libres dans le sol soit en symbiose avec des légumineuses (*Rhizobium*). Les dépôts atmosphériques se présentent sous la forme humide, c'est-à-dire dissous dans l'eau de pluie ou sous forme secs, attachés à des particules de matière. (Cameron et al., 2012; Havlin et al., 2017).

Ensuite, une seconde source d'azote provient de l'azote organique contenu dans la matière organique du sol, illustré par le biais des points 2 et 3 de la figure 3. Celle-ci est constituée notamment de résidus d'animaux et végétaux, d'engrais organiques, etc. Deux réactions permettent de transformer l'azote organique en nitrates. La première réaction se nomme la minéralisation, comme le montre le point 2 de la figure 3, et elle est subdivisée en deux réactions : l'ammonisation suivie de l'ammonification afin d'obtenir du NH_4^+ . Ensuite, l'ammonium peut rejoindre la solution du sol ou subir une deuxième réaction appelée la nitrification, comme illustrée par le point 3 de la figure 3. Celle-ci est réalisée par les bactéries (*Nitrosomonas sp.* et *Nitrobacter sp.*) en oxydant l'ammonium en nitrite puis en nitrate qui rejoindra la solution du sol (Coskun et al., 2017; Havlin et al., 2017).

La dernière source d'azote sont les fertilisants. Ils peuvent provenir d'engrais minéraux présents sous la forme d'urée, de nitrate d'ammonium, de sulfate d'ammonium, d'ammoniac anhydre. Ceux-ci rejoignent directement la solution du sol (Coskun et al., 2017; Havlin et al., 2017). Il existe également, les engrais organiques qui sont issus déchets verts comme le compost, le digesta ou d'animaux tels que le fumier, le lisier, etc. A contrario des engrais premièrement cités, les engrais organiques intégreront la matière organique du sol (Havlin et al., 2017).

En revanche, plusieurs phénomènes peuvent causer des pertes d'azote dans l'environnement. Premièrement, celles-ci peuvent se manifester par la dénitrification de l'azote. Cela est le processus inverse de la nitrification, c'est-à-dire que les nitrates sont transformés en nitrites puis en NO , N_2O libérant ainsi des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ce phénomène est illustré par le point 9 de la figure 3. Cette réaction survient lorsque le sol est saturé en eau entraînant une absence d'oxygène, des conditions propices aux organismes anaérobiques qui obtiennent leur oxygène à partir de NO_3^- et NO_2 , et émettant ainsi ces gaz à effet de serre (Cameron et al., 2012; Havlin et al., 2017).

Ensuite, illustré par le biais du point 8 de la figure 3, un autre phénomène est la volatilisation de l'ammonium (NH_4^+) sous la forme ammoniacale (NH_3) qui est composé volatil. Cette réaction est influencée par le pH du sol. En effet, un pH basique signifie une présence abondante d'ions OH^- , plus il est basique, plus la volatilisation de l'ammonium en ammoniac sera importante (Cameron et al., 2012; Havlin et al., 2017; Li & Gao, 2024).

Enfin, une dernière cause est la lixiviation des nitrates comme le montre le point 6 de la figure 3. Ce phénomène est influencé par la nitrification de l'azote organique en nitrates. Ces ions étant fortement mobiles et facilement emportés par les pluies, peuvent aboutir dans les eaux souterraines ou les rivières. Cela peut impacter la qualité de l'eau ainsi que les organismes aquatiques à cause de l'eutrophisation des algues (Cameron et al., 2012; Havlin et al., 2017; Li & Gao, 2024).

2.2.2. *Minéralisation de la matière organique*

La matière organique (MO) est riche en carbone et constitue également un réservoir important d'autres éléments nutritifs tels que l'azote, l'hydrogène, l'oxygène, le phosphore ou encore le soufre. Ces éléments sont essentiels dans la croissance des plantes. La MO est composée de résidus d'animaux et de végétaux, de produits en décomposition et d'organismes vivants (bactéries, champignons, vers de terre) (Genot et al., 2012; Mustin, 1987).

La MO joue un rôle important dans le fonctionnement des sols. En effet, elle améliore la stabilité et structure de ce dernier, contribue à sa diversité et régule les activités biologiques des sols. Elle permet une meilleure circulation de l'air et de l'eau (Genot et al., 2012).

La matière organique peut être scindée en trois fractions. La première est appelée, la matière organique labile caractérisée par une décomposition rapide. La deuxième est la matière organique récalcitrante qui se minéralise lentement. La troisième se nomme l'humus, la fraction stable de la matière organique dans le sol (N'Dayegamive, 2007).

La minéralisation de l'azote organique résulte de la décomposition de la matière organique par les bactéries et champignons du sol. Le carbone est principalement utilisé comme source d'énergie par la microflore du sol. Une partie de l'azote minéralisée est utilisée par les micro-organismes afin de synthétiser leurs protéines. L'autre partie de l'azote va être libérée sous forme ammoniacale dans le sol puis transformée en nitrates par les bactéries nitrifiantes (Amin, 2012; N'Dayegamive, 2007).

a) Facteurs influençant la décomposition de la matière organique

Premièrement, les **micro-organismes** sont les principaux agents de décomposition de la matière organique. Le sol contient entre une à cinq tonnes de biomasse microbienne et fongique par hectare. Ils dégradent entre 80 et 95% de cette matière. Le solde restant est dégradé par la faune en mélangeant les résidus végétaux avec les fragments du sol, augmentant la surface exposée de litière et facilitant donc l'accès aux micro-organismes. La diversité et l'abondance de la flore microbienne est influencée par la composition de la matière organique, notamment par le rapport C/N et la dégradabilité en composés végétaux (Amin, 2012).

La première phase de décomposition est dominée par les bactéries où les résidus frais contiennent des composés facilement disponibles permettant une prolifération rapide des bactéries. Les champignons composent majoritairement la deuxième phase de décomposition, ils dégradent la matière la plus récalcitrante grâce à leur capacité enzymatique plus forte. Un résidu ayant un rapport C/N élevé stimule davantage les champignons. A contrario, un rapport C/N faible, stimule davantage les bactéries (Tardy, 2014).

Deuxièmement, le **pH** affecte l'activité microbienne en jouant sur la disponibilité des nutriments et la composition de la communauté microbienne. Ainsi un pH et une concentration élevée en azote favorisent une population de bactéries. En revanche, un pH et une concentration faible en

azote induisent une prolifération de champignons. Cette composante modifie donc la survie et la compétitivité des espèces microbiennes.

En outre, la décomposition de la matière organique modifie également le pH du sol par la libération ou l'immobilisation d'anions et cations par les micro-organismes (Amin, 2012).

Ensuite, **l'humidité et la température du sol** influencent la vitesse de décomposition car ils affectent l'activité microbienne. Cette dernière augmente avec la température atteignant un optimum entre 20 et 45°C, qui est variable selon les espèces.

Les micro-organismes ont besoin d'eau pour réaliser la dégradation de la matière organique. Une humidité adéquate de 60% permet une prolifération des micro-organismes (Amin, 2012). C'est pourquoi des sols argileux ou limoneux ayant une rétention en eau plus forte que les sols sableux satisfont les besoins en humidité. Cependant, une humidité trop élevée peut entraver le processus de décomposition par la création de conditions anaérobies (N'Dayegamive, 2007).

La texture du sol influence sa porosité. Un sol sableux est constitué de macropores permettant une grande aération et un réchauffement plus important, ainsi qu'un taux de minéralisation d'azote plus élevé. Néanmoins, en conditions de sécheresse, la minéralisation sera réduite.

A contrario, dans des sols de textures fines, type limoneux, composés de méso et micropores, ces derniers empêchent une minéralisation trop rapide de l'azote. Ce type de sol possède un stock d'azote organique plus élevé permettant ainsi une minéralisation constante d'azote au cours de saison (N'Dayegamive, 2007).

La Structure du sol influence la circulation d'air et d'eau. En effet, un sol structuré contient une proportion élevée de macropores dans sa couche arable et induit ainsi une meilleure circulation de ceux-ci. De plus, ce type de sol permet aux micro-organismes de nicher sur des agrégats et de réaliser leur activité de minéralisation. Cependant, des sols compactés, caractérisés par une proportion élevée de micro-agrégats présentent une porosité réduite et par conséquent un faible drainage. Ces conditions peuvent être causés par un travail du sol intensif qui n'est pas favorable à l'activité de la flore du sol (N'Dayegamive, 2007).

Enfin, **le travail du sol** permet d'aérer le sol et ainsi d'injecter de l'oxygène dans le sol. Cela favorise la minéralisation. Plus le travail est effectué en profondeur, plus important sera le processus (N'Dayegamive, 2007; Novalis Terra, 2020).

b) Pouvoir fertilisant des engrais organiques

Le pouvoir fertilisant des engrais organiques doit également être considéré. Les produits organiques résiduels (PRO) possèdent des vitesses de minéralisation différentes.

En effet, les fientes de poules se minéralisent très rapidement. Selon Arvalis (2023b), 30 à 80% de l'azote organique se minéralise au cours des premiers mois. Ce PRO doit donc être appliqué peu de temps avant les périodes d'absorption des cultures. Il en est de même pour le digestat qui possède une forte teneur en azote minéral (Levavasseur et al., 2021).

En revanche, les PRO de types compost de déchets verts se minéralisent très lentement. Seulement 5 à 10 % de l'azote organique s'est minéralisé au cours de la première année. Ils sont donc plutôt utilisés comme amendement afin d'entretenir le stock de carbone organique du sol (Arvalis, 2023c; Levavasseur & Houot, 2021).

Tableau 1: Apport N disponible en fonction des différents PRO (Levavasseur et Houot, 2021)

| PRO | Dose classique (t/ha) | N total (kg/ha) | N-NH4 (kg/ha) | N organique (kg/ha) | Minéralisation Norg (%) | N disponible (kg/ha) |
|--------------------------|-----------------------|-----------------|---------------|---------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Compost de déchets verts | 20 | 167 | 9 | 157 | -1 | 8 |
| Fientes (séchées) | 5 | 203 | 25 | 178 | 30 | 78 |
| Digestat brut de CIVE | 40 | 196 | 112 | 84 | 9 | 120 |

Comme le démontre ce tableau (tableau 1) ci-dessus établi par Levavasseur et Houot (2021), le digestat est l'engrais possédant la valeur la plus élevée en azote minéral. Le compost est riche en azote organique mais est dépassé par les fientes de poules. Celles-ci se distinguent le taux de minéralisation et l'azote total le plus élevé. En somme, le digestat présente l'azote disponible le plus élevé.

3. Objectifs

L'objectif principal est d'étudier les impacts associés à la substitution de matières azotées minérales par des apports de matières organiques sur les critères agronomiques (biomasse, rendement) et environnementaux (teneur en azote du sol).

En particulier, trois types de matières organiques à différentes doses sont prises en compte : le compost, le digestat et les fientes de poules. Celles-ci sont apportées par fractionnement soit au stade tallage, soit aux stades tallage et redressement et sont complémentées par un ou deux apports d'ammonitrate selon la modalité. Ces apports sont effectués sur la culture de froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.).

Les critères agronomiques étudiés concernent le rendement et ses composantes, ainsi que la dynamique générale de croissance de la plante au cours de son cycle de développement.

Les critères environnementaux sont évalués à travers un suivi dynamique de la teneur en azote dans le sol, permettant de traduire un risque de pollution azotée.

4. Méthodologie

L'étude a été mise en place lors de la saison culturale 2023-2024 avec le soutien technique du Centre Pilote pour les Céréales et Oligo-Protéagineux (CePiCOP) et par la supervision du professeur Benjamin Dumont.

L'expérimentation a pris place sur la plateforme d'essais des céréales d'hiver et plus précisément dans l'essai fumure FH24-11 du CePiCOP d'octobre 2023 à août 2024. Celle-ci se trouve à Lonzée (Gembloux) (50°55'45.80"N 4°74'05.24"E) sur une parcelle appartenant à l'agriculteur Mr Philippe Van Eyck. L'exploitation située au sein de l'Abbaye d'Argenton, exerce la polyculture et l'élevage. Le semis s'est déroulé le 18 octobre 2023 après un précédent de pommes de terre.

Le sol de la plateforme d'essai est décrit comme limoneux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre (WalOnMap, 2024). L'essai FH24-11 est quant à lui caractérisé par des sols de type Aha, Aha0, AIp et Ada0. Ces sols sont illustrés par le biais des figures 4 et 5.



Figure 4 : Image satellite de l'essai FH24-11 (WalOnMap, 2024)



Figure 5 : Carte Numérique des sols de Wallonie de l'essai FH24-11 (WalOnMap, 2024).

Tableau 2 : Légende de la carte numérique des sols de Wallonie (WalOnMap 2024).

| Type de sols | Définition |
|--------------|---|
| Aha | Sols limoneux à drainage assez pauvre (fortement gleyifiés) à horizon B textural |
| Aha0 | Sols limoneux à drainage assez pauvre (fortement gleyifiés) à horizon B textural et à horizon A épais (sup. 40cm) |
| Alp | Sols limoneux à drainage pauvre (très fortement gleyifiés) avec une absence de développement de profil |
| Ada0 | Sols limoneux à drainage imparfait (modérément gleyifiés) à horizon B textural et à horizon A épais (sup. 40cm) |

L'essai FH24-11 est composé de 144 parcelles, mesurant chacune 2m sur 7m, la superficie de l'essai est donc de 20,16 ares. La variété de froment d'hiver implantée est le Chevignon. Une bordure composée d'une variété plus précoce entoure l'essai afin d'atténuer d'éventuels biais.

4.1. Conditions climatiques

La Belgique s'identifie par un climat tempéré océanique, principalement influencé par la proximité de la mer du Nord. Effectivement, cette dernière permet d'atténuer les extrêmes climatiques. Le climat se caractérise par des hivers doux et pluvieux tandis que les périodes estivales sont relativement fraîches et humides (IRM, 2024d).

La moyenne des températures annuelles est de 11°C alors que la moyenne des précipitations annuelles se situent autour de 837,1 mm (IRM, 2024d).

L'automne 2023 fut marqué par une température moyenne plus élevée et par une augmentation des précipitations par rapport à une année normale, notamment lors de la seconde moitié de la saison (IRM, 2024a). Dans la région limoneuse, l'écart de température se situait à + 2,4°C et les précipitations à + 20,1 mm, par rapport aux normales saisonnières (Livre Blanc Céréales, 2024a).

L'hiver 2024 fut plus doux que la normale avec une augmentation de + 1,3°C dans la région limoneuse. Les épisodes plus froids ayant eu lieu en décembre n'ont pas permis de contrebalancer les températures plus douces de la fin d'hiver (IRM, 2024d; Livre Blanc Céréales, 2024a).

Il est intéressant de souligner que la fin de l'année 2023, c'est-à-dire la période allant du 12 octobre au 31 décembre, a été particulièrement pluvieuse. Pendant ces 81 jours, seulement 14 jours furent secs, tandis que 67 jours furent marqués par des précipitations. Au total, 233,8 mm de pluie ont été enregistrés durant cette période, représentant un excédent de 68,4 mm par rapport à une année moyenne. Ces données proviennent de la station météorologique située à Sombrefe (Livre Blanc Céréales, 2024a).

Le printemps 2024, est décrit comme étant particulièrement humide, chaud et sombre. En effet, selon l'IRM dont la station météorologique est située à Uccle, il est tombé 285,2 mm de pluie en 63 jours lors de cette période, soit un excédent de + 119,6 mm par rapport à la normale de saison. Ces chiffres constituent les plus élevés enregistrés depuis 1991. La température moyenne s'élevait à 11,6°C soit une augmentation de + 1,1°C, plaçant cette saison parmi les cinq plus chaudes depuis 1991. En outre, cette période est également marquée par un rayonnement solaire global exceptionnellement faible, le plus bas enregistré depuis 1991. Le mois de mai illustre le mieux ces records avec le plus grand nombre de jours de précipitations (23) et le rayonnement global le plus faible depuis 1991 (IRM, 2024c).

L'été 2024, est caractérisé comme beaucoup plus humide que la normale avec notamment une durée de 40 jours de pluie et un excès de près de 90 mm. Un pic de 47 litres/m² est d'ailleurs atteint le 18 juin comme le démontre la figure 6. Les précipitations combinées au printemps et à l'été 2024 établissent un nouveau record de 609 mm.

L'été 2024 fut plus chaud que la normale malgré un mois de juin qui était plus frais.

Les mois de juin et juillet furent plus sombres que la moyenne et le mois d'août plus ensoleillé permettant d'avoir un été légèrement plus ensoleillé que la moyenne. (IRM, 2024b).

En résumé, la saison culturale 2023-2024 du froment est marquée par une pluviométrie abondante, établissant un nouveau record absolu de 1203,4 mm sur la période d'automne 2023 à l'été 2024.

La figure 6 illustre les conditions climatiques notamment la pluviométrie et la température moyenne, établie à Sombreffe lors de la saison culturale (Agromet, 2024). Ces valeurs coïncident avec les valeurs collectées par l'IRM.

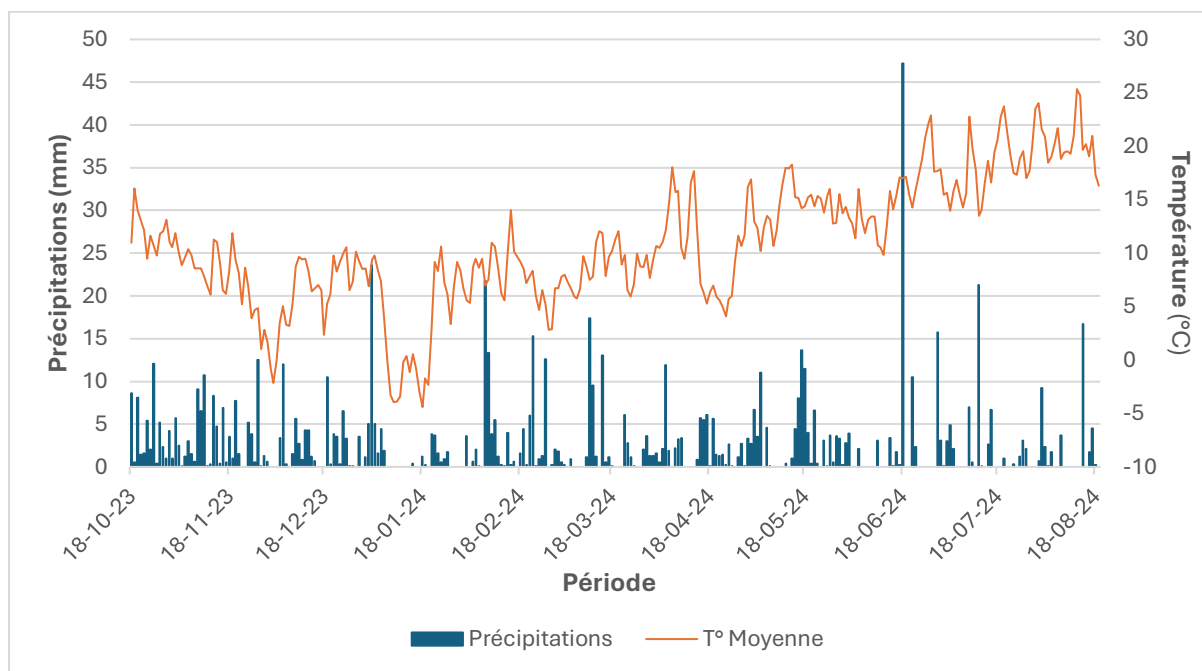


Figure 6 : Graphique des températures et de la pluviométrie de la saison culturale 2023-2024 (Sombreffe).

4.2. Itinéraire technique

Le tableau présenté ci-dessous (tableau 3) décrit les différentes opérations culturales effectuées sur l'essai FH24-11 dans un schéma de conduite conventionnelle.

Tableau 3 : Itinéraire technique de l'essai FH24-11.

| Interventions | | Date | Stade de développement |
|--|---|----------|------------------------------|
| Précédent cultural = pommes de terre | | | |
| Préparation du sol | Sous-solage + herse rotative | 18-10-23 | / |
| Semis | Densité = 250 grains/m ² | 18-10-23 | / |
| Fertilisation (1 ^{ère} fraction) | Voir protocole (4.4.2) | 19-03-24 | Plein tallage (BBCH 25) |
| Désherbage | Sigma Star (0,33 kg/ha) + Biathlon duo (70 g/ha) + Végétop (1 l/ha) | 21-03-24 | Plein tallage (BBCH 25) |
| Fertilisation (2 ^{ème} fraction) | Voir protocole (4.4.2) | 11-04-24 | Redressement (BBCH30) |
| Régulateur de croissance | Cycocel 75 (1 l/ha) | 12-04-24 | Redressement (BBCH30) |
| Fongicide (1 ^{ère} application) | Simvéris (0,6 l/ha) + Aquino (1,2 l/ha) + Stavento (1,5 l/ha) | 22-04-24 | 1er nœud (BBCH 31) |
| Fertilisation (3 ^{ème} fraction) | Voir protocole (4.4.2) | 13-05-24 | Dernière feuille (BBCH39) |
| Fongicide (2 ^{ème} application) | Velogy Era (1 l/ha) | 27-05-24 | Mi-épiaison (BBCH 55) |
| Récolte | | 25-07-24 | Maturité (BBCH 89) |

4.3. Caractéristique de la variété implantée

La variété implantée dans l'essai FH24-11 est le Chevignon. Celle-ci est décrite comme variété fourragère et est caractérisée par une faible capacité de tallage, une précocité à l'épiaison ainsi qu'à maturité. Le Chevignon est qualifié comme froment d'hiver panifiable belge supérieur (Q2), il peut donc être utilisé dans les meuneries (Livre Blanc Céréales, 2023).

Cette variété se caractérise par une tolérance au froid, une résistance aux maladies du feuillage mais présente une sensibilité à la verse et à la cécidomyie orange (Arvalis, 2023a; Livre Blanc Céréales, 2024b).

La variété Chevignon est caractérisée par un rendement élevé mais elle est classée dans le groupe « surveillance renforcée » pour les semis à l’automne car elle présente l’une ou l’autre faiblesse (Livre Blanc Céréales, 2023). Les tableaux 4 et 5 illustrent de manière plus précise les différentes caractéristiques évoquées ci-dessus de la variété Chevignon.

Tableau 4 : Caractéristiques agronomiques de la variété Chevignon (Arvalis, 2023; Livre Blanc Céréales, 2024b).

| Caractéristiques agronomiques | Chevignon |
|-------------------------------|--------------|
| Capacité de tallage | Moyenne |
| Précocité à montaison | Assez tardif |
| Précocité à l'épiaison | Demi-précoce |
| Précocité à maturité | Très précoce |
| Tolérance au froid | Peu sensible |
| Verse | Sensible |
| Hauteur | Moyenne |
| Rendement en paille | Moyen |
| Rendement en grains | Elevé |
| PMG | Faible |
| Teneur en protéines | Moyenne |
| Poids spécifique | Elevé |

Tableau 5 : Comportement de la variété Chevignon face aux maladies et au ravageur (Livre Blanc Céréales, 2024b).

| Maladies et ravageur | Chevignon |
|------------------------------|-----------|
| Rouille jaune | 8,6 |
| Rouille brune | 6,9 |
| Oïdium | 7,4 |
| Septoriose | 6,3 |
| Fusariose des feuilles | 6,3 |
| Fusariose des épis (globale) | 6,3 |
| Cécidomyie orange | Sensible |

La cotation des maladies est exprimée selon une échelle variant de 1 à 9. Une note de 9 correspond à la tolérance la plus élevée.

4.4. Protocole et dispositif expérimental

4.4.1. Dispositif de l'essai

L'essai FH24-11, illustré par la figure 7, est composé d'une part de 44 parcelles destinées aux prélèvements dans le cadre de mon mémoire (représentées par les cases en jaune) et d'autre part de 100 parcelles de rendements comprenant les modalités testées dans le cadre de ma recherche ainsi que d'autres modalités testées par le CePiCOP. L'essai est composé de neuf rangées numérotées de 3400 à 4200 et d'une longueur de 16 parcelles. Par le biais de la figure 8, le numéro des objets, correspondant aux modalités de traitement est écrit en noir. Le numéro des parcelles, associées aux objets, est écrit en bleu et positionné en haut de la case.

L'essai comprend 36 objets, à savoir 11 objets de prélèvements et 25 objets de rendements. Il est disposé en blocs aléatoires complets et il comprend quatre répétitions formant ainsi 144 parcelles au total. Par conséquent, l'unité expérimentale est une parcelle.

| | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 4200 | 4233 | 4234 | 4235 | 4236 | 4237 | 4238 | 4239 | 4240 | 4241 | 4242 | 4243 | 4244 | 4245 | 4246 | 4247 | 4248 |
| | 33 | 34 | 35 | 36 | 30 | 22 | 28 | 6 | 21 | 9 | 16 | 18 | 20 | 6 | 9 | 2 |
| 4100 | 4133 | 4134 | 4135 | 4136 | 4137 | 4138 | 4139 | 4140 | 4141 | 4142 | 4143 | 4144 | 4145 | 4146 | 4147 | 4148 |
| | 29 | 30 | 31 | 32 | 7 | 34 | 8 | 13 | 1 | 28 | 10 | 25 | 4 | 15 | 26 | 21 |
| 4000 | 4033 | 4034 | 4035 | 4036 | 4037 | 4038 | 4039 | 4040 | 4041 | 4042 | 4043 | 4044 | 4045 | 4046 | 4047 | 4048 |
| | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 1 | 25 | 18 | 34 | 4 | 19 | 6 | 12 | 28 | 5 | 33 |
| 3900 | 3933 | 3934 | 3935 | 3936 | 3937 | 3938 | 3939 | 3940 | 3941 | 3942 | 3943 | 3944 | 3945 | 3946 | 3947 | 3948 |
| | 21 | 22 | 23 | 24 | 36 | 20 | 5 | 31 | 22 | 17 | 27 | 30 | 32 | 11 | 17 | 24 |
| 3800 | 3833 | 3834 | 3835 | 3836 | 3837 | 3838 | 3839 | 3840 | 3841 | 3842 | 3843 | 3844 | 3845 | 3846 | 3847 | 3848 |
| | 17 | 18 | 19 | 20 | 19 | 9 | 15 | 26 | 3 | 11 | 7 | 23 | 16 | 3 | 25 | 10 |
| 3700 | 3733 | 3734 | 3735 | 3736 | 3737 | 3738 | 3739 | 3740 | 3741 | 3742 | 3743 | 3744 | 3745 | 3746 | 3747 | 3748 |
| | 13 | 14 | 15 | 16 | 4 | 27 | 35 | 2 | 13 | 26 | 14 | 20 | 7 | 22 | 8 | 19 |
| 3600 | 3633 | 3634 | 3635 | 3636 | 3637 | 3638 | 3639 | 3640 | 3641 | 3642 | 3643 | 3644 | 3645 | 3646 | 3647 | 3648 |
| | 9 | 10 | 11 | 12 | 17 | 11 | 24 | 14 | 36 | 5 | 32 | 29 | 34 | 14 | 1 | 35 |
| 3500 | 3533 | 3534 | 3535 | 3536 | 3537 | 3538 | 3539 | 3540 | 3541 | 3542 | 3543 | 3544 | 3545 | 3546 | 3547 | 3548 |
| | 5 | 6 | 7 | 8 | 3 | 32 | 10 | 21 | 24 | 33 | 8 | 12 | 31 | 29 | 36 | 30 |
| 3400 | 3433 | 3434 | 3435 | 3436 | 3437 | 3438 | 3439 | 3440 | 3441 | 3442 | 3443 | 3444 | 3445 | 3446 | 3447 | 3448 |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 23 | 16 | 12 | 33 | 15 | 2 | 31 | 35 | 13 | 23 | 18 | 27 |

Figure 7 : Dispositif de l'essai FH24-11 (CePiCOP, 2024).

| | |
|------|---------------------------------|
| 4147 | Numéro de parcelle |
| 26 | Numéro d'objet |
| | Jaune = parcelle de prélèvement |

Figure 8 : Exemple de numérotation d'une parcelle (CePiCOP).

4.4.2. Protocole

L'expérimentation comprend 11 modalités de traitements, celles-ci sont décrites par le tableau 6. Ces modalités sont numérotées de 26 à 36 dans les parcelles de prélèvements et possèdent d'autres numéros dans les parcelles de rendement.

Tableau 6 : Protocole de l'expérimentation.

| Traitements | | | Applications | | | | |
|-------------|----------------------|--------------------|--------------------|---------|--------------|------------------|-----------------------|
| Objet | N° parc. prélèvement | N° parc. rendement | Modalité | Tallage | Redressement | Dernière feuille | Dose totale (kg N/ha) |
| 1 | 26 | 1 | Témoin sans azote | - | - | - | 0 |
| 2 | 27 | 2 | Fumure livre blanc | 60 | 60 | 60 | 180 |
| 3 | 28 | 3 | Compost 339 | 60 | 60 | 60 | 180 |
| 4 | 29 | 4 | Compost 339 | 60 | 60 | 60 | 180 |
| 5 | 30 | / | Compost 339 | 120 | 60 | - | 180 |
| 6 | 31 | 14 | Digestat | 60 | 60 | 60 | 180 |
| 7 | 32 | 15 | Digestat | 60 | 60 | 60 | 180 |
| 8 | 33 | 16 | Digestat | 120 | 60 | - | 180 |
| 9 | 34 | 17 | Fientes de poules | 60 | 60 | 60 | 180 |
| 10 | 35 | 18 | Fientes de poules | 60 | 60 | 60 | 180 |
| 11 | 36 | 5 | Fientes de poules | 120 | 60 | - | 180 |

Apport sous forme d'ammonitrate N 27%

Chaque modalité de traitement, hormis le témoin, a reçu 180 unités d'azotes (N) au cours de la période culturale. Les parcelles ayant reçus une dose organique de 60N ou 120N ont donc été complétés par une dose respective de 120N et 60N d'ammonitrate (27%) afin d'obtenir une dose totale de 180N. L'azote a été appliqué en trois fractions aux stades : de tallage (BBCH25), de redressement (BBCH30) et dernière feuille (BBCH39) afin d'acquérir une méthodologie similaire au livre blanc. Seule l'application d'engrais organique à 180N a été réalisée en deux apports, aux stades de tallage et de redressement.

Les résultats, démontrés dans le point 6, présentent le témoin expérimental, la fumure du livre blanc et les trois engrais organiques. Ces derniers sont exprimés en fonction de la dose organique appliquée, à savoir 60N, 120N et 180N. Néanmoins, chaque modalité de traitement a bien reçu au total un apport de 180 unités d'azote.

Ainsi, les différentes modalités de traitement décrites dans la partie résultats, seront exprimés selon témoin, le livre blanc, ainsi que les engrais (compost, digestat, fientes) associés à leur dose organique (60N, 120N et 180N).

En revanche, suite à une erreur dans le protocole, une modalité de rendement utilisée dans le cadre de mon mémoire, à savoir l'objet compost 180N fut absente dans l'essai FH24-11. Dès lors, le rendement, le poids de mille grains et la teneur en protéines ne furent pas mesurés pour

cette modalité. Cependant, une valeur de rendement a bien pu être estimée au travers d'une régression linéaire mettant en relation le rendement et la biomasse des épis au stade maturité pour les 10 autres modalités. Cette relation est illustrée par la figure 9. Cette équation a pu être calculée par un nombre de 40 points mais le coefficient (R^2) étant faible, il pourrait y avoir un biais quant à l'estimation du rendement pour la modalité compost 180N.

Par conséquent, certaines composantes de rendement ne présenteront aucun résultat pour la modalité 180N. C'est pourquoi, celle-ci fut retirée du jeu de données uniquement pour ces composantes de rendement.

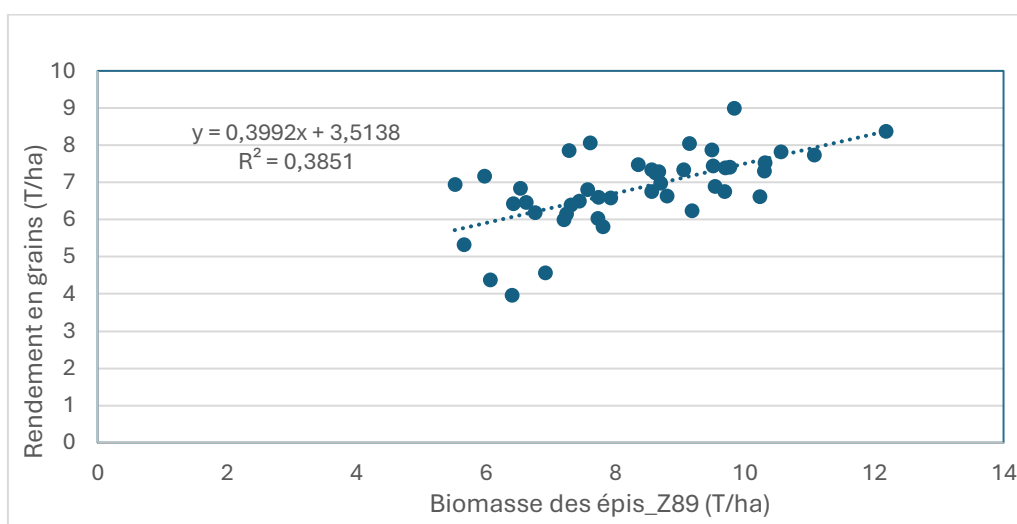


Figure 9 : Courbe de régression du rendement selon la biomasse des épis.

4.5. Matières organiques

4.5.1. Le compost

Le compost utilisé dans le cadre de cette expérimentation provient de la société AGRICOMPOST S.A localisée à Horion-Hozémont. Il est 100% issu de déchets verts à savoir principalement de haies, de souches d'arbres et d'herbes. Ces déchets sont triés afin de retirer les éventuelles matières non organiques (plastique, métaux, ...) puis broyés.

Ensuite, les déchets verts sont enrichis par :

- Du sel de vinasse de chicorée contenant majoritairement de l'azote principalement de type ammoniacal, provenant de chez Bénéo,
- Des cendres de son de céréales contenant la potasse et phosphore venant de chez BioWanze S.A via le processus de fabrication du bioéthanol
- Du sulfate de potasse issu du colza lors de la fabrication de Biodiesel.

Ces matières sont mélangées aux déchets verts. Ensuite, elles sont disposées en andain et homogénéisées une fois par semaine. Les andains sont ensuite rassemblés en tabulaire jusqu'à l'étape du tamisage, après celle-ci, le produit achève sa phase de maturation. Le processus de compostage dure entre deux à quatre mois (Agricompost, 2024).

L'engrais a été appliqué à la volée, comme illustrée par la photo 10, avec une quantité de 2,952 kg et 5,904 kg par parcelles pour les doses respectives de 60N et 120N.



Figure 10 : Application de compost (Photo M.Collart).

4.5.2. Le digestat

Le digestat utilisé provient de la société de Biogaz du Haut-Geer, située à Geer. Cet engrais est un produit de la biométhanisation de déchets verts. Ces derniers proviennent : de maïs d'ensilage (en majorité), d'oignons (en majorité), d'herbes fraîches et ensilées, betteraves sucrières, fanes de pois, reste fruits et légumes, sirop de sucre et enfin de pulpes surpressées. Un broyage peut être réalisé notamment sur les betteraves. Ces déchets verts sont placés dans un digesteur où une digestion anaérobie est réalisée à une température constante de 37°C. Le processus de biométhanisation génère du biogaz (CH_4 et CO_2) et du digestat. Le digestat obtenu est sous forme liquide et a été appliqué à l'aide d'un arrosoir muni d'une pelle à son extrémité comme illustré par la figure 11. Une quantité de 19,421 l et 38,842 l pour les doses respectives de 60N et 120N a été appliquée par parcelles.



Figure 11 : Application de digestat (Photo M.Collart).

4.5.3. *Les fientes de poules*

Les fientes de poules proviennent d'un élevage de poulets de chairs situé dans la région de Mettet. Deux échantillons ont été nécessaires à l'application des deux apports. Ces matières organiques ont été appliquées à la volée avec une quantité respective de 3,721 kg et 7,442 kg pour les doses de 60N et 120 N.

Il est important de souligner qu'il existe une différence législative entre les fientes de volailles et le fumier de volaille. En effet, le fumier de volaille signifie que « les déjections sont mêlées » à la litière qui est souvent composée de paille. Tandis que « les fientes sont des déjections pures » et ne sont donc pas mélangées à la litière (Protect'eau, 2024).

Dans cette étude, c'est donc du fumier de volaille qui a été utilisé car les fientes étaient mélangées avec de la paille. En revanche, dans le langage courant en agriculture aucune distinction existe entre ces deux termes. C'est pourquoi, il a été décidé d'appeler cette matière fientes de poules.



Figure 12 : Application des fientes de poules (Photo M.Collart)

4.5.4. *Composition des matières organiques*

Les matières organiques ont été analysées par le Bureau Environnement et Analyses de Gembloux Agro-Bio Tech (B.E.A.Gx) avant leur application, afin de déterminer leur teneur en nutriments. Le tableau 7 ci-dessous, renseigne la composition des trois engrais ainsi que l'ammonitrate utilisé. Celui-ci provient d'ailleurs de la Société Coopérative Agricole de la Meuse (SCAM). Il était sous forme de granulé et fut également appliqué manuellement à la volée.

Tableau 7 : Composition des engrais

| Résultats sur matière brute | Compost | Digestat | Fientes 1 | Fientes 2 | Ammonitrate 27% |
|---|---------|----------|-----------|-----------|-----------------|
| Matière organique (%) | 21,73 | 3,95 | | | 0 |
| N tot (%) | 2,94 | 0,384 | 2,388 | 2,529 | 27 |
| N organique (%) | 0,24 | 0,298 | 1,700 | 2,042 | |
| N-NH₄⁺ (%) | 2,699 | 0,085 | 0,688 | 0,487 | 13,5 |
| N-NO₃⁻ (%) | 0,001 | <0,001 | | | 13,5 |
| pH | 9 | 8,3 | | | |
| C/N | 3,8 | 6,5 | 6,3 | 8,9 | |
| P₂O₅ (%) | 3,82 | 0,156 | 0,684 | 0,774 | 0 |
| K₂O total (%) | 8,96 | 0,338 | 1,565 | 2,104 | |
| MgO (%) | 1,20 | 0,11 | | | |
| CaO (%) | 4,26 | 0,39 | | | |
| Na₂O (%) | 4,50 | 0,12 | | | |
| SO₄²⁻ (%) | 17,83 | | | | |
| Valeur neutralisante | 6 | | | | |

4.6. Observations et paramètres mesurés

Différentes observations et mesures ont été prises lors de la période culturale du froment d'hiver. Le but de celles-ci est de collectionner des données afin d'apporter des éléments de réponses à la question de recherche. Ces observations ont toutes été réalisées dans les parcelles destinées au prélèvement. Seules les mesures de rendement, PMG et teneur en protéines du grain ont été effectuées dans les parcelles de rendement. Le tableau 8 synthétise les différentes mesures effectuées.

Tableau 8 : Synthèse des mesures

| Mesures | Stade BBCH | | | | | | Nombre de mesures/parcelle |
|-------------------------------|------------|----|----|----|----|--------------|----------------------------|
| | 25 | 30 | 39 | 65 | 89 | post-récolte | |
| Stades phénologiques | x | x | x | x | x | | 4 |
| Densité de talles | | x | x | | | | 2 |
| Densité de plantes | | x | x | | | | 2 |
| Densité d'épis | | | | x | x | | 2 |
| Azote contenue dans la plante | | | | x | x | | 2 |
| Biomasse aérienne | | x | x | x | x | | 4 |
| Teneur en azote dans le sol | x | x | x | x | x | x | 5 |
| Rendement | | | | | x | | 1 |
| PMG | | | | | x | | 1 |
| Teneur en protéines du grain | | | | | x | | 1 |

4.6.1. Stades phénologiques

L'observation des stades phénologiques du froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.) s'est opérée tout au long de sa période de développement selon l'échelle BBCH améliorée (Annexe A) afin de vérifier que les stades souhaités soient bien atteints pour réaliser la prise de mesures.

Les observations étaient réalisées selon la méthode suivante :

- 1) Prédiction du stade phénologique à l'aide de l'outil d'aide à la décision « Phénoblé ».
- 2) Confirmation sur l'essai FH24-11 par observations sur pieds et dissections de maîtres brins sur des plantes prélevées dans les parcelles de prélèvements.
- 3) En cas de confirmation de stade : application du schéma de fertilisation ainsi que la collecte de données.

4.6.2. Densité de plantes, de talles et d'épis

Les densités de plantes, de talles et d'épis sont des composantes permettant de déterminer le rendement (Arvalis, 2022). Les deux premières mesures citées s'effectuent par le comptage de ces composantes sur une distance de 50 cm prise aléatoirement dans la parcelle et répétée deux fois. Une normalisation est ensuite effectuée via la distance mesurée et l'interligne de semis afin d'estimer le nombre de plantes et de talles au mètre carré.

a) Densité d'épis

La densité d'épis est dénombrée lors des prélèvements de biomasse au stade de mi-épiaison et de maturité. Le nombre d'épis comptés sur la surface prélevée est ensuite normalisée afin d'obtenir une densité d'épis par mètre carré.

Il est à noter que suite à une erreur dans la prise de données au stade mi-floraison, la densité d'épis n'a pas été analysée statistiquement.

4.6.3. Teneur de l'azote dans la plante : N uptake

La méthode Dumas par combustion sèche selon la norme NF EN ISO 16634-1, a été réalisée afin de déterminer la teneur en azote de chaque échantillon. Celle-ci a été effectuée par le laboratoire d'analyse du Centre Provincial de l'Agriculture et de la Ruralité (CPAR) situé à La Hulpe (CPAR, 2024). Ainsi, tous les échantillons ont d'abord été pré-broyés à l'aide d'un broyeur à couteaux, pour ensuite être broyés via un broyeur cyclotec afin d'obtenir une poudre fine de l'ordre d'1 mm d'épaisseur, pour finalement être analysés par le CPAR. La figure 13 illustre les étapes décrites ci-dessus.



Figure 13 : Pré-broyage et broyage des biomasses aériennes (Photo M.Collart)

4.6.4. Prélèvement de biomasse

Les prélèvements de biomasse aérienne ont été effectués à quatre stades physiologiques clés : redressement (Z30), dernière feuille (Z39), mi-floraison (Z65) et à maturité (Z89). La biomasse aérienne a été prélevée dans des quadrats de 50 cm de long et sur une largeur de trois lignes de semis. Les prélèvements ont été réalisés manuellement, les plateaux de tallages des plantes ont été sectionnés et les plantes furent par la suite placées dans les sachets micro-perforés identifiés. Ces dernières ont été placées dans une étuve à une température de 65°C durant 72h comme il est indiqué dans le protocole établi par l'unité phytotechnie. La biomasse sèche fut ensuite pesée et normalisée par la surface prélevée (0,1875 m²) afin d'estimer la biomasse de matière sèche en tonnes par hectare. La figure 14 illustre les prélèvements de biomasse.



Figure 14 : Prélèvement de biomasse aérienne (Photo M.Collart)

4.6.5. Teneur en azote dans le sol

La mesure de reliquats azotés fut réalisée par prélèvements de sol à l'aide d'une sonde dans les horizons 0-30, 30-60 et 60-90 cm. Ces horizons furent par la suite compilés par la somme de leur teneur respective afin d'obtenir celle de l'horizon 0-90. Ces observations furent effectuées selon les stades clés établis dans le protocole et avant chaque application d'engrais.

Le premier prélèvement fut donc réalisé avant la première application d'engrais c'est pourquoi un échantillon composite répété quinze fois de manière aléatoire pour chaque horizon fut effectué.

Ensuite, les autres prélèvements furent établis de la manière suivante. Pour chaque horizon de sol, trois prélèvements furent effectués de manière aléatoire par parcelle. Par la suite, les quatre répétitions de chaque objet de traitement furent regroupées par horizon et par objet de traitement afin d'obtenir un résultat unique par horizon et par objet. La figure 15 illustre le prélèvement d'échantillons de sol.

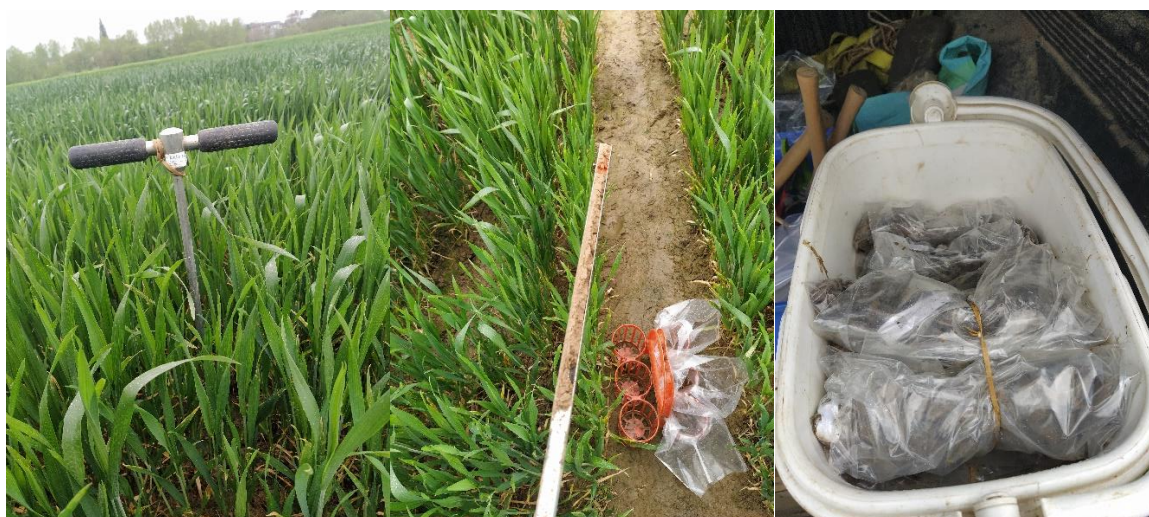


Figure 15 : Prélèvements d'échantillons de sol (Photo M.Collart)

Les échantillons ont par la suite été analysés par le Groupe de Recherche Environnement et Ressources Azotées (GRENeRA). L'analyse de dosage des nitrates et ammonium est procédée de la manière suivante (Grenera, 2023) :

- 1) Tamisage des échantillons frais à l'aide d'un tamis de 8 mm.
- 2) Pesée de 30g de sol par échantillon et ajout de 150 ml de KCL 0,5M
- 3) Agitation pendant 30 minutes
- 4) Filtration
- 5) Dosage à l'analyseur (les échantillons peuvent être congelés s'ils ne sont pas analysés dans les 48h après le prélèvement)

Les valeurs en ammonium avoisinent le zéro pourcent. Seules les valeurs en nitrates ont été retenues. Celles-ci ont été établies en tenant compte du pourcentage de matière sèche et ont été normalisées en kg de NO₃/ha.

4.6.6. Le rendement

La récolte fut réalisée lorsque le grain était à maturité et avait une humidité inférieure à 15%. Elle fut effectuée par le CePiCOP à l'aide de la moissonneuse-batteuse de la marque ZÜRN. Celle-ci permet de mettre les grains en sac et de renseigner la masse de l'échantillon. L'humidité a été déterminée par le CePiCOP dans la salle de pesée.

Ensuite, le rendement a été normalisé à une humidité standard de 15% et convertit en tonnes par hectare.



Figure 16 : Récolte du froment (Photo M.Collart)

4.6.7. Le poids de mille grains

Le PMG est déterminé à l'aide d'un compteur à grains. Celui-ci dénombre quatre fois 100 grains qui sont par la suite pesés à l'aide d'une balance de précision. Après, une normalisation est effectuée afin d'obtenir le poids de mille grains.

4.6.8. La teneur en protéines du grain

La teneur en protéines du grain a été déterminée par l'asbl ATISA (Aide à la Transposition de l'Innovation dans le Secteur Alimentaire), dans le Laboratoire Science des Aliments et Formulation, situé au sein de Gembloux Agro-Bio Tech.

4.7. Ligne du temps des observations réalisées

Une ligne du temps a été réalisée afin de recenser les observations réalisées et l'application des engrais dans l'ordre chronologique. Cette ligne du temps est illustrée par la figure 17.

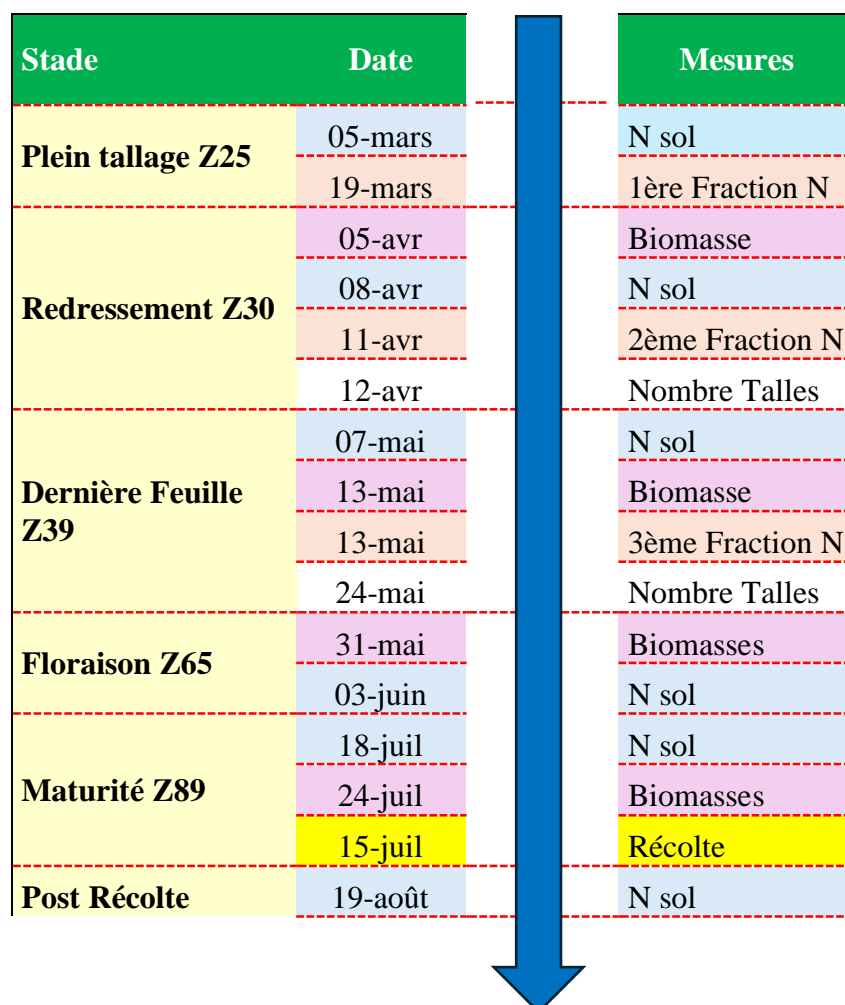


Figure 17 : Ligne du temps des observations réalisées

5. Analyse des données

5.1. Manipulation de données

Les données de bases du rendement ont permis d'obtenir des informations supplémentaires sur les composantes de rendements. L'équation 3 synthétise, ci-dessous, le détail de l'obtention de nouvelles variables depuis les données de bases de rendement.

$$\text{Densité de grains} = \frac{\text{Rendement}}{\text{PMG}}$$

$$\text{Nombre de grains/épis} = \frac{\text{Densité grains}}{\text{Densité épis}}$$

$$\text{Azote dans le grain} = \text{Rendement} * 1000 * \frac{\text{Teneur en protéines} * 6,25}{100}$$

Equation 3 : Synthèse des équations de manipulation des données

5.2. Sources de variations : Facteurs étudiés

5.2.1. Facteurs fixes

Trois facteurs fixes ressortent de l'essai FH24-11. Ceux-ci sont énumérés ci-dessous :

- 1) Le traitement : 11 objets : les trois engrais associés à leurs trois doses organiques ainsi que le témoin et la fumure du livre blanc.
- 2) Les engrais organiques : 3 modalités : le compost, le digestat et les fientes de poules.
- 3) La dose organique : 3 modalités : 60N, 120N, 180N.

5.2.2. Facteur aléatoire

Un facteur aléatoire est à prendre en considération dans cette expérimentation afin de maîtriser la variabilité expérimentale, il s'agit du facteur bloc. Les traitements ont été répartis de manière aléatoire au sein de chaque bloc. Cela permet d'obtenir une analyse plus précise des effets des traitements et ainsi d'accroître la puissance statistique de l'étude.

- Facteur bloc : 4 blocs aléatoires complets.

5.3. Analyse statistique

Les données ont été analysées à l'aide du logiciel statistiques R (version 4.3.1) utilisé au sein de l'environnement de développement RStudio.

Premièrement, un modèle linéaire à effets mixtes a été réalisé afin de prendre en compte la variabilité au sein de la parcelle à travers le facteur bloc. Deux modèles linéaires à effets mixtes furent utilisés. Le premier modèle fut utilisé pour un seul facteur (traitement). Ensuite, un second modèle effectué en prenant en compte les facteurs engrais et doses organiques. Par conséquent, le témoin et la fumure du livre blanc ne sont pas pris en compte dans le second modèle. Les packages utilisés pour l'application du modèle linéaire à effet mixte sont les suivants : lme4, lmerTest, car, multcompView, multcomp.

Ensuite, la fonction DHARMA (Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level / Mixed) Regression Models) fut utilisée, via le package DHARMA, pour vérifier de manière robuste les conditions d'application (CA) du modèle. Celles-ci sont : la normalité et l'homogénéité de la variance des résidus. DHARMA permet de simuler des résidus standardisés, via la fonction simulationOutput, et de les comparer ensuite à une distribution théorique attendue. Les résultats des CA pour les deux modèles sont visibles en annexe F.

Une fois ces conditions d'existence vérifiées pour les deux modèles, une analyse de la variance univariée à un seul facteur (traitement) a été effectuée (ANOVA). Une seconde ANOVA à deux facteurs croisés (engrais et dose organique) fut réalisée. Cette analyse permet de démontrer l'impact de plusieurs facteurs fixes par l'obtention de p-valeurs sur une variable mesurée tout en tenant compte des variations aléatoires.

L'hypothèse nulle de l'ANOVA est l'absence d'effet. Le niveau de significativité est fixé par une p-valeur inférieure à 0,05.

Concernant le second modèle, en cas d'interaction entre les deux facteurs, l'ANOVA fut décomposée en une ANOVA à un seul facteur. De plus suite à l'erreur dans le protocole, vu que certaines variables établies au stade maturité ne comportait aucunes données pour la modalité compost 180N, il a été choisi de retirer la dose organique 180N afin de maintenir une ANOVA à deux facteurs croisés.

Pour chaque ANOVA effectuée, un test post-hoc a été réalisé via la fonction emmeans du package emmeans qui réalise une comparaison de moyenne marginale. Cette fonction compare les moyennes marginales des différents groupes afin de recenser des différences statistiques entre ceux-ci. Le tableau 9 reprend les différentes variables analysées statistiquement.

Enfin, les différents graphiques ont été obtenu au moyen du package ggplot2 et GGally. Ceux-ci sont présentés dans la partie résultats.

Par ailleurs, des corrélations ont été calculées entre le rendement et ses composantes afin de démontrer d'éventuels liens entre ces variables.

En outre, des graphes présentant l'évolution de la teneur en nitrates dans le sol furent également réalisés. Ces graphes expliqués ci-dessus, ont été effectués en utilisant le package ggplot.

Tableau 9 : Synthèse des variables étudiées à l'aide des tests de significativité.

| Variables | Facteurs | Analyse et test post-hoc |
|----------------------------------|---|---------------------------------------|
| Densité de talles | Traitement Engrais Dose organique | Anova des modèles LMER & Test Emmeans |
| Densité de plantes | | |
| Densité des épis | | |
| Azote contenue dans la plante | | |
| Biomasse aérienne | | |
| Teneur en azote dans le sol | | |
| Rendement | | |
| PMG | | |
| Teneur en protéines du grain | | |
| Densité de grains/m ² | | |
| Nombre de grains/épis | | |
| Azote contenu dans le grain Z89 | | |

- **Courbe critique de dilution de l'azote**

La courbe critique de dilution de l'azote indique la concentration minimale d'azote total dans la plante nécessaire pour maximiser la production de matière sèche. Elle définit le seuil au-delà duquel une augmentation d'azote ne conduit plus à une augmentation significative de matière sèche malgré que la plante continue de prélever cet élément nutritif et de l'accumuler dans ses tissus. Cela est notamment appelé la consommation de luxe.

Cette courbe a donc été effectuée afin d'identifier l'état nutritif du froment d'hiver selon les différentes modalités de traitement.

La méthodologie présentée par la référence (Justes et al., 1994) a permis de construire cette courbe de dilution de l'azote. La formule est présentée par l'équation (4) ci-dessous où N indique la concentration critique d'azote dans la plante (%) et WS la biomasse sèche en (T/ha).

$$N = 5,35 * WS^{-0,442} \quad (4)$$

6. Résultats

6.1. Résultats des tests de significativité des facteurs

Lors de cette expérimentation, une analyse préliminaire univariée (AV1) fut effectuée en fonction du facteur traitement afin de donner un premier diagnostic des données. Ensuite, une seconde analyse univariée à deux facteurs (AV2) fut réalisée en fonction des facteurs engrais et doses organiques. Le tableau 10 montre les degrés de significativité du facteur traitement ainsi que ceux des facteurs engrais et doses organiques.

Tableau 10 : Résultats de la significativité des facteurs traitement et engrais et dose organique.
(Légende : *** : p-valeur très hautement significative, ** : p-valeur hautement significative, * : p-valeur valeur significative, • : p-valeur proche du seuil de significativité)

| Variables | AV1 | AV2 | | |
|--|-----------------------|--------------------|------------------------------|--|
| | Facteur Traitement | Facteur Engrais | Facteur Dose organique | Interaction Engrais/Dose organique |
| Biomasse totale_Z30 | | | | |
| Densité_Plantes_Z30 | | * | | |
| Densité_Talles_Z30 | | * | | |
| Biomasse totale_Z39 | *** | *** | | |
| Densité_Plantes_Z39 | | | * | |
| Densité_Talles_Z39 | ** | * | ** | |
| Biomasse des tiges_Z65 | * | * | | |
| Biomasse des feuilles_Z65 | *** | *** | * | |
| Biomasse des épis_Z65 | ** | | • | |
| Biomasse totale_Z65 | *** | * | | |
| Azote contenu dans les épis_Z65 | *** | | ** | |
| Azote contenu dans les tiges & feuilles_Z65 | *** | | | |
| Biomasse des tiges_Z89 | *** | *** | | |
| Biomasse des feuilles_Z89 | *** | *** | | |
| Biomasse des épis_Z89 | *** | *** | | |
| Biomasse totale_Z89 | *** | *** | | |
| Densité des épis_Z89 | * | *** | | |
| Azote contenu dans les épis_Z89 | *** | | *** | * |
| Azote contenu dans les tiges & feuilles_Z89 | • | | • | |
| Rendement en grains | *** | *** | ** | |
| PMG | ** | | *** | |
| Teneur protéines du grains | *** | ** | *** | |
| Densité grains/m ² | *** | * | *** | |

| | | | | |
|---------------------------------|-----|----|-----|--|
| Nombre de grains/épis | • | | | |
| Azote contenu dans le grain_Z89 | *** | ** | *** | |

Le tableau 11 ci-dessous présente les moyennes et groupes emmeans des différentes variables analysées selon le facteur traitement.

Tableau 11: Moyenne et groupes emmeans selon le facteur traitement

| Biomasse_Z30 (T/ha) | Moyenne emmeans | | Densité Plantes Z30 (plantes/ m²) | Moyenne emmeans | | Densité Talles Z30 (talles/m²) | Moyenne emmeans | |
|---------------------------------------|----------------------------|-----|---|----------------------------|----|--|----------------------------|----|
| Digestat_120N | 1.30 | a | Fientes_060N | 480 | a | Fientes_060N | 480 | a |
| Fientes_060N | 1.43 | a | Fientes_180N | 494 | a | Fientes_180N | 494 | a |
| Compost_060N | 1.52 | a | Temoin | 510 | a | Temoin | 510 | a |
| Compost_180N | 1.53 | a | Fientes_120N | 512 | a | Fientes_120N | 512 | a |
| Compost_120N | 1.55 | a | Digestat_180N | 542 | a | Digestat_180N | 542 | a |
| Temoin | 1.56 | a | Digestat_060N | 558 | a | Digestat_060N | 558 | a |
| Fientes_180N | 1.58 | a | Digestat_120N | 564 | a | Digestat_120N | 564 | a |
| Fientes_120N | 1.59 | a | Compost_060N | 592 | a | Compost_060N | 592 | a |
| Livre blanc | 1.62 | a | Compost_180N | 594 | a | Compost_180N | 594 | a |
| Digestat_180N | 1.72 | a | Compost_120N | 604 | a | Compost_120N | 604 | a |
| Digestat_060N | 1.73 | a | Livre blanc | 622 | a | Livre blanc | 622 | a |
| | | | | | | | | |
| Biomasse Totale Z39 (T/ha) | Moyenne emmeans | | Densité Talles Z39 (talles/m²) | Moyenne emmeans | | Biomasse Totale Z65 (T/ha) | Moyenne emmeans | |
| Fientes_180N | 5.58 | a | Fientes_120N | 350 | a | Temoin | 7.11 | a |
| Temoin | 5.68 | a | Temoin | 356 | a | Fientes_120N | 8.99 | ab |
| Fientes_060N | 5.80 | ab | Digestat_120N | 376 | ab | Digestat_120N | 9.17 | ab |
| Fientes_120N | 5.97 | ab | Digestat_180N | 390 | ab | Fientes_180N | 9.36 | ab |
| Digestat_120N | 6.03 | ab | Digestat_060N | 416 | ab | Fientes_060N | 10.03 | ab |
| Compost_060N | 6.73 | abc | Compost_120N | 418 | ab | Digestat_180N | 10.16 | ab |
| Digestat_180N | 6.82 | abc | Fientes_180N | 426 | ab | Digestat_060N | 10.20 | ab |
| Digestat_060N | 7.03 | abc | Livre blanc | 440 | ab | Compost_120N | 10.73 | b |
| Compost_120N | 7.80 | abc | Compost_180N | 454 | ab | Compost_060N | 10.89 | b |
| Compost_180N | 8.17 | bc | Fientes_060N | 466 | ab | Livre blanc | 11.01 | b |
| Livre blanc | 8.95 | c | Compost_060N | 520 | b | Compost_180N | 11.50 | b |

| Biomasse Totale Z89 (T/ha) | | | Moyenne emmeans | | | Densité Epis Z89 (épis/m ²) | | | Moyenne emmeans | | | Rendement en grains (T/ha) | | | Moyenne emmeans | | |
|----------------------------|--|--|-----------------|--|----|---|--|--|-----------------|--|---|----------------------------|--|--|-----------------|--|-----|
| Temoin | | | 11.3 | | a | Fientes_180N | | | 361 | | a | Temoin | | | 4.56 | | a |
| Fientes_120N | | | 12.1 | | a | Fientes_120N | | | 371 | | a | Fientes_120N | | | 6.37 | | b |
| Fientes_180N | | | 12.3 | | a | Digestat_180N | | | 375 | | a | Digestat_180N | | | 6.42 | | b |
| Digestat_180N | | | 13.1 | | ab | Temoin | | | 385 | | a | Fientes_180N | | | 6.54 | | bc |
| Digestat_120N | | | 13.2 | | ab | Digestat_120N | | | 396 | | a | Digestat_120N | | | 6.69 | | bc |
| Digestat_060N | | | 14.4 | | ab | Digestat_060N | | | 403 | | a | Fientes_060N | | | 6.88 | | bc |
| Fientes_060N | | | 15.0 | | ab | Fientes_060N | | | 413 | | a | Compost_120N | | | 7.12 | | bcd |
| Compost_060N | | | 15.5 | | ab | Compost_120N | | | 439 | | a | Digestat_060N | | | 7.35 | | bcd |
| Compost_120N | | | 16.9 | | b | Livre blanc | | | 441 | | a | Compost_180N | | | 7.45 | | bcd |
| Livre blanc | | | 17.1 | | b | Compost_060N | | | 445 | | a | Compost_060N | | | 7.60 | | cd |
| Compost_180N | | | 17.3 | | b | Compost_180N | | | 465 | | a | Livre blanc | | | 8.16 | | d |

| PMG (g) | | | Moyenne emmeans | | | Protéines du grain (%) | | | Moyenne emmeans | | |
|---------------|--|--|-----------------|--|----|------------------------|--|--|-----------------|--|----|
| Temoin | | | 35.9 | | a | Temoin | | | 9.30 | | a |
| Compost_060N | | | 36.6 | | ab | Fientes_180N | | | 9.42 | | a |
| Fientes_060N | | | 36.6 | | ab | Digestat_180N | | | 9.56 | | a |
| Fientes_120N | | | 37.5 | | ab | Digestat_120N | | | 11.29 | | b |
| Digestat_060N | | | 37.7 | | ab | Compost_120N | | | 11.65 | | bc |
| Fientes_180N | | | 38.1 | | ab | Digestat_060N | | | 11.77 | | bc |
| Digestat_120N | | | 38.2 | | ab | Fientes_120N | | | 11.79 | | bc |
| Digestat_180N | | | 38.3 | | ab | Livre blanc | | | 12.11 | | c |
| Livre blanc | | | 38.3 | | ab | Fientes_060N | | | 12.14 | | c |
| Compost_120N | | | 39.0 | | b | Compost_060N | | | 12.23 | | c |

Le tableau 12 ci-dessous présente les moyennes et groupes emmeans des différentes variables selon l'analyse à deux facteurs croisés (engrais & dose organique).

Tableau 12 : Moyenne et groupes emmeans selon les facteurs engrais et dose organique

| Biomasse_Totale_Z30 (T/ha) | | | | | |
|---------------------------------|-----------------|----|----------------|-----------------|---|
| Engrais | Moyenne emmeans | | Dose Organique | Moyenne emmeans | |
| Fientes | 1.53 | a | 120N | 1.48 | a |
| Compost | 1.53 | a | 060N | 1.56 | a |
| Digestat | 1.58 | a | 180N | 1.61 | a |
| | | | | | |
| Densité_Talles_Z30 (talles/m²)_ | | | | | |
| Engrais | Moyenne emmeans | | Dose Organique | Moyenne emmeans | |
| Fientes | 495 | a | 180N | 543 | a |
| Digestat | 555 | ab | 060N | 543 | a |
| Compost | 597 | b | 120N | 560 | a |

| Densité_Plantes_Z30 (plantes/m²)_ | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------|----|----------------|-----------------|---|
| Engrais | Moyenne emmeans | | Dose Organique | Moyenne emmeans | |
| Fientes | 178 | a | 180N | 191 | a |
| Digestat | 193 | ab | 120N | 193 | a |
| Compost | 211 | b | 060N | 198 | a |
| | | | | | |
| Biomasse_Totale_Z39 (T/ha) | | | | | |
| Engrais | Moyenne emmeans | | Dose Organique | Moyenne emmeans | |
| Fientes | 5.78 | a | 060N | 6.52 | a |
| Digestat | 6.62 | ab | 120N | 6.60 | a |
| Compost | 7.57 | b | 180N | 6.86 | a |

| Densité_Talles_Z39 (talles/m ²) | | | | | |
|---|-----------------|----|----------------|-----------------|----|
| Engrais | Moyenne emmeans | | Dose Organique | Moyenne emmeans | |
| Digestat | 394 | a | 120N | 381 | a |
| Fientes | 414 | ab | 180N | 423 | ab |
| Compost | 464 | b | 060N | 467 | b |
| | | | | | |
| Biomasse_Totale_Z89 (T/ha) | | | | | |
| Engrais | Moyenne emmeans | | Dose Organique | Moyenne emmeans | |
| Fientes | 13.1 | a | 120N | 14.1 | a |
| Digestat | 13.6 | a | 180N | 14.2 | a |
| Compost | 16.5 | b | 060N | 15.0 | a |
| | | | | | |
| Rendement_en grains (T/ha) | | | | | |
| Engrais | Moyenne emmeans | | Dose Organique | Moyenne emmeans | |
| Fientes | 6.60 | a | 120N | 6.73 | a |
| Digestat | 6.82 | a | 180N | 6.80 | a |
| Compost | 7.39 | b | 060N | 7.28 | b |
| | | | | | |
| Protéines_du grain (%) | | | | | |
| Engrais | Moyenne emmeans | | Dose Organique | Moyenne emmeans | |
| Digestat | 11.5 | a | 120N | 11.6 | a |
| Compost | 11.9 | ab | 060N | 12.0 | b |
| Fientes | 12.0 | b | | | |

| Biomasse_Totale_Z65 (T/ha) | | | | | |
|---|-----------------|----|----------------|-----------------|---|
| Engrais | Moyenne emmeans | | Dose Organique | Moyenne emmeans | |
| Fientes | 9.46 | a | 120N | 9.63 | a |
| Digestat | 9.84 | ab | 180N | 10.34 | a |
| Compost | 11.04 | b | 060N | 10.38 | a |
| | | | | | |
| Densité_Epis_Z89 (épis/m ²) | | | | | |
| Engrais | Moyenne emmeans | | Dose Organique | Moyenne emmeans | |
| Fientes | 382 | a | 180N | 400 | a |
| Digestat | 391 | a | 120N | 402 | a |
| Compost | 450 | b | 060N | 420 | a |
| | | | | | |
| PMG (g) | | | | | |
| Engrais | Moyenne emmeans | | Dose Organique | Moyenne emmeans | |
| Fientes | 37.1 | a | 060N | 37.0 | a |
| Compost | 37.8 | a | 120N | 38.2 | b |
| Digestat | 38.0 | a | | | |

6.2. Le rendement et la teneur en protéines

6.2.1. Le rendement

La variable rendement présente des regroupements très hautement significatifs selon le facteur traitement. Premièrement, deux groupes opposés se distinguent comme illustrés par la figure 18. Le témoin (a) possède le rendement moyen le plus faible (4,56 T/ha) et le livre blanc (d), c'est-à-dire l'application de trois apports de 60N d'ammonitrate, obtient le rendement moyen le plus élevé (8,16 T/ha).

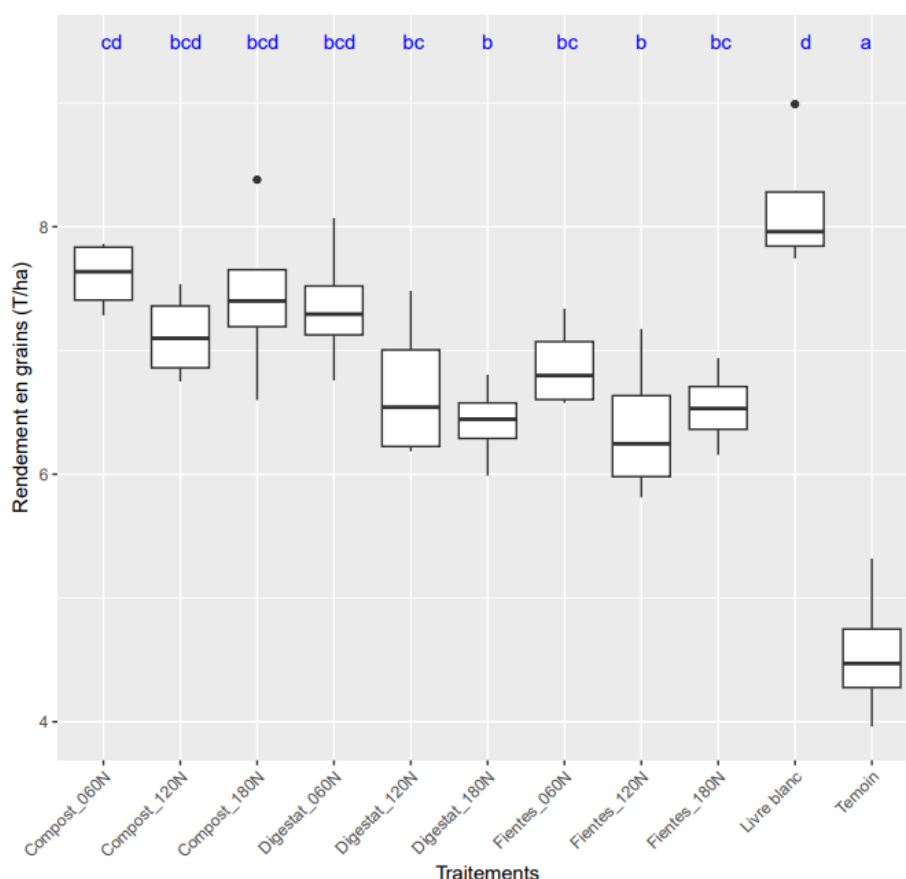


Figure 18 : Boxplots du rendement selon les modalités de traitements.

Les modalités compost 60N, 120N et 180N, ainsi que le digestat 60N se trouvent dans le même groupe statistique que le livre blanc, avec des rendements moyens respectifs de 7,60 T/ha, 7,12 T/ha, 7,45 T/ha et 7,35 T/ha. Il est important de préciser que suite à l'erreur dans le protocole (voir point 4.4.2), le rendement de la modalité 180N a été estimé et peut présenter un biais vu la valeur du coefficient ($R^2 = 0,385$). Le compost 60N est le meilleur rendement obtenu par un engrais organique. Cependant, hormis la modalité compost 60N (cd), les autres modalités de compost et digestat citées précédemment (bcd) se trouvent dans le même groupe statistique que les modalités fientes 60N, 120N, 180N et digestat 120N, 180N. Parmi ces dernières modalités, les fientes 120N et 180N se distinguent par un rendement inférieur avec une moyenne respective de 6,36 T/ha et 6,54 T/ha.

Une tendance s'observe pour l'engrais digestat : lorsque la dose organique augmente, le rendement associé décroît. Néanmoins, concernant le compost et les fientes, les meilleurs

rendements correspondent à une dose organique de 60N, suivi de la dose 180N, finissant pas la dose 120N.

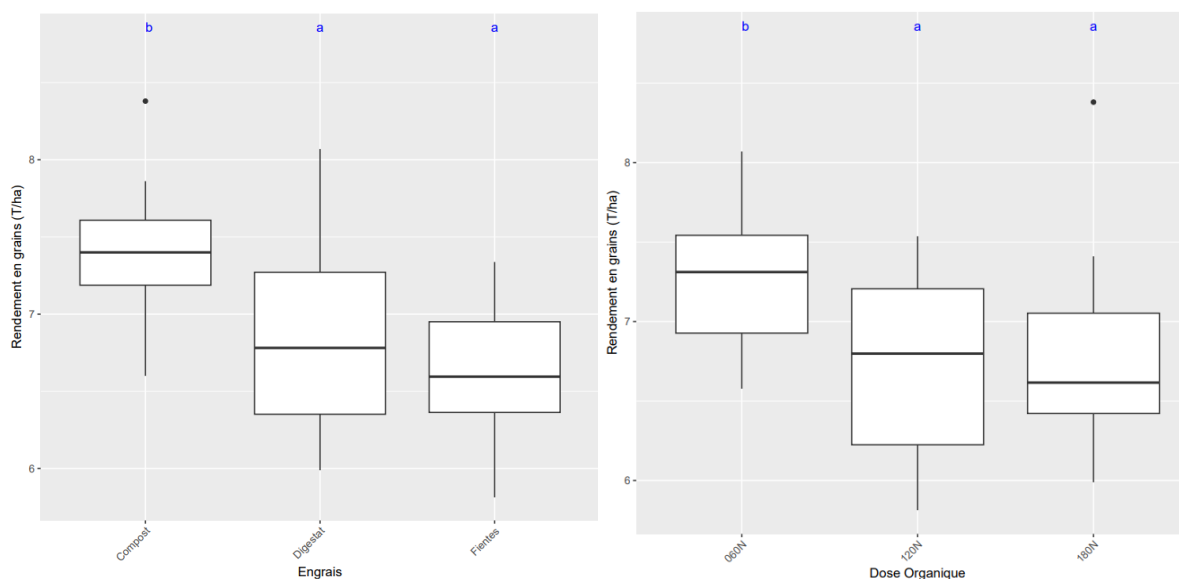


Figure 19 : Boxplots du rendement selon le type d'engrais (A) et selon la dose organique (B).

Ensuite, concernant l'analyse à deux facteurs, illustrée par la figure 19, une différence très hautement significative apparaît entre les engrais (point A) où le compost présente un rendement moyen supérieur, valant 7,39 T/ha. Une différence hautement significative se présente également concernant le facteur dose organique (point B de la figure 19). Effectivement, la dose organique de 60N présente un rendement moyen élevé de 7,28 T/ha.

6.2.2. La teneur en protéines du grain

La teneur en protéines du grain selon le facteur traitement est illustrée par le point A de la figure 20. Celle-ci démontre des différences très hautement significatives. Un premier groupe (c), possédant la teneur la plus élevée avec 12,15 %, est composé du livre blanc, du compost 60N et des fientes 60N. A contrario, le témoin, les fientes 180N et digestat 180N forment le groupe (a) ayant la teneur la plus faible et présentant un pourcentage moyen de 9,40 %.

Le troisième groupe se compose du compost 120N, digestat 60N, digestat 120N et fientes 120N. Cependant, les trois dernières modalités de traitement citées, figurent également dans le même groupe statistique (bc) que celui du premier groupe.

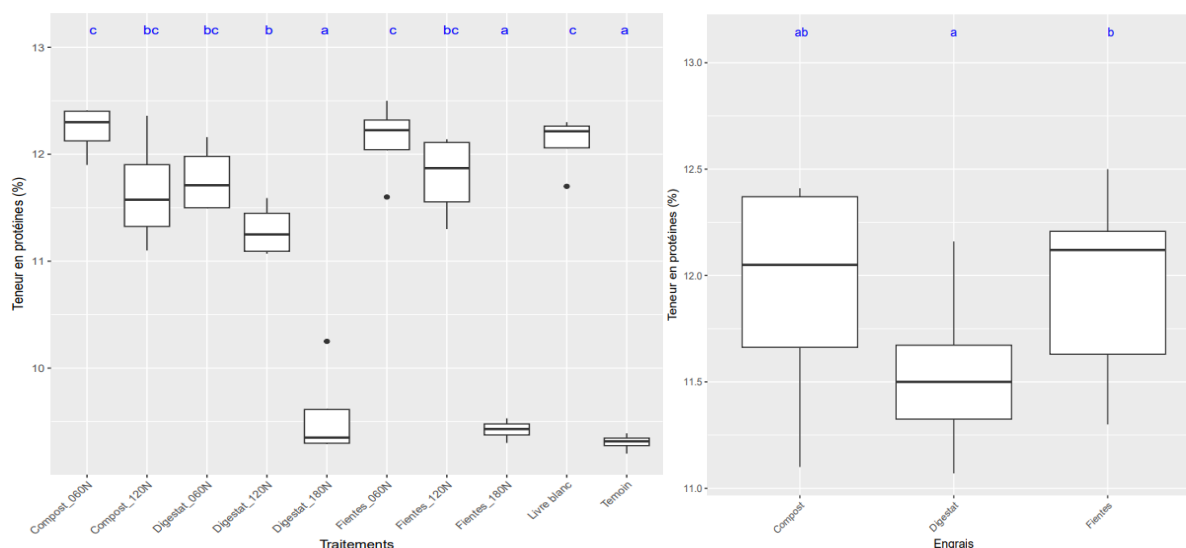


Figure 20 : Boxplots de la teneur en protéines selon les 10 modalités de traitements (A) et selon les engrais organiques (B).

Ensuite, à une erreur dans le protocole (point 4.4.2), la dose organique 180N fut retirée du jeu de données et n'a pu être analysée. Des différences hautement significatives sont démontrées dans le point B de la figure 20 concernant les engrais. Effectivement, les fientes montrent un pourcentage moyen en protéines plus élevé (12,0 %) suivi du compost (11,9 %), le digestat possédant le pourcentage le plus faible (11,5 %).

Enfin, les doses organiques possèdent des différences très hautement significatives. Une dose organique de 60N présente un pourcentage supérieur à la dose 120N (voir annexe E).

6.3. Les composantes du rendement

D'autre part, le rendement étant défini, selon Slafer et al. (2022) par les équations (1) et (2) démontrées au point (2.1.3.), les relations existantes entre le rendement, le nombre de grains/m², le PMG ainsi que la fertilité et la densité des épis ont été étudiées.

Les figures suivantes démontrent les corrélations existantes entre ces composantes et le rendement pour les 10 traitements comme la modalité 180N fut retirée de la base de données (point 4.4.2). Seule la composante densité d'épis est exprimée selon les 11 traitements. Par la suite, l'élaboration de ces composantes est également expliquée. Les valeurs des différents coefficients de corrélation pour chaque modalité de traitement, sont repris à l'annexe B.

6.3.1. La densité de grains

La figure 21 ci-dessous, présente la régression entre la densité de grains et le rendement.

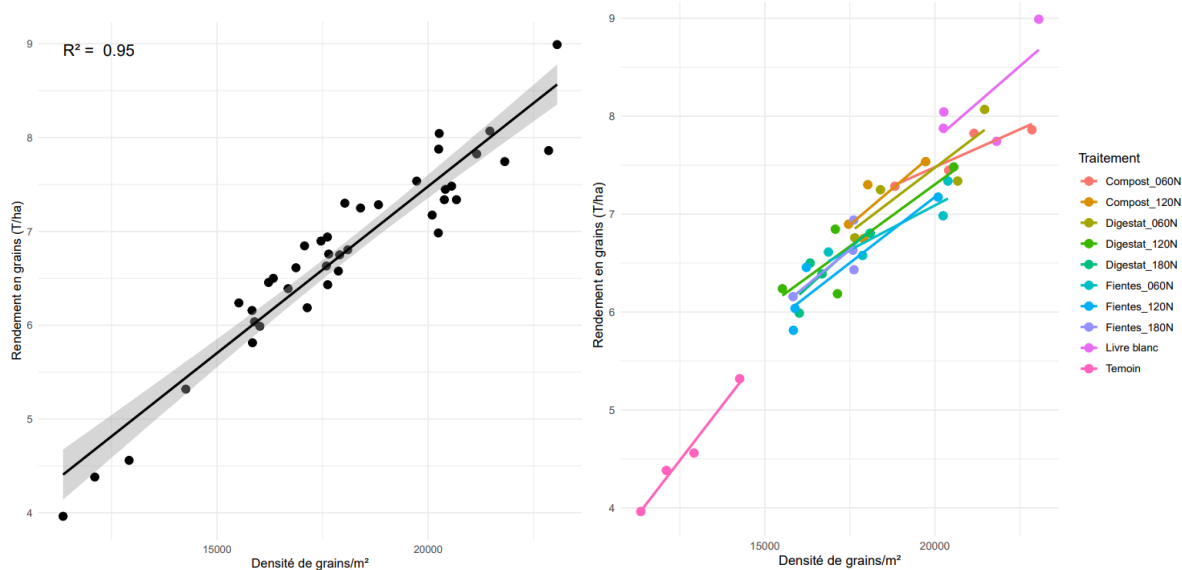


Figure 21 : Graphes de régression du rendement en fonction de la densité grains selon les 10 traitements (A) et pour chaque traitement (B).

La corrélation entre le rendement et la densité de grains (= nombre de grains/m²) est forte possédant un coefficient de 0,95. Cela démontre que la relation entre les deux variables est presque linéaire et par conséquent, la densité de grains permet d'expliquer fortement le rendement. En outre, cette corrélation est également démontrée par le point B de la figure 21 qui reprend les courbes de corrélations pour les 10 traitements. Les traitements ayant les rendements les plus élevés à savoir le livre blanc et le compost 60N possèdent également une densité de grains élevées. A contrario, le témoin qui est le traitement, ayant le rendement le plus faible, possède une faible densité de grains.

6.3.2. Le poids de mille grains

La figure 22 ci-dessous, présente la régression entre le PMG et le rendement.

Le point A dans la figure 22 démontre que la relation entre le PMG et le rendement est faible, justifiée par un coefficient de 0,22. Sur le point B de la figure 22, seuls le témoin et le livre blanc possèdent une relation positive entre ces deux variables. En revanche, les différentes modalités d'engrais organiques possèdent, en majorité, une relation négative.

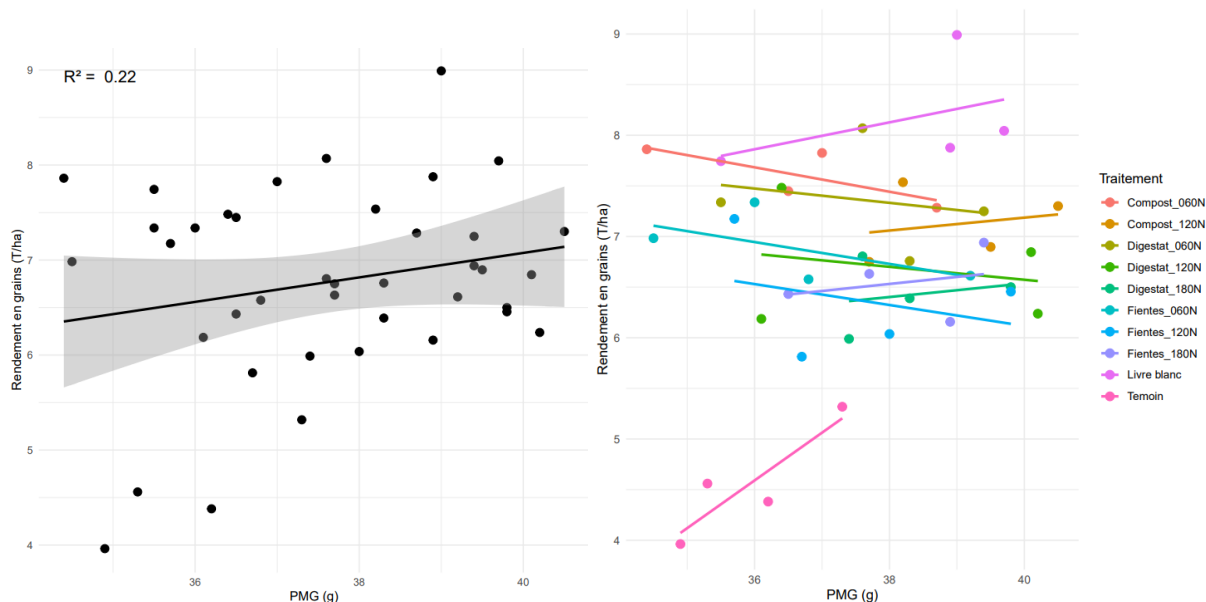


Figure 22 : Graphes de régression du rendement en fonction du PMG selon les 10 traitements (A) et pour chaque traitement (B).

6.3.3. La fertilité des épis

La figure 23 ci-dessous, présente la régression entre la fertilité des épis et le rendement.

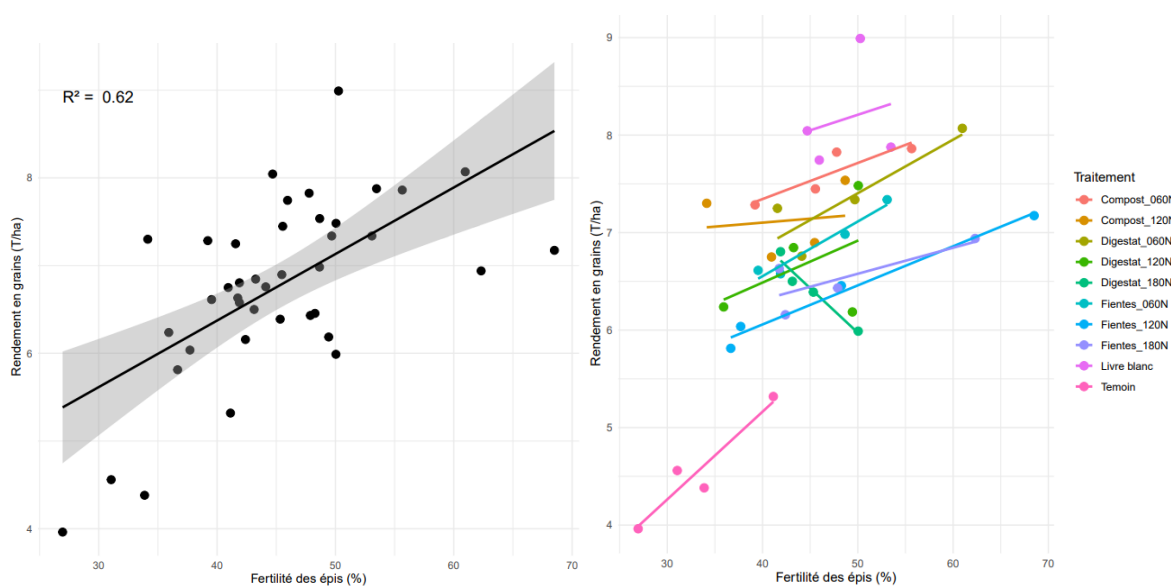
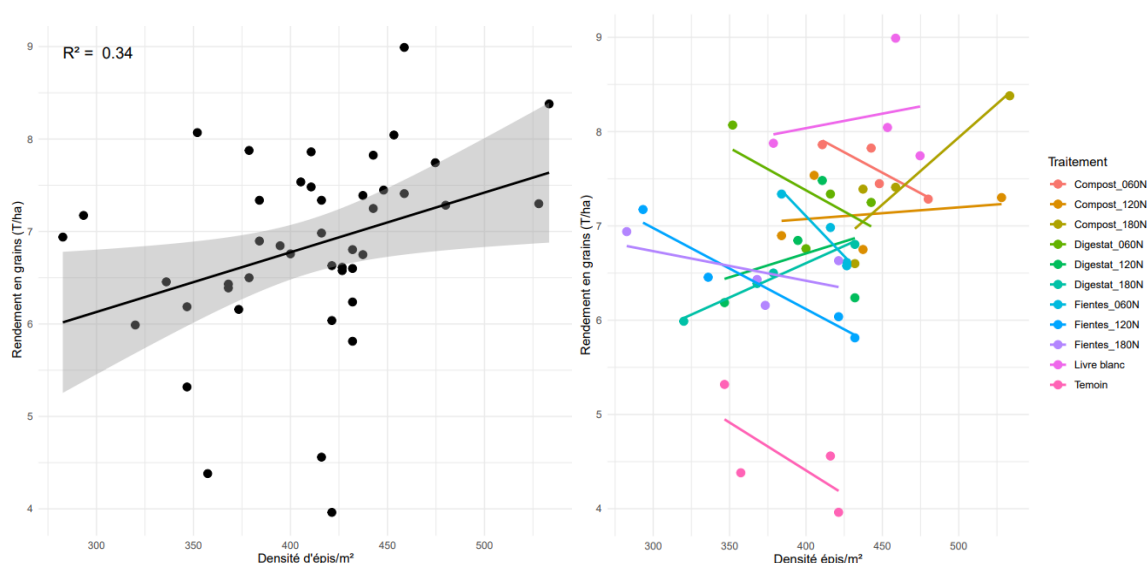


Figure 23 : Graphes de régression du rendement en fonction de la fertilité des épis selon les 10 traitements (A) et pour chaque traitement (B).

Le point A de la figure 23 illustre une relation positive entre le rendement et la fertilité des épis (= nombre de grains/épis), démontré par un coefficient de corrélation de 0,62. Par conséquent, une augmentation de la fertilité des épis induit une augmentation de rendement. La figure B démontre également cette relation positive pour tous les traitements dont la majorité présente une forte corrélation. Seul, le digestat 180N possède une relation négative.

6.3.4. La densité d'épis

La figure 24 ci-dessous illustrent les corrélations entre la densité d'épis et le rendement. Cette variable, avec la fertilité des épis, permettent d'expliquer la densité de grains.



La densité des épis (= le nombre d'épis/m²) ne permet pas d'expliquer la variable rendement. D'une part, son coefficient de corrélation ($R^2 = 0,34$) est faible comme le démontre le point A de la figure 24. D'autre part, la variable selon le facteur traitement est non significative (voir tableau 10). De plus, le point B de la figure 24 illustre même que la corrélation peut être négative pour la moitié des modalités de traitement hormis le compost 120N et 180N, le digestat 120N et 180N, et le livre blanc. Il est à noter que pour les modalités compost 180N et digestat 180N la corrélation est très forte et démontrée par un coefficient respectif de 0,915 et 0,992.

6.4. Elaboration des composantes de rendements

Le rendement peut donc être exprimé selon différentes composantes. Parmi elles, seules les composantes du nombre de grains/m² et la fertilité des épis sont corrélées au rendement et permettent par conséquent d'expliquer ce dernier.

Le nombre de grains/m², la densité d'épis ainsi que la fertilité des épis sont élaborées lors de la phase végétative c'est-à-dire du semis jusqu'au stade mi-floraison. Le PMG quant à lui est établi à partir du stade floraison jusqu'à la récolte.

a) La densité de grains

L'un des premiers stades végétatifs mesurés correspond à la densité talles. Les talles montent en épis qui, ensuite, se rempliront en grains dont le poids des grains permettra d'élaborer le rendement.

A propos de la densité de talles **au stade redressement (Z30)**, aucune différence significative n'est démontrée ni par le facteur traitement ni par le facteur dose organique.

Cependant, l'analyse par le facteur engrais pour la densité de plants au stade redressement montre une différence significative. En effet, le compost possède une densité plus élevée (211 plants/m²) suivi du digestat. Les fientes présentent la densité la plus faible avec une densité moyenne de 178 plants/m² comme le démontre le point A de la figure 25.

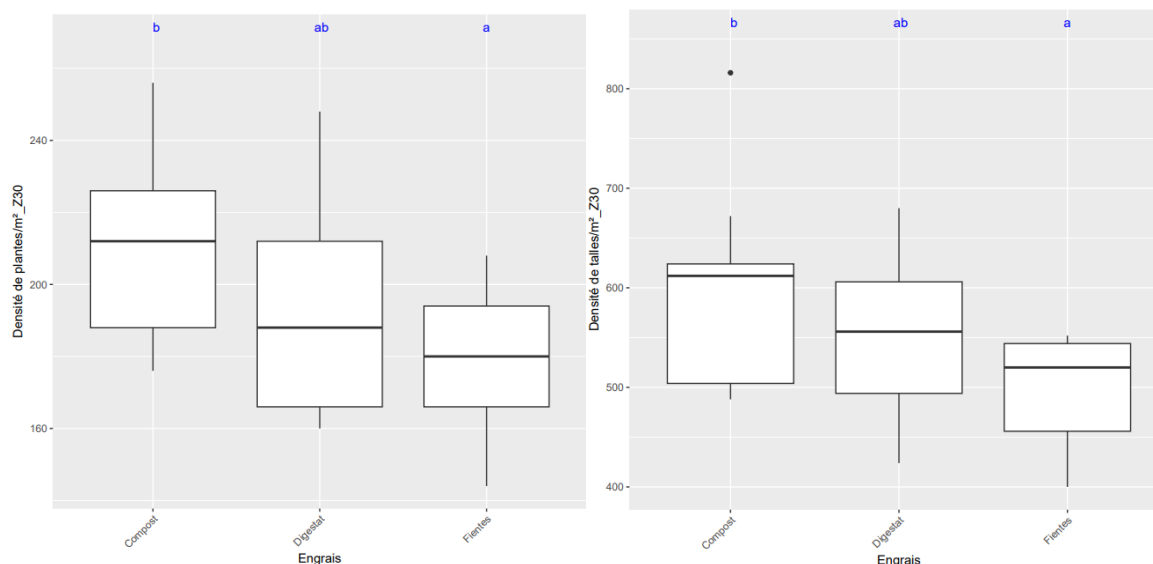


Figure 25 : Boxplots au stade redressement selon les modalités d'engrais pour la densité de plants (A) et la densité de talles (B).

Cette différence significative s'illustre également pour la densité de talles où l'on retrouve la même hiérarchie entre les trois engrais organiques comme le montre le point B de la figure 25. Le compost possède une densité de 597 talles au mètre carré tandis que les fientes présentent une densité de 495 talles, soit une différence de 100 talles/m². Il est à noter que la mesure de densités de talles et de plants au stade tallage a été réalisée trois semaines après la première application d'engrais.

En revanche, la densité de talles mesurée au **stade dernière feuille** présente des différences significatives selon le facteur traitement, illustrée par le point A de la figure 26. Cette mesure fut réalisée une semaine après la troisième application d'engrais.

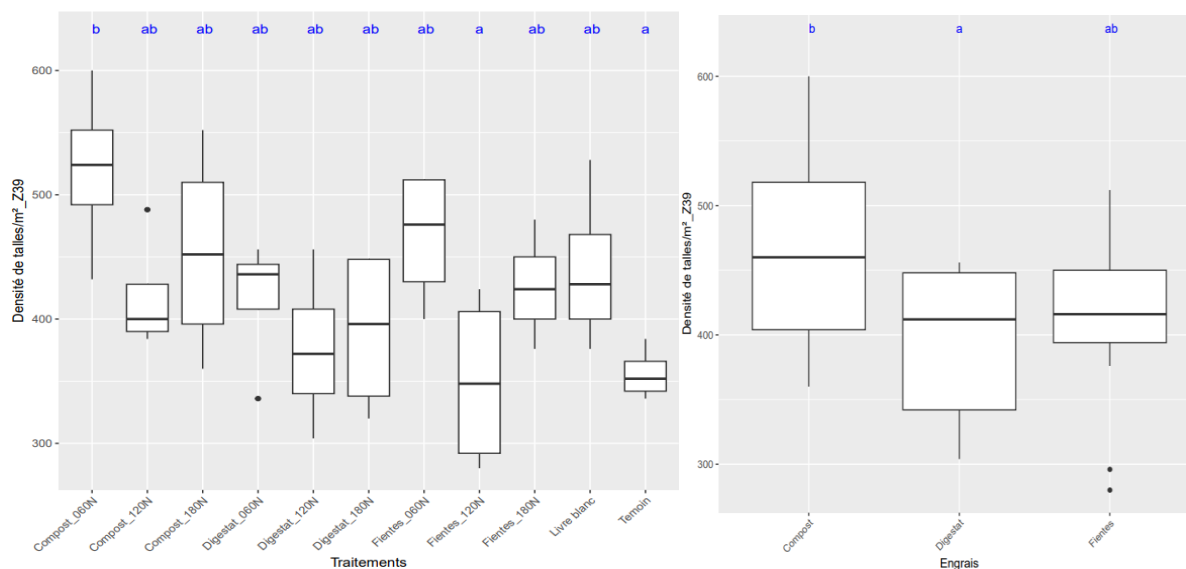


Figure 26 : Boxplots de la densité de tiges au stade dernière feuille selon les modalités de traitements (A) et selon les engrais organiques (B).

Deux groupes s'opposent selon le facteur traitement, il s'agit du compost 60N pour le premier groupe, le témoin et les fientes 180N pour le second groupe, représentant respectivement la densité la plus élevée (b) et la plus faible (a). Les autres modalités de traitements (ab), ayant une densité intermédiaire, se trouvent dans le même groupe statistique que le compost 60N et le témoin. Les doses organiques de 60N, pour les trois engrais, présentent une meilleure densité de tiges, surpassant toutes les trois le livre blanc.

Ensuite, la dose organique 180N pour les trois engrais montrent une meilleure densité que la dose 120N. Ces observations sont également démontrées par l'analyse du facteur dose organique où des différences hautement significatives sont présentes sur cette variable (annexe E).

Le point B de la figure 26 illustre également des différences significatives pour le facteur engrais où le digestat possède la meilleure densité de tiges.

La densité d'épis à **maturité (Z89)** ne présente aucune différence statistique selon le facteur traitement même si des similarités apparaissent entre les trois modalités de compost et le livre blanc. Les modalités du digestat et des fientes montrent un nivellement de la densité d'épis vers le bas en fonction de l'augmentation de la dose organique. En outre, les modalités 180N pour ces deux engrais présentent une tendance similaire au témoin.

Concernant l'analyse à deux facteurs, aucune différence significative n'est démontrée par le facteur dose organique.

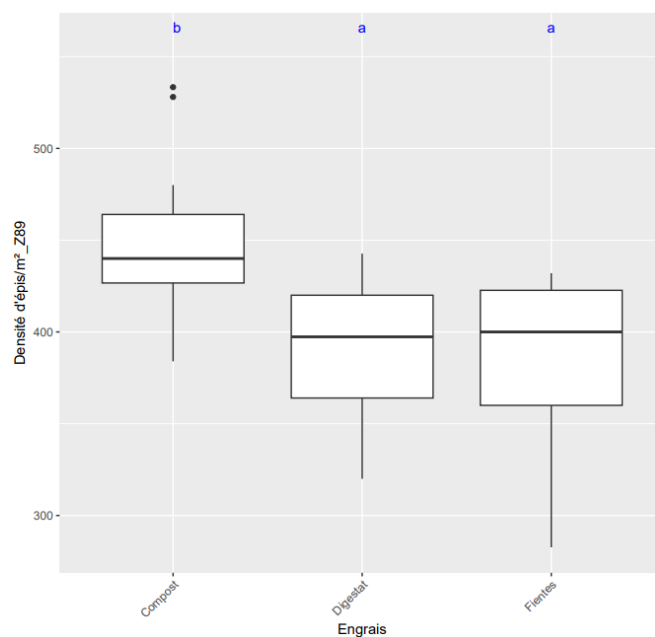


Figure 27 : Boxplots de la densité d'épis au stade maturité selon les modalités d'engrais organiques.

En revanche, concernant le facteur engrais, comme illustrée par la figure 27, le compost présente une différence significative par rapport au digestat et aux fientes, démontrant une densité d'épis plus élevée au stade maturité avec une moyenne de 450 épis/m². Le digestat et les fientes présentent quant à elles respectivement une densité moyenne de 391 et 382 épis/m².

b) La fertilité des épis

La fertilité ainsi que la densité des épis permettent d'expliquer l'élaboration du nombre de grains par mètre carré. Ayant déjà parlé de la mise en place de la densité d'épis au point précédent, seule la fertilité des épis sera abordée dans cette partie.

L'élaboration de cette composante se déroule en pré-floraison, c'est-à-dire entre le stade Z55 et Z65. Aucune mesure n'étant prise au stade Z55, les valeurs de biomasses relevées aux stades de dernière feuille (Z39) et mi-floraison (Z65) sont donc analysées.

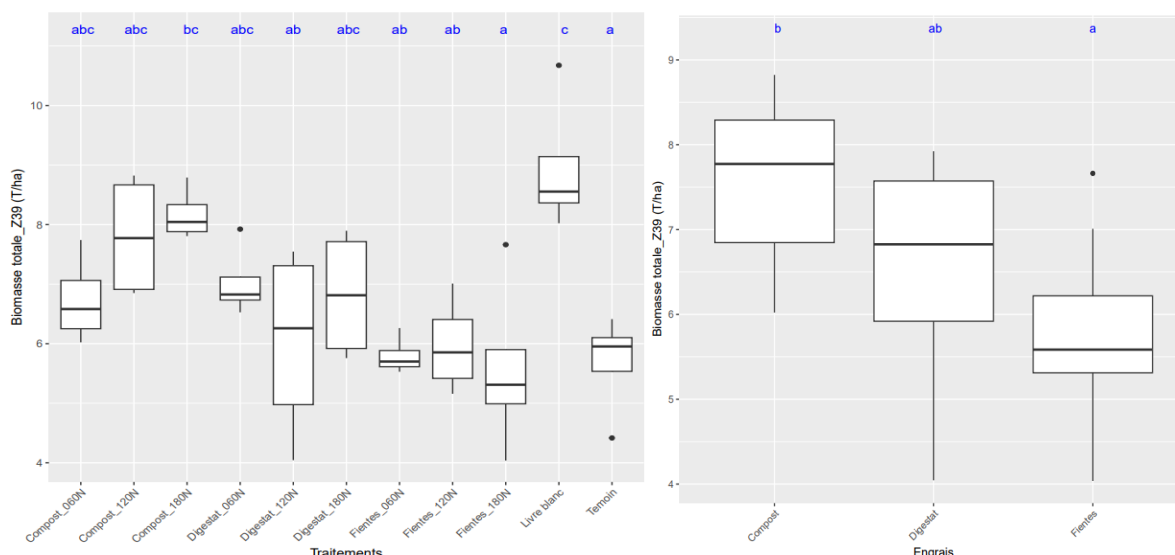


Figure 28 : Boxplots de la biomasse totale au stade dernière feuille selon les modalités de traitements (A) et selon les engrais organiques (B).

La biomasse totale au **stade dernière feuille (Z39)** présentée par le point A de la figure 28, renseigne une différence très hautement significative selon le facteur traitement. Le témoin azoté possède la biomasse la plus élevée (8,95 T/ha) suivie par le compost 180N (8,17 T/ha). Un troisième groupe composé du compost 60N, du compost 120N, du digestat 60N et du digestat 180N, fait partie à la fois des deux premières modalités citées ainsi que du dernier groupe (fientes 180N et témoin).

Concernant le facteur engrais, le point B de la figure 28 démontre également une différence très hautement significative où l'on retrouve en tête le compost, suivie du digestat et en dernier lieu les fientes de poules. Le facteur dose organique ne présente aucune différence significative.

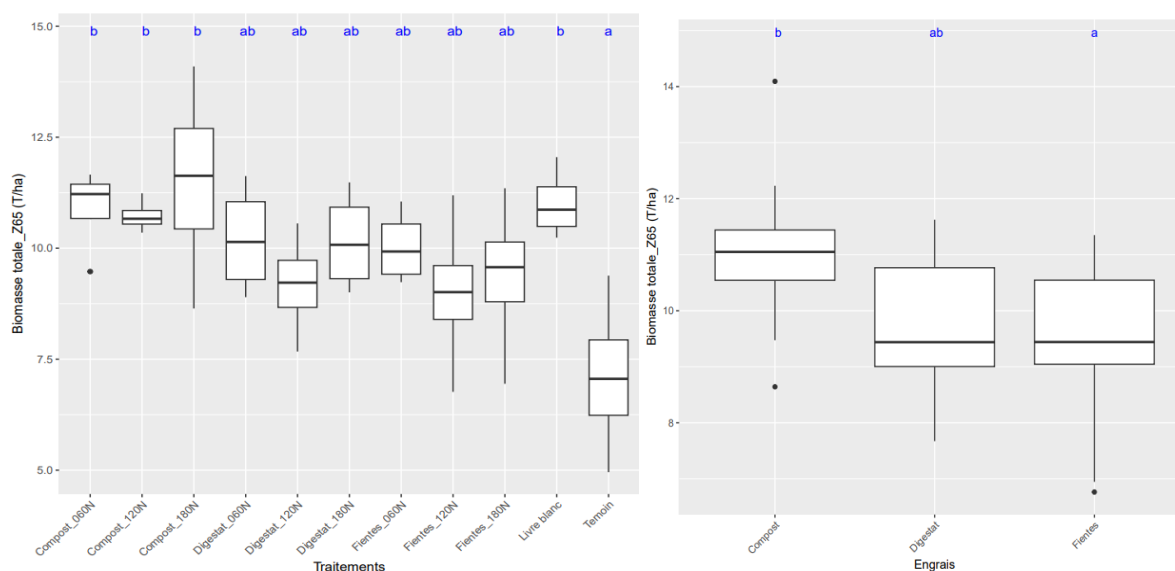


Figure 29 : Boxplots de la biomasse totale au stade mi-floraison selon les modalités de traitements (A) et selon les engrais organiques (B).

La biomasse totale au **stade mi-floraison (Z65)** illustrée par le biais du point A de la figure 29 selon le facteur traitement, montre des différences très hautement significatives. Le premier groupe, possédant une biomasse élevée, est composé des trois modalités de compost ainsi que

du livre blanc. La modalité la plus élevée est le compost 180N avec une biomasse moyenne de 11,50 T/ha suivie du livre blanc (11,01 T/ha). A contrario, le témoin possède la biomasse la plus faible (7,11 T/ha). Les autres modalités de traitement sont présentes à la fois dans le premier groupe et dans le groupe du témoin.

Le point B de la figure 29 illustre la même hiérarchie entre les engrais organiques que celle retrouvée au stade dernière feuille, le compost étant l'engrais présentant la meilleure biomasse. Le facteur dose organique ne présente aucune différence statistique.

c) Le poids de mille grains

L'élaboration du poids de mille grains se déroule lors de la phase reproductive du froment d'hiver, c'est-à-dire à partir du stade mi-floraison jusqu'au stade maturité. Les variables permettant d'expliquer cette composante sont les biomasses prélevées lors de ces deux stades. La première biomasse étant abordée au point précédent, uniquement celle du stade maturité sera traitée dans cette partie.

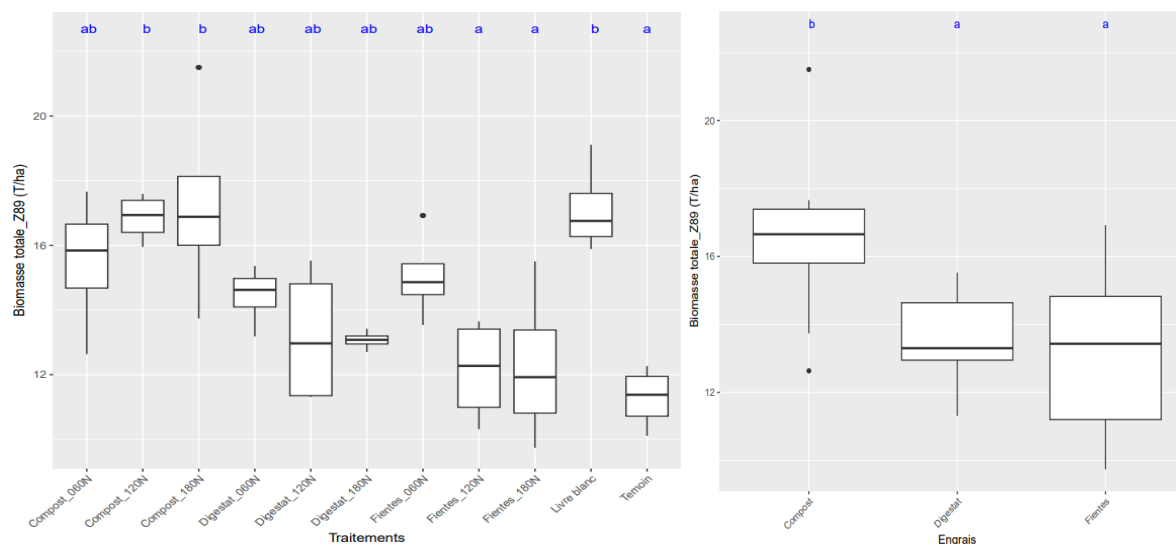


Figure 30 : Boxplots de la biomasse totale au stade maturité selon les modalités de traitements (A) et selon les engrais organiques (B).

Par le biais du point A la figure 30 et selon le facteur traitement deux groupes statistiques se présentent. Le premier groupe est composé du compost 120N, compost 180N, et du livre blanc. Le second groupe est constitué du témoin et des fientes 120N et 180N. Les autres modalités appartiennent à la fois au premier et second groupe. Le point B de la figure 30 démontre une différence significative concernant le facteur engrais. Le compost présente la biomasse la plus élevée (16,5 T/ha), le digestat et les fientes possèdent la biomasse la plus faible avec une biomasse moyenne respective de 13,6 T/ha et 13, T/ha. Aucune différence statistique n'est démontrée par le facteur dose organique.

Ensuite, l'analyse ANOVA réalisée selon les 10 modalités de traitements (voir point 4.4.2) présente trois groupes statistiques comme illustré par la figure 31 ci-dessous.

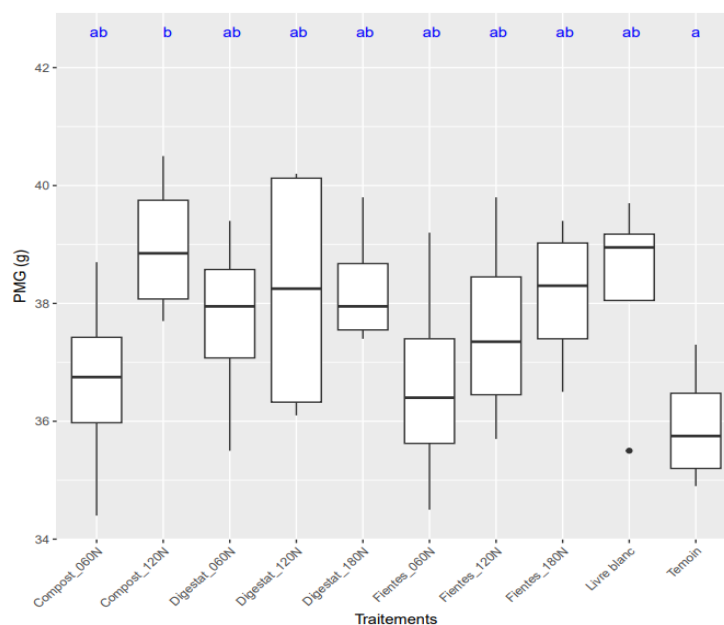


Figure 31 : Boxplots du PMG selon les 10 modalités de traitements.

Le PMG présente des différences hautement significatives pour les 11 modalités du facteur traitement. Le compost 120N présente le PMG moyen le plus élevé (b) tandis que le témoin présente le PMG le plus faible (a). Toutes les autres modalités se trouvent dans le même groupe statistique (ab) que le compost 120N ainsi que celui du témoin.

Suite à une erreur dans le protocole, le facteur, la modalité 180N du facteur dose organique fut retirée de la base de données et n'a pas eu être analysée.

Ensuite, la dose organique 180N fut retirée du jeu de données suite à l'erreur dans le protocole afin de réaliser une analyse à deux facteurs. Aucune différence statistique n'apparaît pour le facteur engrais. Néanmoins, concernant le facteur dose organique, celui-ci présente des différences très hautement significatives. En effet, la dose organique de 120N présente un PMG supérieur à la dose organique de 60N (voir annexe E).

6.5. Teneur en azote dans le sol

Le point suivant présente l'évolution de la teneur en azote, sous forme nitrates, contenue dans les différents horizons de sol, illustrée par la figure 32, sur une période allant du mois de mars jusqu'au mois d'août. Les valeurs des teneurs en NO_3 pour les 11 modalités de traitement figurent à l'annexe C.

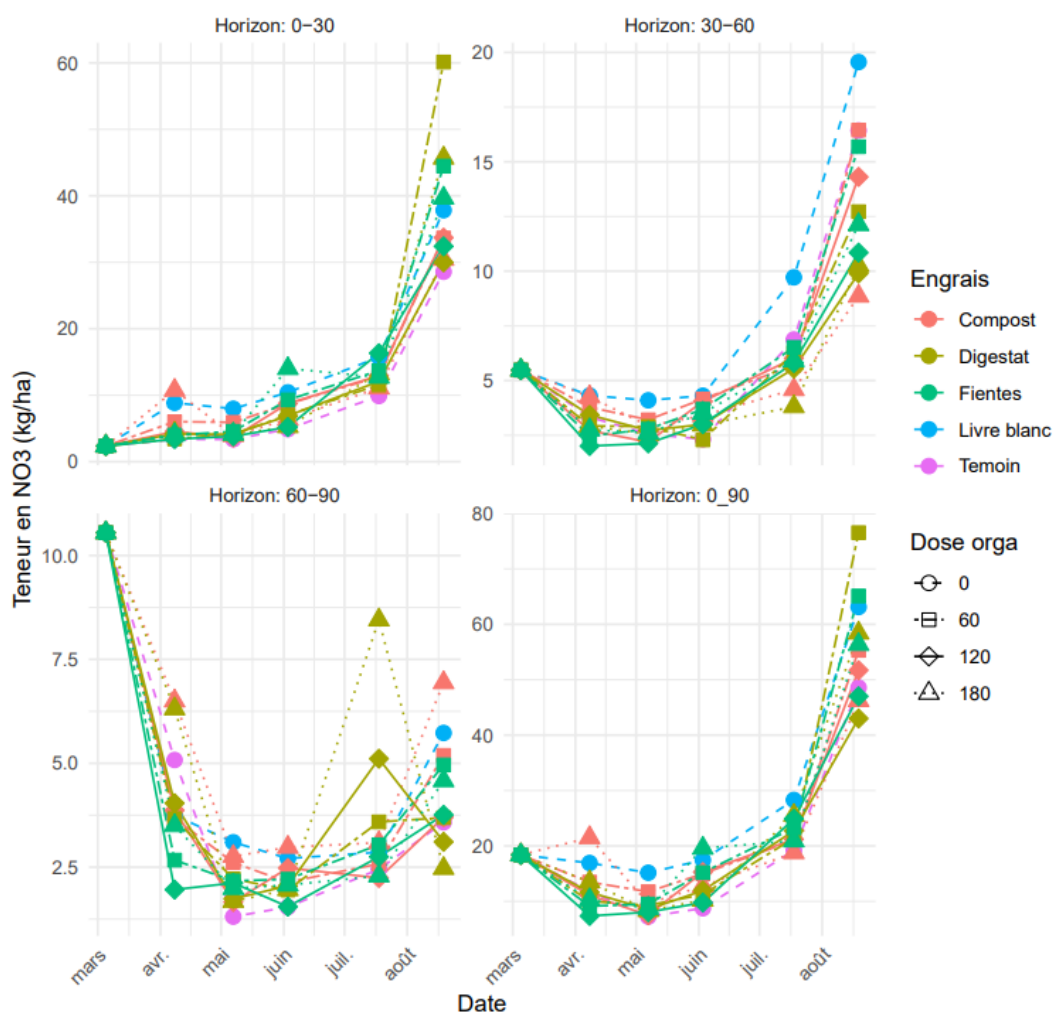


Figure 32 : Courbes d'évolution de la teneur en nitrates dans l'horizon 0-30 (A), horizon 30-60 (B), horizon 60-90 (C) et l'horizon 0-90 (D) du sol. Les échelles diffèrent selon les points (A, B, C, D).

L'horizon 0-30 est présenté par le point A de la figure 32. La tendance de ces courbes, est une légère augmentation tout au long de la période culturale et une forte croissance en post-récolte. Cette figure met également en évidence une concentration légèrement plus élevée en nitrates après la première application d'engrais pour l'objet compost 180N suivi du livre blanc et du compost 60N. Lors de la troisième application d'engrais, les fientes 180N présentent la teneur la plus élevée en NO₃ suivie du livre blanc et des fientes 120N. A la récolte, les fientes 120N possèdent la teneur la plus importante. Un mois après la moisson, l'ordre décroissant des traitements ayant la teneur la plus élevée est le suivant : digestat 60N, digestat 180N, fientes 60N, fientes 180N et livre blanc. Il est à noter que le livre blanc montre une teneur élevée en nitrates jusqu'à la moisson et le témoin possède la teneur la plus faible sur toute la période de prélèvement.

L'horizon 30-60 est illustré par le point B de la figure 32. Toutes les courbes sont dégressives et connaissent une croissance à partir de mi-juin. Le livre blanc possède la teneur la plus élevée lors de la période culturale, montrant un écart important lors de la récolte et un mois après celle-ci. Les trois modalités de fientes présentent des teneurs basses en NO₃ jusqu'à la récolte mais grimpent un mois après celle-ci. Il est à noter, qu'au moment de la récolte, tous les engrais organiques possèdent une teneur en NO₃ plus faible que celle du témoin. Il est en de même pour

le mois août où seul le compost 60N, parmi les engrais organiques, possède une teneur supérieure au témoin. Lors de cette période, les fientes présentent une teneur plus élevée que le digestat. Le compost 180N possède la valeur la plus faible.

L'horizon 60-90 est démontré par le biais du **point C** de la figure 32. Une décroissance des teneurs en NO_3 est observée suivie d'une augmentation élevée à l'été. Un mois après la première application d'engrais, le digestat 180N et le compost 180N possèdent les teneurs les plus importantes. Lors de la récolte, les trois digestats possèdent les plus grandes teneurs en NO_3 par ordre croissant de dose organique et ces modalités vont, par la suite, chuter. Ainsi, le digestat 180N et le digestat 120N présentent les teneurs les plus basses qui sont même inférieures à celles du témoin. En août, les teneurs les plus élevées retrouvées sont le compost 180N, le livre blanc, compost 60N, fientes 60N, fientes 180N, fientes 120N. Il est important de souligner que l'échelle décrite pour cet horizon présente des valeurs faibles en nitrates.

Enfin, **l'horizon 0-90** est illustré par le point D de la figure 32. Cet horizon présente également une décroissance suivie d'une augmentation en NO_3 à partir du mois de juin. Le livre blanc présente une teneur élevée sur la période de prélèvements. Le compost 180N possède la teneur la plus grande après la première application et les fientes 180N celle après la dernière application d'engrais. Un mois après la récolte, le digestat 60N présente la teneur la plus importante en NO_3 suivie des fientes 60N, livre blanc, digestat 180N, fientes 180N, compost 60N et compost 120N. Lors de cette période trois modalités possèdent une valeur inférieure à celle du témoin : les fientes 120N, le compost 180N et le digestat 180N.

7. Discussion

7.1. Le rendement

Tout d'abord, les modalités présentant le meilleur rendement sont les suivantes : le livre blanc, les trois modalités de compost et le digestat 60N. Ces rendements s'expliquent par le fait que ces modalités ont favorisé le développement d'une densité de talles élevée, permettant une mise en place optimale de l'appareil photosynthétique ainsi qu'un bon développement de l'épi. En effet, ces développements permettent d'assurer une densité de nombre de grains et de fertilité d'épis optimales (Gate, 1995; Livre Blanc Céréales, 2023). Les résultats de l'essai ont montré effectivement une corrélation forte entre ces deux composantes et le rendement.

Une densité élevée de talles induit une densité élevée d'épis, influençant ainsi favorablement la densité de grains. Cependant, un excès de talles peut induire un taux de régression plus important suite aux phénomènes de compétitions entre les plantes et les ressources (Gate, 1995). Dès lors, il est recommandé de rechercher une densité d'épis comprise entre 400 et 500 épis/m² pour que la culture puisse développer pleinement son potentiel de rendement et d'éviter également le phénomène de concurrence (Livre Blanc Céréales, 2023). Les cinq modalités présentant des rendements élevés avaient une densité d'épis plus importante, qui était comprise entre 403 (pour le digestat 60N) et 465 épis (pour le compost 180N). Tandis que les modalités ayant une faible densité d'épis, avaient une densité comprise entre 361 (fientes 180N) et 385 (témoin) épis/m².

Ensuite, concernant la composante fertilité des épis, celle-ci s'élabore jusqu'au stade mi-floraison via l'évolution de la biomasse totale entre le stade dernière feuille et le stade précédemment cité. Cinq modalités (digestat 60N, les trois de compost et le livre blanc) présentent des biomasses élevées à ces stades. Des biomasses élevées indiquent que la plante est non carencée en azote et qu'elle se développe de manière optimale permettant donc un développement optimal de la taille de l'épi. Une taille élevée de l'épi induit ainsi un plus grand nombre de grains par épis et par conséquent une meilleure fertilité de ce dernier (Gate, 1995). De plus, l'avant-dernière feuille et la dernière feuille accumulent l'azote via la photosynthèse et ce sont ces deux organes qui remobilisent majoritairement l'azote contenu dans le grain (Gate, 1995; Taulemesse, 2015). Ainsi, une remobilisation optimale de l'azote dans le grain s'est déroulée grâce aux biomasses élevées de ces modalités.

Enfin, le rendement peut être expliqué par la mise en place de l'appareil reproducteur lors du stade mi-floraison (Z65) au stade maturité (Z89). Le PMG s'élabore durant cette phase via l'évolution de la biomasse à ces stades respectifs. Le livre blanc et les modalités de 120N et de 180N de compost possèdent la biomasse la plus élevée à maturité. Cependant l'analyse du PMG démontre que le PMG le plus élevé est obtenu par le compost 120N (39,0 g) suivi du livre blanc (38,3 g). Néanmoins, la corrélation entre le PMG et rendement montre un coefficient peu élevé ($R^2 = 0,22$) donc le PMG influence peu le rendement. C'est pourquoi, des faibles rendements comme le témoin non azoté peuvent être liés à poids de mille grains élevés. Cela est en

cohérence avec les références suivantes (Lenoir et al., 2023; Slafer et al., 2022) qui expliquent qu'une corrélation négative existe entre le PMG et le rendement.

Par ailleurs, il est important de souligner que le rendement de cette année est inférieur aux rendements des années antérieures. En effet, la fumure classique de 180N d'ammonitrate obtient habituellement un rendement élevé, compris entre 10,5 et 11T/ha pour cette variété (Livre Blanc Céréales, 2024c). Or le rendement moyen de cette année est de 8,16 T/ha, soit une baisse de 3 T/ha. Cette perte de rendement s'explique essentiellement par des conditions climatiques humides en cours de végétation, lors de la floraison et du remplissage expliquant la petite taille des grains. Différentes maladies très présentes cette année, notamment la septoriose sur feuilles et la fusariose sur les épis, ont fortement pénalisé le potentiel de rendement de la culture (Arvalis, 2024b; Livre Blanc Céréales, 2024c).

Effectivement, la courbe de dilution de l'azote réalisée au stade mi-floraison (voir annexe D) montre que les 11 objets de traitement sont en carence azotée permettant aussi d'expliquer les faibles rendements obtenus pour cette année.

7.2. La teneur en protéines

Un groupe statistique, significativement différent des autres modalités, présente la meilleure teneur en protéines et il est composé de trois modalités. Il s'agit dans l'ordre décroissant du compost 60N, fientes 60N et du livre blanc. Parmi elles, seules les première et dernières citées possèdent un rendement élevé. Les engrais organiques appliqués avec une dose de 60N organique présente une teneur élevée en protéines. Cela s'explique par le fait qu'elles ont pu bénéficier d'une dose de 120N minéral appliqué en deux fractions aux stades de redressement et de dernière feuille. Cet azote, étant directement disponible, a pu être prélevé par les plantes afin de subvenir à leur besoin. Les essais réalisés sur le compost et le digestat en 2021 et 2023 relatés par le Livre Blanc (2024), démontre également qu'une seule application d'engrais organique présente un taux élevé de protéines presque équivalent à l'application de 180N d'ammonitrate. A contrario, lorsque deux applications d'engrais organiques de 60N sont réalisées, le pourcentage en protéines est réduit.

De plus, l'azote, prélevé par la plante après le stade dernière feuille, permet d'augmenter la teneur en protéines du grain (Bogard, 2011; Gate, 1995). Par conséquent, les engrais organiques appliqués en deux fractions ont reçu de l'azote minéral appliqué au stade dernière feuille permettant ainsi de jouer en partie sur cette variable. Mais les matières organiques se sont également minéralisées au cours de la saison lorsque que les conditions furent favorables durant l'été. Ainsi, l'azote, libéré par celles-ci, a permis d'augmenter la teneur en protéines mais présentent une teneur inférieure aux doses organiques de 60N suite au manque d'azote disponible pour la plante lors des stades de tallage et de dernière feuille.

En outre, les fientes présentent la meilleure teneur en protéines malgré qu'elles possèdent une densité de talles et d'épis la plus faibles ainsi qu'un rendement inférieur par rapport au compost et au digestat.

Les faibles rendements sont en général associés à des teneurs en protéines plus élevées car il existe une relation négative entre ces deux paramètres. De plus, l'effet de dilution de l'azote est moindre lorsque la densité de grains est faible (Arvalis, 2013; Bogard, 2011).

7.3. Les engrais organiques

7.3.1. Minéralisation de l'azote organique

La minéralisation de l'azote organique dépend de plusieurs paramètres, notamment de l'humidité et de la température du sol. Les activités de minéralisation s'intensifient lorsque ces deux paramètres augmentent jusqu'à un certain seuil.

En effet, concernant la température du sol, une valeur minimale de 10°C est nécessaire à l'initiation de la minéralisation. Une température inférieure induit une minéralisation minimale, produisant en faible quantité de l'ammonium. Une température du sol comprise entre 20 et 28°C est optimale pour l'activité d'ammonification et de nitrification relarguant ainsi des quantités importantes d'azote (Cannavo et al., 2020; N'Dayegamive, 2007). La température moyenne enregistrée au printemps 2024 était de 11,6°C soit un degré de plus que la normale de saison. Ainsi, comme mentionné par N'Dayegamive (2007), sous un climat tempéré froid à humidité constante et lorsque le sol n'est pas travaillé, les pics de minéralisation se produiront en juillet et août lorsque les températures seront plus élevées. Dès lors, une culture comme le blé tendre ne bénéficiera pas de manière importante de l'azote minéralisé. L'évolution de la teneur en nitrates dans les horizons de sol réalisée dans l'essai démontre également des teneurs élevées à l'été pour les trois engrais organiques. Effectivement, l'été 2024 fut caractérisé comme étant plus chaud que la normale malgré un mois de juin plus frais, expliquant donc les pics de minéralisation retrouvés dans le sol.

Ensuite, à propos de l'humidité, les micro-organismes ont besoin d'eau afin de dégrader la matière organique. Une humidité optimale est estimée à 60% (Amin, 2012). Lorsque cette valeur est trop élevée, le processus de minéralisation est entravé par la création de condition anaérobie, réduisant ainsi la teneur en oxygène dans les agrégats du sol dont bénéficient les micro-organismes (Cannavo et al., 2020; N'Dayegamive, 2007).

La période culturale fut caractérisée par une précipitation abondante. Effectivement, le cumul des précipitations du printemps et de l'été a établi un nouveau record de 609 mm par rapport à la normale. Par conséquent, les conditions d'humidité et de température lors de l'expérimentation furent néfastes à la dégradation des matières organiques donc l'azote organique n'a pu être minéralisé et assimilé par le froment.

7.3.2. Le compost

Les trois modalités de compost ont présenté des valeurs élevées, similaire au livre blanc, concernant les densités de talles, les biomasses totales, la densité d'épis, le rendement ainsi que le pourcentage en protéines. Ces trois modalités présentaient d'ailleurs les meilleures valeurs

par rapport aux engrais organiques. En effet, le compost possède la teneur la plus élevée en azote sous forme ammoniacale avec une concentration environ 30 fois supérieure à celle du digestat et près de quatre fois supérieure que les fientes (voir point 4.5.4). Cet azote peut être directement disponible pour les plantes et être assimilé par ces dernières. Le compost est enrichi par de l'azote ammoniacale provenant de vinasse de chicorées. De plus, une étude réalisée par le centre pilote (CPL-Végémar) dans des conditions pédologiques similaires et avec précédent culturale identique a été effectuée sur le froment en testant différents engrais organiques en agriculture biologique. De la vinasse ainsi que du digestat et du fumier de poules furent utilisés. La dose appliquée était de 80N en une seule fraction au tallage. Il en ressort de cette étude que la vinasse présentait un rendement moyen élevé (9,2 T/ha) tandis que le fumier de poule et le digestat montraient des rendements moyens plus faibles, valant 7,9 T/ha pour ces deux engrais (CPL-Végémar, 2020).

Les besoins de la plante ont donc été satisfaits au stade de tallage, de redressement et de dernière feuille. Par conséquent, la densité de talles et d'épis élevée ont permis d'assurer de manière efficiente un nombre de grains/m². La mise en place de l'appareil photosynthétique et du développement de la taille l'épi s'est déroulée de manière optimale permettant d'engendrer une remobilisation et un nombre de grains/épis efficaces (Gate, 1995; Livre Blanc Céréales, 2023).

Il est à noter que les doses 60N et 180N de compost présentent des valeurs de rendement supérieures au compost 120N. Ces doses montrent également une densité de talles plus importante que le livre blanc. Néanmoins, ce dernier présente un rendement supérieur mais non significatif par rapport aux trois modalités de compost. Cela peut s'expliquer par le fait que la biomasse des feuilles (voir annexe E) au stade mi-floraison est plus élevée pour le livre blanc que les trois doses de compost. Par conséquent, le livre blanc présente un développement végétatif plus important. Etant donné que 70% de l'azote contenu dans le grain, provient de la remobilisation de l'azote réalisée par les parties végétatives (Bogard, 2011; Gate, 1995; Taulemesse, 2015), la fumure du livre blanc a donc effectué une plus grande remobilisation se traduisant par un rendement supérieur.

7.3.3. *Le digestat et les fientes*

D'une part, les fientes et le digestat possèdent des teneurs beaucoup plus faibles en azote disponible que le compost. D'autre part, les conditions climatiques au printemps étaient néfastes à la minéralisation de l'azote organique contenu dans ces matières. Ce processus s'est dès lors accentué durant le début de l'été lorsque les conditions furent meilleures et l'azote fut donc disponible trop tardivement pour la plante (N'Dayegamive, 2007). Cela se confirme par la visualisation de la teneur en nitrates dans le sol qui est faible et équivalente à celle du témoin non azoté jusqu'au mois de juin. Les besoins de la plante n'ont par conséquent pas été satisfaits durant le printemps et cette dernière a donc présenté une carence azotée. Effectivement, la courbe de dilution de l'azote réalisée au stade mi-floraison (voir annexe D) confirme la carence azotée pour les 11 modalités de traitement.

Dès lors, l'azote libéré par la minéralisation fut seulement disponible durant l'été soit bien après la mise en place de l'appareil végétatif et photosynthétique. Cela se traduit par des faibles

densités de talles, d'épis et de biomasses, résultant par conséquent par de faibles rendements (Gate, 1995; Livre Blanc Céréales, 2017b; Taulemesse, 2015).

7.4. La dose organique

La **dose organique de 60N** montre un rendement significativement plus élevé par rapport aux modalités 120N et 180N. La dose organique 60N signifie que cette quantité d'azote organique a été appliquée au stade de tallage. Ensuite, deux apports de 60N d'engrais minéral ont été effectués au stade de redressement et de dernière feuille. Les besoins les plus conséquents de la plante apparaissent au stade redressement afin d'établir l'appareil photosynthétique et le développement de l'épi (Gate, 1995; Livre Blanc Céréales, 2017b). En outre, une carence azotée à ce stade provoque un taux de régression des talles plus élevée (Gate, 1995). Ainsi, un apport d'ammonitrate au stade redressement a été réalisé pour la modalité 60N, comblant par conséquent le besoin de la plante. De plus, une seconde fraction d'ammonitrate au stade dernière feuille a été effectuée permettant d'influencer l'élaboration du nombre de grains/épis (Livre Blanc Céréales, 2017b). Les besoins étant comblés, le froment a par conséquent établi via un apport organique de 60N, un rendement plus élevé.

Concernant la **dose organique 120N**, l'apport minéral au stade dernière feuille a influencé le nombre de grains/épis mais n'a pas su combler l'état de carence de la plante, se traduisant par de faibles rendements.

De plus, vu les conditions climatiques printanières néfastes à la minéralisation, cette dose **organique de 120N et celle de 180N** n'ont pu répondre aux besoins de la plante. C'est pourquoi, la plante étant en carence, n'a pu établir de manière efficiente le développement de l'épis, de l'appareil photosynthétique et du nombre de grains/épis. Ainsi, de faibles rendements sont obtenus par ces doses organiques.

7.5. Teneur en azote dans le sol

Les 11 objets de traitement présentent des teneurs faibles dans l'horizon 0-90 jusqu'au mois de juin. A partir de l'été, suite à la minéralisation de l'azote organique, le profil s'enrichit pour finalement atteindre un pic au mois d'août. Les concentrations élevées en NO_3 se situent majoritairement dans l'horizon 0-30. Les teneurs dans les horizons 30-60 et 60-90 sont relativement faibles. Le risque de lixiviation est minime concernant ces deux horizons. En revanche, ce risque est plus élevé dans l'horizon 0-30 durant l'été suite à la teneur importante en nitrates pour toutes les modalités de traitement. Dès lors, l'implantation d'une CIPAN (culture intercalaire piège à nitrates) après la récolte s'avère nécessaire afin d'éviter ce (Protect'eau, 2017).

La fumure livre blanc présente un taux légèrement plus élevé de nitrates lors de la période culturale, illustrée notamment dans l'horizon 30-60. Cela s'explique par le fait qu'il est composé d'azote directement disponible sous forme nitrates et ammoniacales. Il est par conséquent plus sujet à la lixiviation que les engrais organiques. Cela se démontre également

dans l'horizon 0-90 où les doses organiques 60N du digestat et des fientes présentent un taux élevé de nitrates au mois d'août. Ces doses ont en effet reçu 120N d'ammonitrate.

Dans l'horizon 60-90 durant le mois de juillet, les trois modalités de digestat ont une teneur légèrement supérieure en NO_3 par rapport aux autres modalités. Cela pourrait s'expliquer par la minéralisation de l'azote organique qui a libéré une plus grande quantité d'azote directement disponible. Ces trois modalités de digestat possèdent une faible densité de talles. Il est possible que trop d'azote soit disponible pour la densité de plantes présentes. Elles n'ont par conséquent pas su tout assimiler, expliquant une teneur plus élevée dans cet horizon.

Une autre perte d'azote a pu s'effectuer par dénitrification. En effet, lorsque les sols sont saturés en eau, comme ce fut le cas en hiver et au printemps, les conditions deviennent alors anaérobiques. Les organismes anaérobiques vont alors obtenir leur oxygène à partir de NO_3^- et NO_2 pour réaliser la dénitrification et ainsi libérer l'azote sous forme de gaz de type NO ou N_2O (Cameron et al., 2012; Havlin et al., 2017). Cependant, ce phénomène n'a pu être quantifié au cours de l'expérimentation.

8. Conclusion et perspectives

En conclusion, le meilleur rendement obtenu lors de cette expérimentation est le témoin azoté (180N ammonitrate). Le meilleur rendement organique est le compost 60N suivi du compost 180N, du compost 60N et du digestat 60N. Ces quatre modalités ne présentent pas de différences significatives par rapport à la fumure classique du livre blanc.

La dose organique de 60N est la plus efficiente en termes de rendements car elle bénéficie d'un apport de 120N d'ammonitrate qui permet de satisfaire les besoins de la plante, notamment au stade redressement, stade crucial afin d'obtenir des rendements corrects.

Le compost amène à un meilleur rendement que le digestat et les fientes de poules car il est composé en quantité plus conséquentes d'azote sous forme ammoniacale directement disponible et assimilable par la plante. En effet, il est enrichi à base de vinasse de chicorées contenant cet azote.

Suite aux conditions climatiques froides du printemps ainsi qu'une pluviométrie abondante et en excès par rapport à la normale, la minéralisation de l'azote organique fut minime durant cette période. Celle-ci s'est déroulée début juin, dès que les conditions furent propices. Suite à la faible minéralisation, la plante a présenté des carences ne permettant pas de développer sa biomasse ni son nombre d'épis, se traduisant par des pertes de rendements.

Dès lors, l'incorporation des engrais organiques dans le sol via une houe rotative ou herse étrille permettrait d'une part d'éviter qu'ils ne se volatilisent juste après leur application (Arvalis, 2020; Resoil, 2024). D'autre part, ce travail superficiel du sol permettrait de stimuler les micro-organismes et d'accélérer la minéralisation de ces matières organiques rendant ainsi de l'azote disponible pour satisfaire aux besoins de la plante (Novalis Terra, 2020).

Une autre alternative serait l'utilisation de ces engrais pour une culture de printemps et non une céréale. En effet, le bénéfice de la minéralisation de l'azote se produit à l'été lorsque les céréales ne savent plus en bénéficier car elles arrivent à maturité et ne puisent quasiment plus d'azote (Gate, 1995). Une culture de printemps, type betteraves, pommes de terre, maïs, pourrait en bénéficier pour son développement.

En outre, il est important de souligner que l'application de ces trois engrais organiques nécessitent un matériel adapté et dépendent également des conditions climatiques durant les périodes d'épandage. En effet, si le sol n'est pas suffisamment réessuyé, l'accessibilité aux parcelles peut être complexe (Livre Blanc Céréales, 2024c).

Enfin, concernant le risque de lixiviation, la teneur en azote du sol reste relativement faible jusque fin juin pour toutes les modalités de traitement testées. A partir de l'été, la teneur en azote du sol croît considérablement pour atteindre un pic durant le mois d'août, l'azote se trouvant majoritairement dans l'horizon 0-30. Dès lors, l'implantation d'une CIPAN après la récolte s'avère nécessaire afin d'éviter une perte par lixiviation de l'azote.

9. Contribution personnelle

Ce travail de fin d'études concrétise l'aboutissement de plusieurs années d'études où j'ai pu mettre en pratique les compétences acquises durant cette formation. Ce travail m'a également permis de découvrir le métier de terrain d'un Bioingénieur.

La prise de données a été réalisée par mes soins et par l'aide de mes collègues Tfistes. Le personnel du CePiCOP et du GRENeRA m'ont également aidé respectivement pour les prélèvements de biomasses et pour les échantillons de sol.

La conduite de ce travail m'a demandé une certaine résilience et adaptabilité en fonction des conditions climatiques qui ne furent pas toujours propices pour la prise de mesures lors de la période culturale.

Certaines mesures furent fastidieuses comme le prélèvement de biomasse et le broyage des organes de la plante à 1 mm, qui m'ont demandé de nombreuses heures de travail.

De plus, les cours qui me restaient de master 1 ainsi que le stage réalisé à l'été, combinés à la prise des différentes données, m'ont demandé une grande organisation et adaptabilité.

D'autre part, la remise du travail en janvier m'a permis de collecter les données liées au rendement et de réaliser un prélèvement de sol post-récolte.

Enfin, ce mémoire m'a permis d'accroître mes compétences concernant l'analyse statistique réalisée sur RStudio. La manipulation de données ainsi que leurs analyses ont nécessité un nombre d'heures importants ainsi qu'une attention particulière. L'aide des doctorants m'a été utile.



Figure 33 : Prélèvement de biomasse réalisé par l'équipe technique du CePiCOP, les TFistes et moi-même (Photo de A.Nysten).

10. Bibliographie

- Abis, S. (2015). Le blé au cœur des enjeux géostratégiques mondiaux. *Hérodote*, 156(1), 125-137. <https://doi.org/10.3917/her.156.0125>
- Agricompost. (2024). *Agricompost, valorisation des matières organiques par compostage*. <https://agricompost.com/procedes.htm>
- Agromet. (2024). *Réseau Pameseb*. <https://agromet.be/fr/docu/infos-sur-la-spatialisation/>
- Alexander, P., Arneth, A., Henry, R., Maire, J., Rabin, S., & Rounsevell, M. D. A. (2023). High energy and fertilizer prices are more damaging than food export curtailment from Ukraine and Russia for food prices, health and the environment. *Nature Food*, 4(1), 84-95. <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00659-9>
- Ali, A., Ahmad, A., Syed, W., Khaliq, T., Asif, M., Aziz, M., & Mubeen, M. (2011). EFFECTS OF NITROGEN ON GROWTH AND YIELD COMPONENTS OF WHEAT. (REPORT). *science internationale*, 23, 331-332.
- Amin, B. A. Z. (2012). *Rôle des enzymes lignocellulolytiques dans le processus de biodégradation de résidus végétaux dans les sols : Influence de la qualité des résidus sur l'efficacité des enzymes et leur dynamique*. [UNIVERSITE DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE]. <https://www.grafiati.com/en/literature-selections/enzymes-du-sol/dissertation/>
- Arvalis. (2013). *Teneur en protéines des blés : Relever le double défi agronomique et économique*.
- Arvalis. (2020, avril 9). *Volatilisation ammoniacale—Enfouir les produits organiques rapidement après épandage*. ARVALIS. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/enfouir-les-produits-organiques-pour-limiter-les-pertes-par-volatilisation>
- Arvalis. (2022, juin 9). *Les Essentiels d'ARVALIS - Comment s'élabore le rendement des céréales à paille ?* ARVALIS. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/comment-selabore-le-rendement>
- Arvalis. (2023a). *CHEVIGNON Blé tendre : Précocité Tolérance au froid Rendement, Résultats ARVALIS*. Les Fiches ARVALIS. https://fiches.arvalis-infos.fr/fiche_variete/fiches_varietes.php?mode=fv&id_espece=001&id_variete=19552
- Arvalis. (2023b, janvier 12). *Fertilisation du blé tendre : Fractionner l'azote en trois apports*. ARVALIS. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/fractionner-lazote-en-trois-apports>
- Arvalis. (2023c, janvier 26). *Comment estimer les valeurs fertilisantes de la fumure organique ?* ARVALIS. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/integrer-les-valeurs-fertilisantes-des-produits-organiques-dans-le-plan-de-fumure>
- Arvalis. (2023d, février 1). *Fertilisation azotée des céréales : Les besoins à prendre en compte pour le calcul de la dose totale*. ARVALIS. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/fertilisation-azotee-quels-besoins-prendre-en-compte-pour-le-calcul-de-la-dose>
- Arvalis. (2024a, mars 13). *Les Vrai/Faux de la verse des céréales*. ARVALIS. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/les-vraifaux-de-la-verse-des-cereales>
- Arvalis. (2024b, septembre 5). *Récolte 2024 de blé tendre : Quelques éléments d'explications sur la baisse de rendement*. ARVALIS. <https://www.arvalis.fr/infos->

- techniques/recolte-2024-de-ble-tendre-quelques-elements-dexplications-sur-la-baisse-de
- Beral, A., Girousse, C., Le Gouis, J., Allard, V., & Slafer, G. A. (2022). Physiological bases of cultivar differences in average grain weight in wheat : Scaling down from plot to individual grain in elite material. *Field Crops Research*, 289, 108713. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108713>
- Bogard, M. (2011). *Analyse génétique et écophysologique de l'écart à la relation teneur en protéines—Rendement en grains chez le blé tendre (Triticum aestivum L.)* [Phdthesis, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II]. <https://theses.hal.science/tel-00679581>
- Bourak, K. (2018). *Selection Assistee Par Marqueurs Snp Et Etude Phenotypique Du Ble Tendre (Triticum Aestivum L.)*. <https://hdl.handle.net/20.500.11766/10174>
- Cameron, K. C., H.J. Di, & J.L. Moir. (2012). *Nitrogen losses from the soil/plant system : A review*. <https://doi.org/10.1111/aab.12014>
- Cannavo, P., Mohammed, B., Valé, M., Bresch, S., Guénon, R., & Recous, S. (2020). *Quels paramètres influencent la minéralisation de l'azote dans les substrats de culture organiques hors-sol?*
- Cassman, K. G., & Dobermann, A. (2022). Nitrogen and the future of agriculture : 20 years on. *Ambio*, 51(1), 17-24. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01526-w>
- Coskun, D., Britto, D. T., Shi, W., & Kronzucker, H. J. (2017). Nitrogen transformations in modern agriculture and the role of biological nitrification inhibition. *Nature Plants*, 3(6), 1-10. <https://doi.org/10.1038/nplants.2017.74>
- CPAR. (2024). *Méthodes d'analyses*. Le Brabant wallon. <https://www.brabantwallon.be/vivre-en-bw/agriculture-et-jardins/laboratoires-et-analyses/nos-methodes-danalyses>
- CPL-Végémar. (2020). *Essai fertilisation en agriculture biologique*. <https://centrespilotes.be/cp/vegemar/experimentation/cereales/#title-bio>
- Delcour, A., Stilmant, D., Burny, P., Rabier, F., Louppe, H., & Goffart, J.-P. (2014). État des lieux des flux céréaliers en Wallonie selon différentes filières d'utilisation. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*
- FAOSTAT. (2024). *Fertilizers by Nutrient*. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RFN>
- Gate, P. (1995). *Ecophysologie du blé : De la plante à la culture*. Lavoisier Technique et Documentation.
- Genot, M., Renneson, G., Colinet, M.-J., Goffaux, T., Cugnon, B., Toussaint, D., Buffet, & R. Oger. (2012). *Base de données sols de Requasud*.
- Gouvernement du Canada. (2012, mars 5). *La biologie du Triticum aestivum L. (blé)* [Matériel de référence]. <http://inspection.canada.ca/fr/varietes-vegetales/vegetaux-caracteres-nouveaux/demandeurs/directive-94-08/documents-biologie/triticum-aestivum>
- Grenera. (2023). *Extraction et dosage du nitrate dans les sols*.
- Havlin, J., Tisdale, S. L., Beaton, J., & Nelson, W. (2017). *Soil Fertility and Fertilizers : An Introduction to Nutrient Management* (Pearson). https://www.researchgate.net/publication/366175716_Soil_Fertility_and_Fertilizers_by_John_L_Havlin_z-liborg
- IRM. (2024a). *IRM - Automne*. KMI. <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/bilans-climatologiques/2023/herfst>

- IRM. (2024b). *IRM - Été*. IRM. <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/bilans-climatologiques/2024/zomer>
- IRM. (2024c). *IRM - Printemps*. KMI. <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/bilans-climatologiques/2024/printemps>
- IRM. (2024d). *Normales climatiques à Uccle*. KMI. <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/normales-climatiques-a-uccle/temperature/temperature-moyenne>
- Justes, E., Mary, B., Meynard, J.-M., Machet, J.-M., & Thelier-Huche, L. (1994). Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Wheat Crops. *Annals of Botany*, 74(4), 397-407. <https://doi.org/10.1006/anbo.1994.1133>
- Krietsch Boerner, L. (2019). *Industrial ammonia production emits more CO2 than any other chemical-making reaction. Chemists want to change that*. Chemical & Engineering News. <https://cen.acs.org/environment/green-chemistry/Industrial-ammonia-production-emits-CO2/97/i24>
- Lenoir, A., Slafer, G. A., Siah, A., & Dumont, B. (2023). Plasticity of wheat yield components in response to N fertilization. *European Journal of Agronomy*, 150, 126933. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126933>
- Levavasseur, F., Dorleon, G., Lashermes, G., & Houot, S. (2021). *Valeur amendante et fertilisante d'une large diversité de produits résiduels organiques en conditions contrôlées de laboratoire*.
- Levavasseur, F., & Houot, S. (2021). *Quelle valeur fertilisante azotée des produits organiques ?* 14.
- Li, T., & Gao, F. (2024). *Nitrogen fertilizer and wheat : Achieving agricultural production and sustainable development* (No. 0). Resources Economics Research Board. https://doi.org/10.50908/grb.3.0_28
- Livre Blanc Céréales. (2017a). *Echelle BBCH améliorée*.
- Livre Blanc Céréales. (2017b). *Fumures- Froment Livre Blanc Céréales*. <https://livre-blanc-cereales.be/thematiques/fumures/froment/>
- Livre Blanc Céréales. (2023). *Variétés en froment d'hiver*.
- Livre Blanc Céréales. (2024a). *La fertilisation azotée des céréales d'hiver*.
- Livre Blanc Céréales. (2024b). *Variété froment d'hiver : Chevignon*.
- Livre Blanc Céréales. (2024c, mars 26). *2024-02 Livre – Livre Blanc Céréales*. <https://livre-blanc-cereales.be/2024-02-livre/>
- Maathuis, F. J. (2009). Physiological functions of mineral macronutrients. *Current Opinion in Plant Biology*, 12(3), 250-258. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.04.003>
- Mustin, M. (1987). *Le compost : Gestion de la matière organique*. https://ulyse.univ-lorraine.fr/discovery/fulldisplay/alma991000381939705596/33UDL_INST:UDL
- N'Dayegamive, A. (2007). *La contribution en azote du sol reliée à la minéralisation de la MO : facteur climatique et régies agricoles influençant les taux de minéralisation d'azote*. Université Laval, Québec.
- Novalis Terra. (2020, février 4). Comment adapter la fertilisation à la dynamique de minéralisation de ses sols au printemps ? *Novalis Terra*. <https://novalis-terra.fr/2122-2/>
- Protect'eau. (2017). *Cultures pièges à Nitrate | PROTECT'eau*. <https://www.protecteau.be/fr/cultures-pieges-nitrate>
- Protect'eau. (2024). *FAQ - Stockage et mise aux normes | PROTECT'eau*. <https://www.protecteau.be/fr/faq-stockage-et-mise-aux-normes>

- Resoil. (2024, janvier 9). *Les engrais organiques un des piliers de l'agriculture régénérative*. <https://www.resoilag.com/blog/les-engrais-organiques-pilier-de-lagriculture-regenerative>
- Sadras, V. O., & Slafer, G. A. (2012). Environmental modulation of yield components in cereals : Heritabilities reveal a hierarchy of phenotypic plasticities. *Field Crops Research*, 127, 215-224. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.11.014>
- Slafer, G. A., García, G. A., Serrago, R. A., & Miralles, D. J. (2022). Physiological drivers of responses of grains per m² to environmental and genetic factors in wheat. *Field Crops Research*, 285, 108593. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108593>
- Soltner, D. (2005). *Les grandes productions végétales : Céréales—Plantes sarclées—Prairies* (20 éd.). Sciences et techniques agricoles.
- Statbel. (2024). *Chiffres clés de l'agriculture 2024*. <https://statbel.fgov.be/fr/nouvelles/chiffres-cles-de-lagriculture-2024>
- Statista. (2024). *Grain production worldwide by type 2023/24*. Statista. <https://www.statista.com/statistics/263977/world-grain-production-by-type/>
- Tardy, V. (2014). *Lien entre la diversité microbienne, la stabilité des communautés microbiennes et le turnover des matières organiques du sol* [Phdthesis, Université de Bourgogne]. <https://theses.hal.science/tel-01279426>
- Taulemesse, F. (2015). *Analyse écophysiological et génétique de l'absorption d'azote post-floraison chez le blé tendre (Triticum aestivum L.) en relation avec la concentration en protéines des grains*.
- WalOnMap. (2024). *WalOnMap / Géoportail de la Wallonie*. <https://geoportail.wallonie.be/walonmap#BBOX=175517.0873926587,178067.67582716892,137699.0716910876,138810.32391359206>
- Weiss, E., Zohary, D., & Hopf, M. (2012). *Domestication of Plants in the Old World—The Origin and Spread of Domesticated Plants in South-west Asia, Europe, and the Mediterranean Basin*. <https://doi.org/10.1093/acprof:osobl/9780199549061.001.0001>

11. Annexes

Annexe A : Échelle BBCH améliorée du Livre Blanc Céréales (2017a)

Échelle BBCH améliorée, les échelles individuelles (Witzenberger et al., 1989; Lancashire et al., 1991)

Échelle BBCH des stades phénologiques des céréales

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

Code et définition

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 élancement 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

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'élancement de la tige principale peut intervenir avant le stade 13, dans ce cas continuez avec le stade 21

3 Si l'élancement de la tige principale commence avant la fin du tallage alors continuez au stade 30.

Stade principal 3: élancement de la tige principale

30 début montaison: pseudo-tiges et talles dressées, début d'élancement 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

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)

Stade principal 5: sortie de l'inflorescence ou épiaison

- 51** début de l'épiaison: l'extrémité de l'inflorescence est sortie de la gaine, l'épillet supérieur est visible
- 52** 20% de l'inflorescence est sortie
- 53** 30% de l'inflorescence est sortie
- 54** 40% de l'inflorescence est sortie
- 55** mi-épiaison: 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'épiaison: l'inflorescence est complètement sortie de la gaine

Stade principal 6: floraison, anthèse

- 61** début floraison, les premières anthères sont visibles
- 65** pleine floraison, 50% des anthères sont sorties
- 69** fin floraison, tous les épillets ont fleuri, quelques anthères desséchées peuvent subsister

Stade principal 7: développement des graines

- 71** stade aqueux: les premières graines ont atteint la moitié de leur taille finale
- 73** début du stade laiteux
- 75** stade milaitieux: 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 B : Valeurs de coefficients de corrélations entre les composantes de rendement et le rendement

Le tableau suivant reprend les valeurs des différents coefficients de corrélation (présenté au point 6.3) pour chaque modalité de traitement.

Tableau 13 : Valeurs des coefficients de corrélation pour chaque modalité de traitement.

| Corrélation : Rendement VS Grains par m ² | | Corrélation : Rendement VS Nombre épis/m ² | |
|--|-------------|---|-------------|
| Traitement | Correlation | Traitement | Correlation |
| Temoin | 0.989 | Digestat_180N | 0.992 |
| Fientes_120N | 0.928 | Compost_180N | 0.915 |
| Compost_060N | 0.912 | Digestat_120N | 0.302 |
| Fientes_060N | 0.891 | Livre blanc | 0.233 |
| Digestat_060N | 0.885 | Compost_120N | 0.217 |
| Digestat_120N | 0.885 | Fientes_180N | -0.548 |
| Digestat_180N | 0.865 | Digestat_060N | -0.632 |
| Compost_120N | 0.813 | Temoin | -0.695 |
| Fientes_180N | 0.772 | Compost_060N | -0.869 |
| Livre blanc | 0.723 | Fientes_060N | -0.959 |
| | | Fientes_120N | -0.964 |
| Corrélation : Rendement VS Fertilité des épis | | Corrélation : Rendement VS PMG | |
| Traitement | Correlation | Traitement | Correlation |
| Fientes_120N | 0.989 | Temoin | 0.886 |
| Fientes_060N | 0.974 | Livre blanc | 0.443 |
| Temoin | 0.948 | Fientes_180N | 0.273 |
| Compost_060N | 0.885 | Compost_120N | 0.224 |
| Digestat_060N | 0.875 | Digestat_180N | 0.217 |
| Fientes_180N | 0.773 | Digestat_060N | -0.214 |
| Digestat_120N | 0.466 | Digestat_120N | -0.237 |
| Livre blanc | 0.228 | Fientes_120N | -0.305 |
| Compost_120N | 0.142 | Fientes_060N | -0.592 |
| Digestat_180N | -0.972 | Compost_060N | -0.752 |

Annexe C : Valeurs des reliquats azotés pour chaque modalité de traitement

Le tableau 14 ci-dessous reprend les teneurs en nitrates dans les différents de sol pour chaque modalité de traitement.

Tableau 14 : Valeur des teneurs en nitrates dans les horizons de sol

| Engrais | Horizon | NO3 kg/ha | Date | | | | | |
|---------------|---------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | | 05-03-24 | 08-04-24 | 07-05-24 | 03-06-24 | 18-07-24 | 19-08-24 |
| Compost_60N | 0-30 | | 2,35 | 6,01 | 5,92 | 8,67 | 12,77 | 33,65 |
| Compost_120N | 0-30 | | 2,35 | 4,52 | 3,64 | 8,75 | 12,94 | 33,7 |
| Compost_180N | 0-30 | | 2,35 | 10,74 | 3,94 | 6,36 | 11,09 | 30,44 |
| Digestat_60N | 0-30 | | 2,35 | 3,42 | 4,15 | 7 | 11,55 | 60,13 |
| Digestat_120N | 0-30 | | 2,35 | 4,16 | 4,12 | 6,89 | 12,07 | 29,99 |
| Digestat_180N | 0-30 | | 2,35 | 4,29 | 4,09 | 5,27 | 13,25 | 45,69 |
| Fientes_60N | 0-30 | | 2,35 | 3,99 | 4,56 | 9,29 | 13,69 | 44,46 |
| Fientes_120N | 0-30 | | 2,35 | 3,39 | 3,81 | 5,21 | 16,32 | 32,4 |
| Fientes_180N | 0-30 | | 2,35 | 4,03 | 4,15 | 14,01 | 12,71 | 39,65 |
| Livre blanc | 0-30 | | 2,35 | 8,85 | 7,96 | 10,43 | 15,72 | 37,83 |
| Temoin | 0-30 | 2,35 | 3,36 | 3,37 | 4,89 | 9,88 | 28,57 | |
| | | | | | | | | |
| Engrais | Horizon | NO3 kg/ha | Date | | | | | |
| | | | 05-03-24 | 08-04-24 | 07-05-24 | 03-06-24 | 18-07-24 | 19-08-24 |
| Compost_60N | 30-60 | | 5,48 | 3,78 | 3,21 | 4,16 | 5,7 | 16,45 |
| Compost_120N | 30-60 | | 5,48 | 2,72 | 2,19 | 4,05 | 6,02 | 14,31 |
| Compost_180N | 30-60 | | 5,48 | 4,26 | 2,93 | 3,4 | 4,59 | 8,86 |
| Digestat_60N | 30-60 | | 5,48 | 2,93 | 2,9 | 2,29 | 6,27 | 12,72 |
| Digestat_120N | 30-60 | | 5,48 | 3,43 | 2,72 | 3 | 5,55 | 9,9 |
| Digestat_180N | 30-60 | | 5,48 | 2,92 | 2,56 | 2,97 | 3,81 | 10,26 |
| Fientes_60N | 30-60 | | 5,48 | 2,47 | 2,78 | 3,69 | 6,52 | 15,69 |
| Fientes_120N | 30-60 | | 5,48 | 2,01 | 2,13 | 3,01 | 5,81 | 10,85 |
| Fientes_180N | 30-60 | | 5,48 | 2,75 | 2,61 | 3,51 | 5,91 | 12,13 |
| Livre blanc | 30-60 | | 5,48 | 4,32 | 4,1 | 4,31 | 9,72 | 19,56 |
| Temoin | 30-60 | 5,48 | 3,33 | 2,56 | 2,32 | 6,88 | 16,43 | |

| Engrais | Horizon | NO3 kg/ha | Date | | | | | |
|---------------|---------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | | 05-03-24 | 08-04-24 | 07-05-24 | 03-06-24 | 18-07-24 | 19-08-24 |
| Compost_60N | 60-90 | | 10,55 | 3,68 | 2,61 | 2,14 | 2,58 | 5,19 |
| Compost_120N | 60-90 | | 10,55 | 3,87 | 1,66 | 2,48 | 2,24 | 3,7 |
| Compost_180N | 60-90 | | 10,55 | 6,5 | 2,76 | 2,98 | 3,09 | 6,94 |
| Digestat_60N | 60-90 | | 10,55 | 3,67 | 2,22 | 1,95 | 3,59 | 3,69 |
| Digestat_120N | 60-90 | | 10,55 | 4,04 | 1,74 | 2,05 | 5,11 | 3,11 |
| Digestat_180N | 60-90 | | 10,55 | 6,31 | 1,68 | 1,96 | 8,45 | 2,47 |
| Fientes_60N | 60-90 | | 10,55 | 2,67 | 2,17 | 2,21 | 3,04 | 4,96 |
| Fientes_120N | 60-90 | | 10,55 | 1,96 | 2,12 | 1,55 | 2,75 | 3,76 |
| Fientes_180N | 60-90 | | 10,55 | 3,5 | 1,99 | 2,07 | 2,29 | 4,58 |
| Livre blanc | 60-90 | | 10,55 | 3,75 | 3,1 | 2,71 | 2,86 | 5,73 |
| Temoin | 60-90 | | 10,55 | 5,08 | 1,31 | 1,54 | 2,45 | 3,58 |
| | | | | | | | | |
| Engrais | Horizon | NO3 kg/ha | Date | | | | | |
| | | | 05-03-24 | 08-04-24 | 07-05-24 | 03-06-24 | 18-07-24 | 19-08-24 |
| Compost_60N | 0_90 | | 18,38 | 13,47 | 11,74 | 14,97 | 21,05 | 55,29 |
| Compost_120N | 0_90 | | 18,38 | 11,11 | 7,49 | 15,28 | 21,2 | 51,71 |
| Compost_180N | 0_90 | | 18,38 | 21,5 | 9,63 | 12,74 | 18,77 | 46,24 |
| Digestat_60N | 0_90 | | 18,38 | 10,02 | 9,27 | 11,24 | 21,41 | 76,54 |
| Digestat_120N | 0_90 | | 18,38 | 11,63 | 8,58 | 11,94 | 22,73 | 43 |
| Digestat_180N | 0_90 | | 18,38 | 13,52 | 8,33 | 10,2 | 25,51 | 58,42 |
| Fientes_60N | 0_90 | | 18,38 | 9,13 | 9,51 | 15,19 | 23,25 | 65,11 |
| Fientes_120N | 0_90 | | 18,38 | 7,36 | 8,06 | 9,77 | 24,88 | 47,01 |
| Fientes_180N | 0_90 | | 18,38 | 10,28 | 8,75 | 19,59 | 20,91 | 56,36 |
| Livre blanc | 0_90 | | 18,38 | 16,92 | 15,16 | 17,45 | 28,3 | 63,12 |
| Temoin | 0_90 | | 18,38 | 11,77 | 7,24 | 8,75 | 19,21 | 48,58 |

Annexe D : Courbe critique de dilution de l'azote

La courbe critique de dilution de l'azote a été au stade mi-floraison (Z65) pour l'ensemble des modalités de traitement étudiées ainsi que leurs quatre répétitions. Elle est représentée ci-dessous par la figure 34 et a été réalisée selon l'équation (3) fournie par Justes et al. (1994).

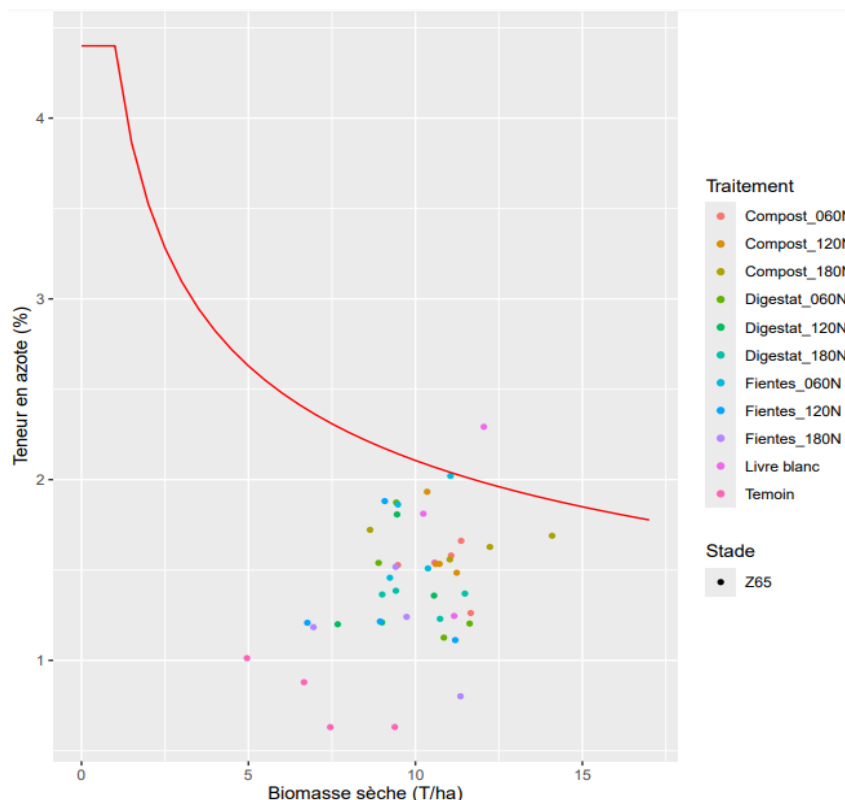


Figure 34 : Courbe de dilution critique de l'azote

Cette courbe indique que toutes les modalités de traitement sont carencées en azote hormis une parcelle de la modalité fientes 180N. Une parcelle de la fumure du livre blanc présente une consommation de luxe donc une concentration d'azote qui ne traduit plus une production de biomasse supplémentaire. De manière générale, toutes les modalités de traitement étudiées ont présenté une carence en azote lors de la période culturale, permettant d'expliquer en partie les faibles rendements obtenus.

Annexe E : Moyenne et groupe emmeans des variables non présentées

Le tableau 15 représente ci-dessous reprend les moyennes et groupes emmeans des variables qui n'ont pas été présentées précédemment selon le facteur traitement.

Tableau 15 : Moyenne et groupes emmeans des variables non présentées selon le facteur traitement

| Densité Plantes (m²) Z39 | Moyenne emmeans | | Azote (%) Epis_Z65 | Moyenne emmeans | |
|--|------------------------|---|---------------------------|------------------------|-----|
| Fientes_060N | 184 | a | Fientes_060N | 1.70 | c |
| Compost_060N | 182 | a | Livre blanc | 1.66 | bc |
| Digestat_060N | 176 | a | Compost_060N | 1.64 | bc |
| Fientes_180N | 172 | a | Compost_120N | 1.63 | bc |
| Compost_120N | 168 | a | Digestat_060N | 1.62 | bc |
| Compost_180N | 164 | a | Compost_180N | 1.61 | bc |
| Digestat_180N | 162 | a | Digestat_120N | 1.61 | bc |
| Temoin | 162 | a | Fientes_120N | 1.60 | bc |
| Digestat_120N | 160 | a | Digestat_180N | 1.51 | abc |
| Fientes_120N | 154 | a | Fientes_180N | 1.45 | ab |
| Livre blanc | 148 | a | Temoin | 1.30 | a |

| Azote (%) Tiges/Feuilles_Z65 | Moyenne emmeans | | Biomasse Tiges Z65 (T/ha) | Moyenne emmeans | | Biomasse Feuilles Z65 (T/ha) | Moyenne emmeans | |
|-------------------------------------|------------------------|----|----------------------------------|------------------------|----|-------------------------------------|------------------------|------|
| Temoin | 0.722 | a | Temoin | 4.97 | a | Temoin | 1.35 | a |
| Fientes_180N | 1.139 | ab | Fientes_120N | 5.95 | ab | Fientes_180N | 1.64 | ab |
| Digestat_180N | 1.311 | ab | Digestat_120N | 6.23 | ab | Fientes_120N | 1.72 | ab |
| Fientes_120N | 1.314 | ab | Fientes_060N | 6.37 | ab | Digestat_120N | 1.78 | abc |
| Digestat_120N | 1.360 | ab | Fientes_180N | 6.44 | ab | Digestat_180N | 1.94 | abcd |
| Digestat_060N | 1.398 | ab | Digestat_060N | 6.60 | ab | Digestat_060N | 2.13 | bcd |
| Compost_060N | 1.488 | ab | Compost_060N | 6.87 | ab | Fientes_060N | 2.16 | bcd |
| Compost_120N | 1.620 | b | Livre blanc | 6.95 | ab | Compost_120N | 2.21 | bcd |
| Compost_180N | 1.656 | b | Digestat_180N | 6.98 | ab | Compost_060N | 2.44 | cd |
| Fientes_060N | 1.710 | b | Compost_120N | 7.18 | ab | Compost_180N | 2.48 | cd |
| Livre blanc | 1.729 | b | Compost_180N | 7.51 | b | Livre blanc | 2.59 | d |

| Biomasse Epis Z65 (T/ha) | Moyenne emmeans | | Biomasse Tiges Z89 (T/ha) | Moyenne emmeans | | Biomasse Feuilles Z89 (T/ha) | Moyenne emmeans | |
|---------------------------------|------------------------|----|----------------------------------|------------------------|------|-------------------------------------|------------------------|-----|
| Temoin | 0.792 | a | Temoin | 3.78 | a | Fientes_120N | 1.20 | a |
| Digestat_120N | 1.160 | ab | Fientes_120N | 3.89 | ab | Temoin | 1.24 | a |
| Digestat_180N | 1.243 | ab | Fientes_180N | 4.00 | abc | Fientes_180N | 1.28 | ab |
| Fientes_180N | 1.286 | ab | Digestat_120N | 4.19 | abcd | Digestat_120N | 1.30 | ab |
| Fientes_120N | 1.323 | ab | Digestat_180N | 4.35 | abcd | Digestat_180N | 1.33 | ab |
| Compost_120N | 1.336 | ab | Digestat_060N | 4.51 | abcd | Digestat_060N | 1.48 | abc |
| Livre blanc | 1.467 | ab | Fientes_060N | 4.62 | abcd | Fientes_060N | 1.57 | abc |
| Digestat_060N | 1.471 | ab | Compost_060N | 4.79 | abcd | Compost_120N | 1.68 | abc |
| Compost_180N | 1.507 | b | Compost_120N | 5.22 | bcd | Compost_060N | 1.69 | abc |
| Fientes_060N | 1.509 | b | Compost_180N | 5.36 | cd | Livre blanc | 1.82 | bc |
| Compost_060N | 1.589 | b | Livre blanc | 5.42 | d | Compost_180N | 2.04 | c |

| Biomasse Epis Z89 (T/ha) | | | Moyenne emmeans | | |
|--------------------------|------|-----|-----------------|--|--|
| Temoin | 6.26 | a | | | |
| Fientes_180N | 7.00 | ab | | | |
| Fientes_120N | 7.04 | ab | | | |
| Digestat_180N | 7.38 | abc | | | |
| Digestat_120N | 7.70 | abc | | | |
| Digestat_060N | 8.46 | abc | | | |
| Fientes_060N | 8.86 | bc | | | |
| Compost_060N | 9.01 | bc | | | |
| Compost_180N | 9.85 | c | | | |
| Livre blanc | 9.89 | c | | | |
| Compost_120N | 9.96 | c | | | |

| Azote (%) Epis Z89 | | | Moyenne emmeans | | |
|--------------------|------|----|-----------------|--|--|
| Temoin | 1.22 | a | | | |
| Digestat_180N | 1.37 | ab | | | |
| Fientes_180N | 1.39 | ab | | | |
| Compost_180N | 1.59 | bc | | | |
| Compost_120N | 1.64 | c | | | |
| Digestat_120N | 1.64 | c | | | |
| Compost_060N | 1.65 | c | | | |
| Fientes_120N | 1.67 | c | | | |
| Digestat_060N | 1.68 | c | | | |
| Fientes_060N | 1.72 | c | | | |
| Livre blanc | 1.76 | c | | | |

| Azote_Z89 (%) Tiges/Feuilles | | | Moyenne emmeans | | |
|------------------------------|-------|---|-----------------|--|--|
| Temoin | 0.465 | a | | | |
| Digestat_180N | 0.537 | a | | | |
| Compost_180N | 0.628 | a | | | |
| Fientes_180N | 0.635 | a | | | |
| Digestat_120N | 0.664 | a | | | |
| Compost_060N | 0.692 | a | | | |
| Compost_120N | 0.708 | a | | | |
| Digestat_060N | 0.758 | a | | | |
| Livre blanc | 0.765 | a | | | |
| Fientes_120N | 0.813 | a | | | |
| Fientes_060N | 0.884 | a | | | |

| Azote Epis (kg/ha) | | | Moyenne emmeans | | |
|--------------------|-------|------|-----------------|--|--|
| Temoin | 76.5 | a | | | |
| Fientes_180N | 98.2 | ab | | | |
| Digestat_180N | 101.3 | ab | | | |
| Fientes_120N | 117.3 | abc | | | |
| Digestat_120N | 126.9 | abcd | | | |
| Digestat_060N | 142.5 | bcd | | | |
| Compost_060N | 148.1 | bcd | | | |
| Fientes_060N | 151.4 | bcd | | | |
| Compost_180N | 158.5 | cd | | | |
| Compost_120N | 163.3 | cd | | | |
| Livre blanc | 174.3 | d | | | |

| Grains/m² | | | Moyenne emmeans | | |
|---------------|-------|----|-----------------|--|--|
| Temoin | 9.30 | a | | | |
| Fientes_180N | 9.42 | a | | | |
| Digestat_180N | 9.56 | a | | | |
| Digestat_120N | 11.29 | b | | | |
| Compost_120N | 11.65 | bc | | | |
| Digestat_060N | 11.77 | bc | | | |
| Fientes_120N | 11.79 | bc | | | |
| Livre blanc | 12.11 | c | | | |
| Fientes_060N | 12.14 | c | | | |
| Compost_060N | 12.23 | c | | | |

| Nombre de Grains/Epis | | | Moyenne emmeans | | |
|-----------------------|-------|----|-----------------|--|--|
| Temoin | 12658 | a | | | |
| Digestat_180N | 16781 | b | | | |
| Fientes_120N | 17010 | b | | | |
| Fientes_180N | 17163 | b | | | |
| Digestat_120N | 17570 | b | | | |
| Compost_120N | 18280 | bc | | | |
| Fientes_060N | 18841 | bc | | | |
| Digestat_060N | 19544 | bc | | | |
| Compost_060N | 20808 | c | | | |
| Livre blanc | 21344 | c | | | |

| Azote Grain (kg/ha) | | | Moyenne emmeans | | |
|---------------------|-------|----|-----------------|--|--|
| Temoin | 67.8 | a | | | |
| Digestat_180N | 98.2 | b | | | |
| Fientes_180N | 98.6 | b | | | |
| Fientes_120N | 120.3 | c | | | |
| Digestat_120N | 120.7 | c | | | |
| Compost_120N | 132.7 | cd | | | |
| Fientes_060N | 133.5 | cd | | | |
| Digestat_060N | 138.3 | cd | | | |
| Compost_060N | 148.8 | de | | | |
| Livre blanc | 158.0 | e | | | |

Le tableau 16 représente ci-dessous reprend les moyennes et groupes emmeans des variables qui n'ont pas été présentées précédemment selon les facteurs engrais et dose organique.

Tableau 16 : Moyenne et groupes emmeans des variables non présentées selon les facteurs engrais et dose organique.

| Densite_Plantes_Z39 (m ²) | | | | | | Biomasse_Tiges_Z65 (T/ha) | | | | | |
|---------------------------------------|-----------------|---|----------------|-----------------|----|---------------------------|-----------------|---|----------------|-----------------|---|
| Engrais | Moyenne emmeans | | Dose Organique | Moyenne emmeans | | Engrais | Moyenne emmean | | Dose Organique | Moyenne emmeans | |
| Digestat | 166 | a | 120N | 161 | a | Fientes | 6.25 | a | 120N | 6.45 | a |
| Fientes | 170 | a | 180N | 166 | a | Digestat | 6.60 | a | 060N | 6.61 | a |
| Compost | 171 | a | 060N | 181 | a | Compost | 7.19 | a | 180N | 6.98 | a |
| Biomasse_Feuilles_Z65 (T/ha) | | | | | | Biomasse_Epis_Z65 (T/ha) | | | | | |
| Engrais | Moyenne emmeans | | Dose Organique | Moyenne emmeans | | Engrais | Moyenne emmeans | | Dose Organique | Moyenne emmeans | |
| Fientes | 1.84 | a | 120N | 1.90 | a | Digestat | 1.29 | a | 120N | 1.27 | a |
| Digestat | 1.95 | a | 180N | 2.02 | ab | Fientes | 1.37 | a | 180N | 1.35 | a |
| Compost | 2.38 | b | 060N | 2.24 | b | Compost | 1.48 | a | 060N | 1.52 | a |
| Azote_Z65_Epis (%) | | | | | | | | | | | |
| Engrais | Moyenne emmeans | | Dose Organique | Moyenne emmeans | | | | | | | |
| Digestat | 1.58 | a | 180N | 1.53 | a | | | | | | |
| Fientes | 1.59 | a | 120N | 1.61 | ab | | | | | | |
| Compost | 1.63 | a | 060N | 1.65 | b | | | | | | |
| Azote_Z65_Tiges_Feuilles (%) | | | | | | Biom_Tiges_Z89 (T/ha) | | | | | |
| Engrais | Moyenne emmeans | | Dose Organique | Moyenne emmeans | | Engrais | Moyenne emmean | | Dose Organique | Moyenne emmeans | |
| Digestat | 1.36 | a | 180N | 1.37 | a | Fientes | 4.17 | a | 120N | 4.43 | a |
| Fientes | 1.39 | a | 120N | 1.43 | a | Digestat | 4.35 | a | 180N | 4.57 | a |
| Compost | 1.59 | a | 060N | 1.53 | a | Compost | 5.12 | b | 060N | 4.64 | a |
| Biomasse_Feuilles_Z89 (T/ha) | | | | | | Biomasse_Epis_Z89 (T/ha) | | | | | |
| Engrais | Moyenne emmeans | | Dose Organique | Moyenne emmeans | | Engrais | Moyenne emmeans | | Dose Organique | Moyenne emmeans | |
| Fientes | 1.35 | a | 120N | 1.39 | a | Fientes | 4.17 | a | 120N | 4.43 | a |
| Digestat | 1.37 | a | 180N | 1.55 | a | Digestat | 4.35 | a | 180N | 4.57 | a |
| Compost | 1.81 | b | 060N | 1.58 | a | Compost | 5.12 | b | 060N | 4.64 | a |

| Azote Z89_Epis (%) | | | | | |
|--------------------|-----------------|---|----------------|-----------------|---|
| Engrais | Moyenne emmeans | | Dose Organique | Moyenne emmeans | |
| Digestat | 1.56 | a | 180N | 1.45 | a |
| Fientes | 1.59 | a | 120N | 1.65 | b |
| Compost | 1.63 | a | 060N | 1.68 | b |

| Azote dans les Epis (kg/ha) | | | | | |
|-----------------------------|-----------------|---|----------------|-----------------|----|
| Engrais | Moyenne emmeans | | Dose Organique | Moyenne emmeans | |
| Fientes | 122 | a | 180N | 119 | a |
| Digestat | 124 | a | 120N | 136 | ab |
| Compost | 157 | b | 060N | 147 | b |

| Nombre Grains/m ² | | | | | |
|------------------------------|-----------------|---|----------------|-----------------|---|
| Engrais | Moyenne emmeans | | Dose Organique | Moyenne emmeans | |
| Fientes | 17926 | a | 120N | 17620 | a |
| Digestat | 18557 | a | 060N | 19731 | b |
| Compost | 19544 | a | | | |

| Azote dans le grain (kg/ha) | | | | | |
|-----------------------------|-----------------|---|----------------|-----------------|---|
| Engrais | Moyenne emmeans | | Dose Organique | Moyenne emmeans | |
| Fientes | 127 | a | 120N | 125 | a |
| Digestat | 129 | a | 060N | 140 | b |
| Compost | 141 | b | | | |

| Azote Z89_Tiges_Feuilles (%) | | | | | |
|------------------------------|-----------------|---|----------------|-----------------|---|
| Engrais | Moyenne emmeans | | Dose Organique | Moyenne emmeans | |
| Digestat | 0.653 | a | 180N | 0.600 | a |
| Compost | 0.676 | a | 120N | 0.728 | a |
| Fientes | 0.777 | a | 060N | 0.778 | a |

| Nombre Grains/Epis | | | | | |
|--------------------|-----------------|---|----------------|-----------------|---|
| Engrais | Moyenne emmeans | | Dose Organique | Moyenne emmeans | |
| Compost | 44.7 | a | 120N | 44.9 | a |
| Fientes | 46.8 | a | 060N | 47.3 | a |
| Digestat | 46.9 | a | | | |

Annexe F : Résultats des tests de normalité et d'égalité des variances des variables : DHARMA residual

Les figures suivantes présentent les résultats des conditions d'applications, par les tests de normalité et d'égalité des variances, des variables réalisées avec le package DHARMA

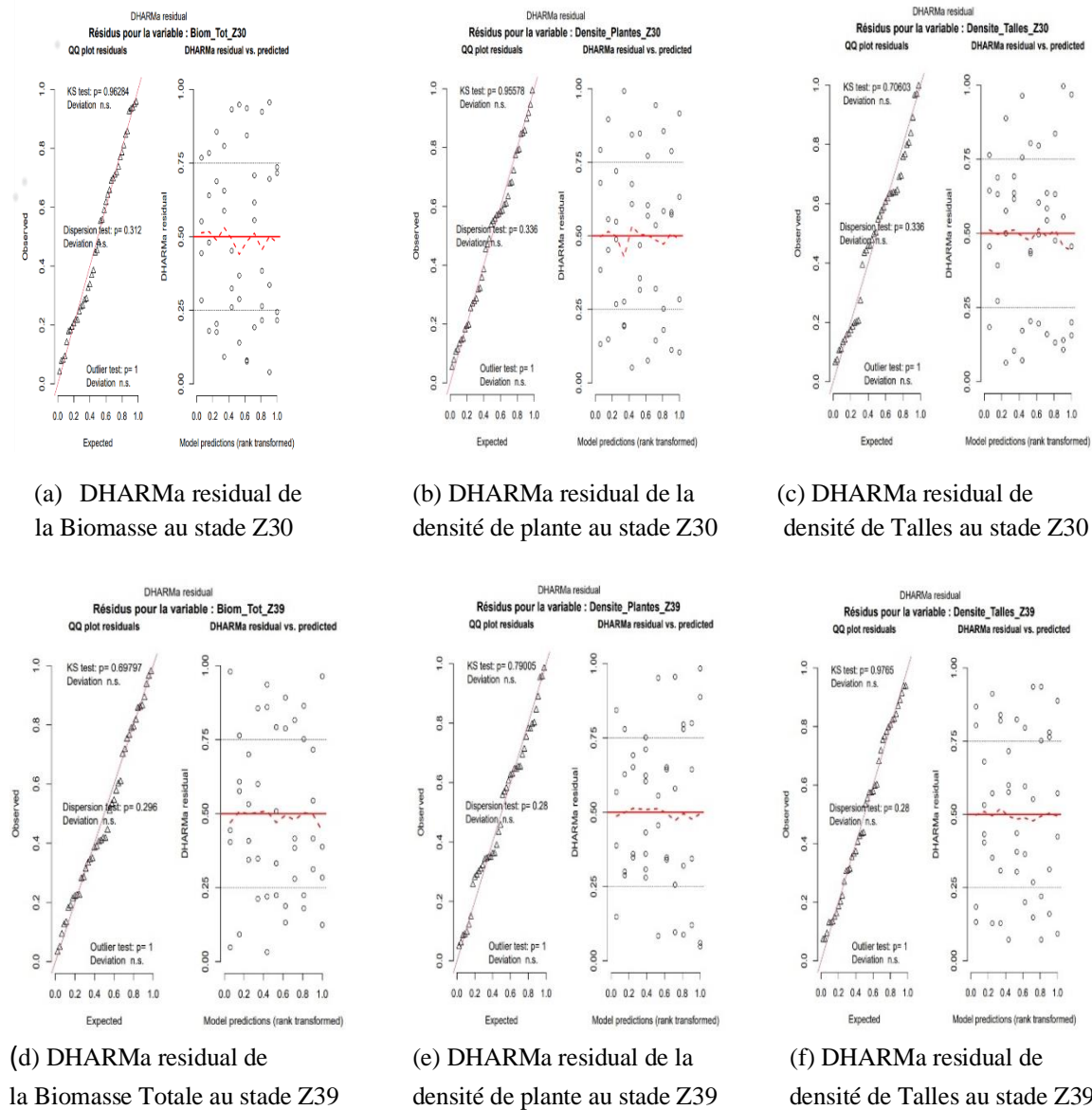


Figure 35 : Première série de graphes des CA : DHARMA residual

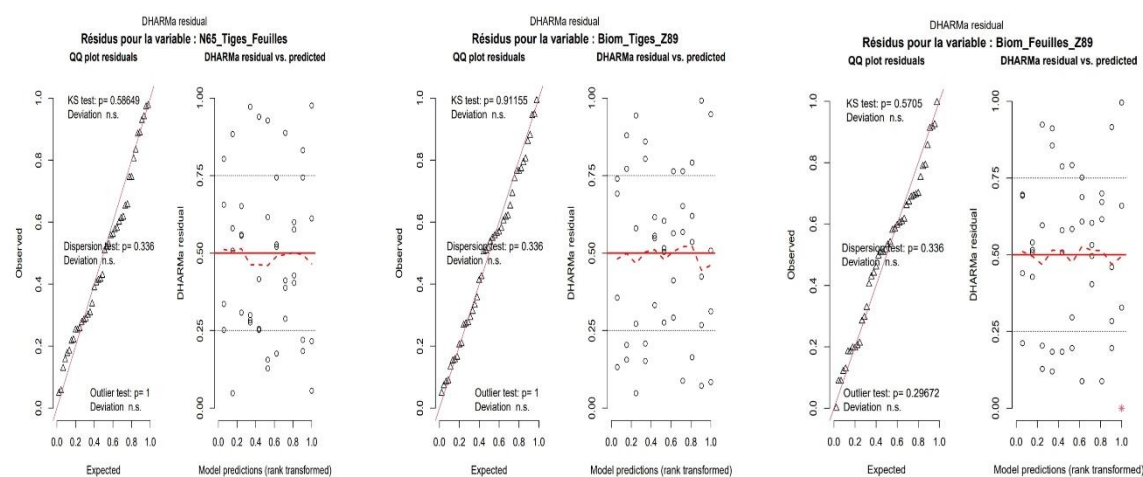
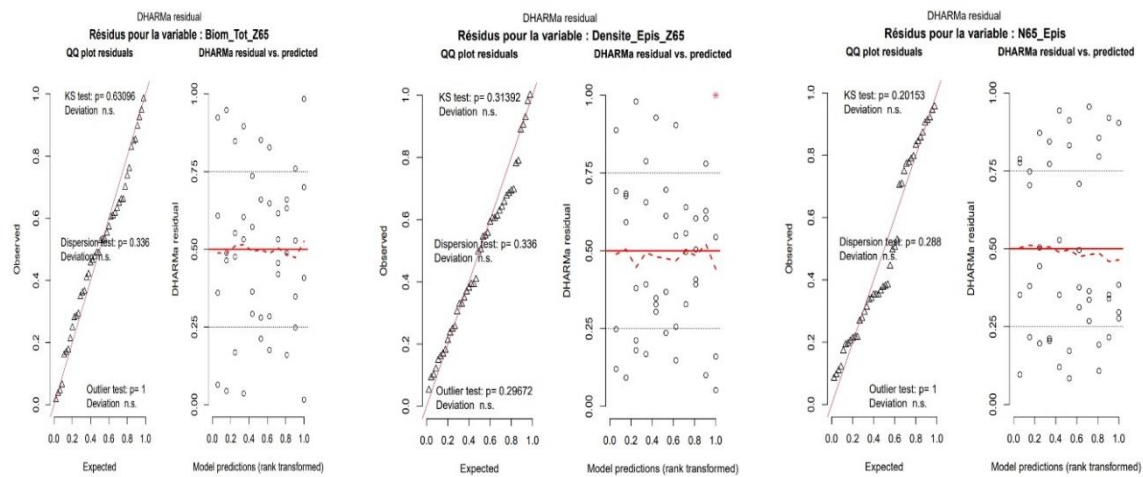
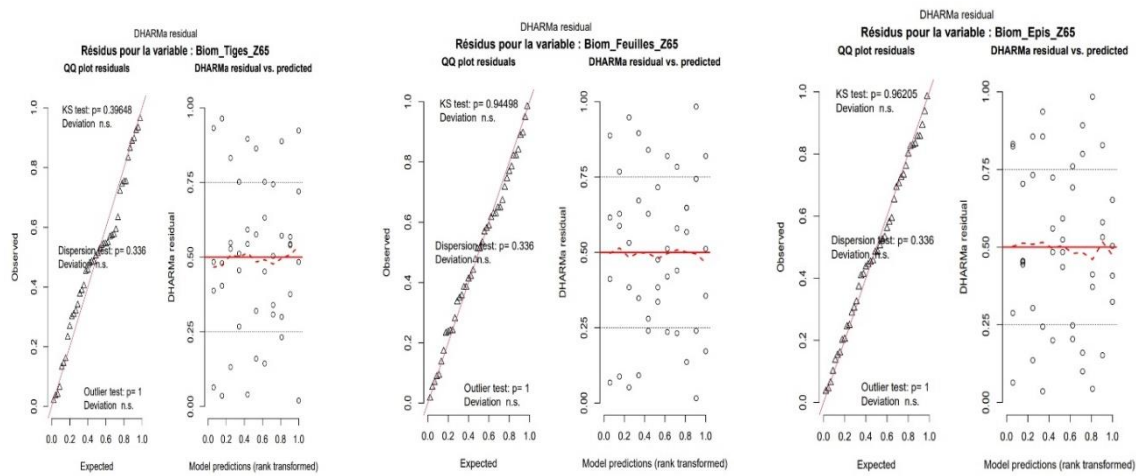
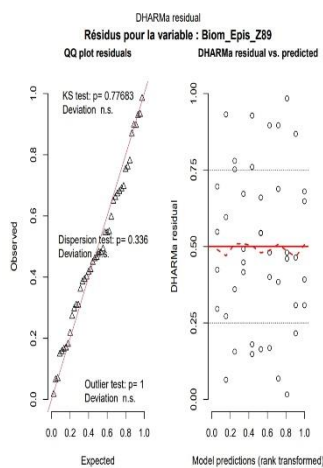
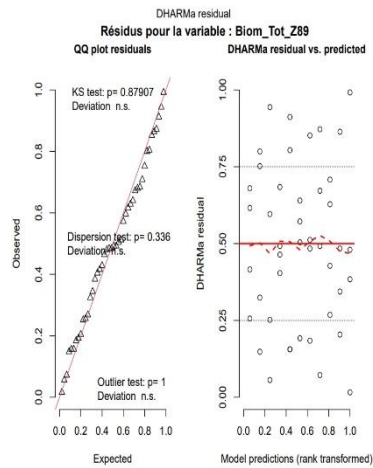


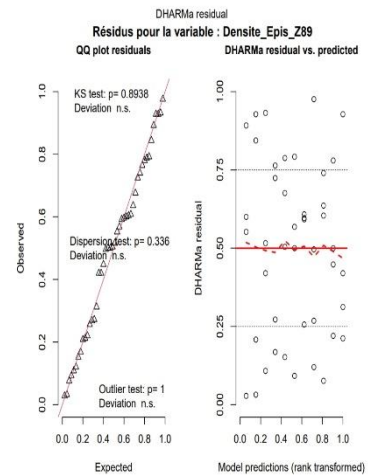
Figure 36 : Deuxième série de graphes des CA : DHARMA residual



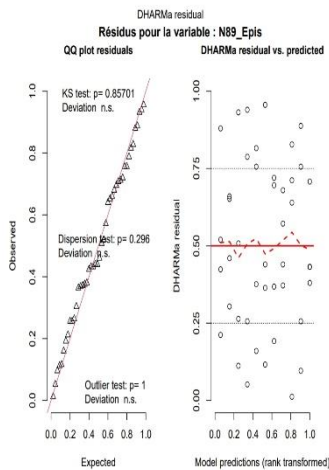
(d) DHARMA residual de la Biomasse des Epis au stade Z89



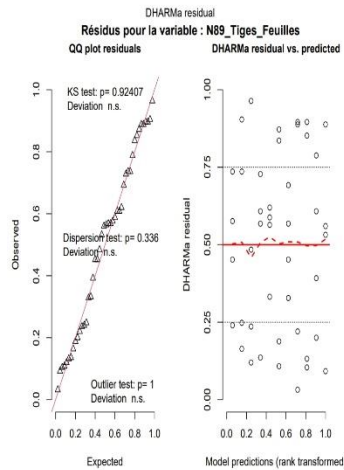
(e) DHARMA residual de la Biomasse Totale au stade Z89



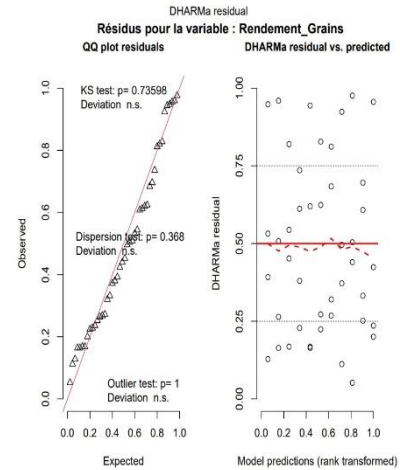
(f) DHARMA residual de la Densité des Epis au stade Z89



a) DHARMA residual du N des Epis au stade Z89

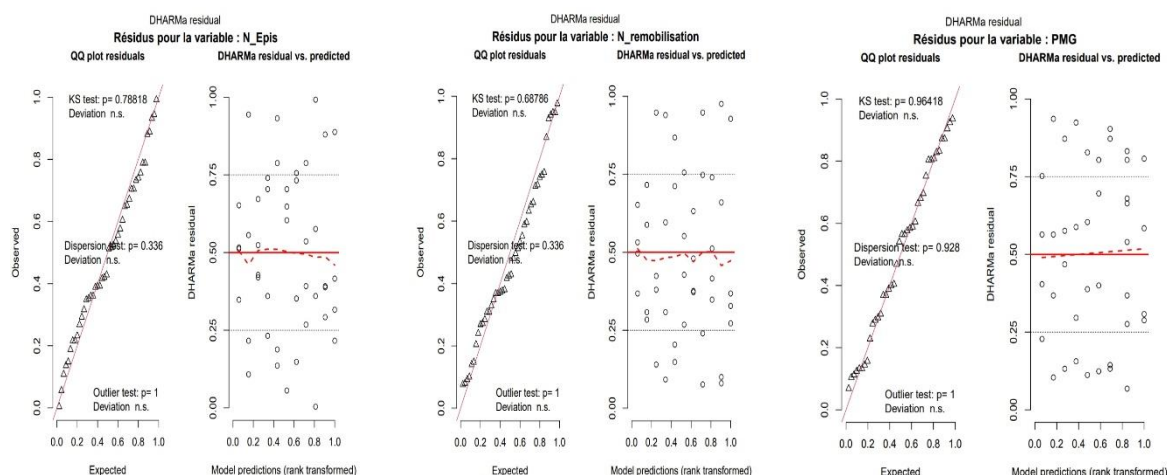


(b) DHARMA residual du N dans les Tiges&Feuilles au stade Z89



(c) DHARMA residual du Rendement en Grains

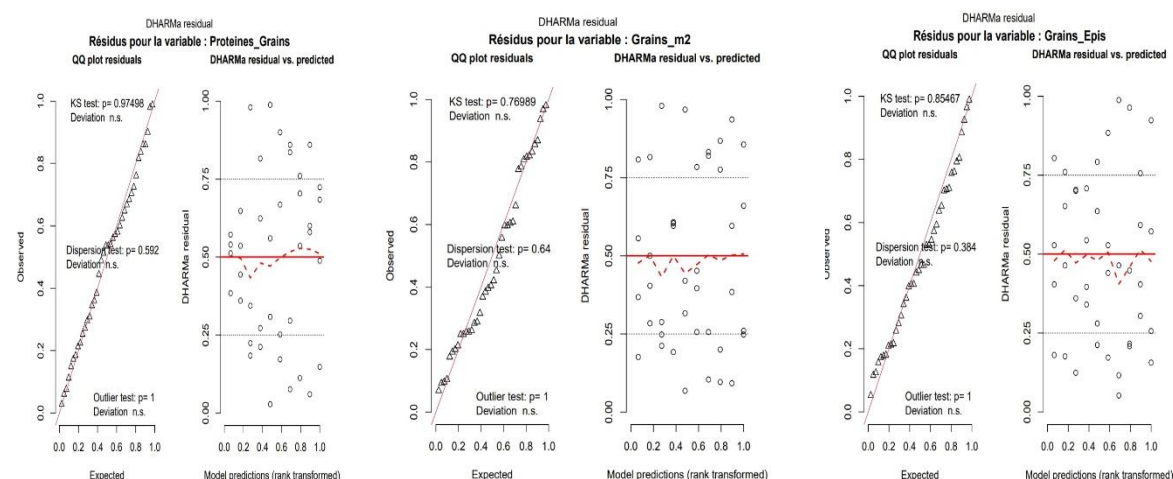
Figure 37 : Troisième série de graphes des CA : DHARMA residual



(d) DHARMA residual du N dans les Epis

(e) DHARMA residual du N remobilisé.

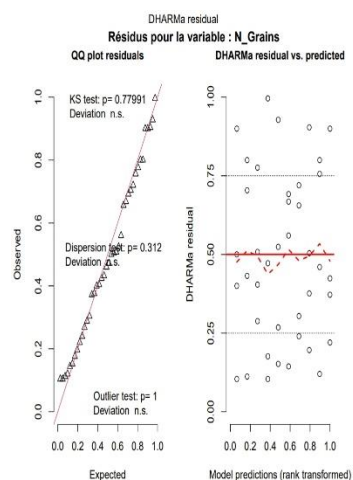
(e) DHARMA residual du PMG



(f) DHARMA residual des Teneurs nombre En Protéines du grain

(e) DHARMA residual du nombre de grainsm²

(e) DHARMA residual du de grains/épis



(a) DHARMA residual de l'azote dans le grain

Figure 38 : Quatrième série de graphes des CA : DHARMA residual