

**Etude de l'effet du choix variétal sur les composantes de rendement de la féverole d'hiver (*Vicia faba* L.) ainsi que sur son développement végétal aérien et souterrain.**

**Auteur :** Brouckaert, Valère

**Promoteur(s) :** Dumont, Benjamin; Dejonckheere, Audrey

**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/2268.2/24426>

---

**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.*

---

**ETUDE DE L'EFFET DU CHOIX VARIÉTAL SUR  
LES COMPOSANTES DE RENDEMENT DE LA  
FÉVEROLE D'HIVER (*VICIA FAB*A L.) AINSI QUE  
SUR SON DÉVELOPPEMENT VÉGÉTAL AÉRIEN  
ET SOUTERRAIN**

**VALÈRE BROUCKAERT**

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

**ANNÉE ACADÉMIQUE 2024-2025**

**CO-PROMOTEURS : AUDREY DEJONCKHEERE ET 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 académique<sup>1</sup> de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

---

<sup>1</sup>Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par les promoteurs·trices membre du personnel enseignant de GxABT

**ETUDE DE L'EFFET DU CHOIX VARIÉTAL SUR  
LES COMPOSANTES DE RENDEMENT DE LA  
FÉVEROLE D'HIVER (*VICIA FAB*A L.) AINSI QUE  
SUR SON DÉVELOPPEMENT VÉGÉTAL AÉRIEN  
ET SOUTERRAIN**

**VALÈRE BROUCKAERT**

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

**ANNÉE ACADÉMIQUE 2024-2025**

**CO-PROMOTEURS : AUDREY DEJONCKHEERE ET BENJAMIN DUMONT**

## **REMERCIEMENTS**

Tout d'abord, je remercie ma co-promotrice, Audrey Dejonckheere, et mon co-promoteur, le professeur Benjamin Dumont pour leur encadrement, leurs explications, leurs conseils et relectures tout au long de la réalisation de mon travail de fin d'étude.

Je remercie l'équipe CePiCOP (Centre Pilote wallon des Céréales et des Oléo-Protéagineux asbl) pour la gestion de l'essai que j'ai eu l'occasion de suivre ainsi que pour leur accueil.

Merci au service de zootechnie de Gembloux Agro-Bio Tech et en particulier à François Debande pour le pré-broyage et Sylvie Mabilie pour l'accès aux laboratoires afin de réaliser le broyage de la biomasse.

Merci aux étudiants de l'OpenSpace et aux doctorants pour leur accueil et leurs conseils.

Merci à mes amis de Gembloux pour leur soutien et leur entraide durant mes études.

Enfin, merci à ma famille de m'avoir permis de suivre des études de Bioingénieur à Gembloux Agro-Bio Tech et pour son précieux soutien infaillible.

## Résumé

La féverole est une légumineuse intéressante pour sa production de grains riches en protéine ainsi que ses intérêts agronomiques et environnementaux.

Cette étude analyse la mise en place des composantes de rendement ainsi que le développement végétal aérien et souterrain de la plante. Les objectifs sont d'identifier les variétés les mieux adaptées aux conditions pédoclimatiques de la Hesbaye. L'étude vise également à déterminer les composantes de rendement ainsi que les facteurs morphologiques et physiologiques permettant d'expliquer le rendement.

L'étude est basée sur le suivi d'un essai variétal en micro-parcelles situé à Temploux durant la saison de culture 2024-2025. Cinq variétés ont été semées dans cet essai (AUGUSTA, CURLEW, DIVA, GL ALICE et NAIROBI). Des mesures relatives au développement cultural ont été réalisées : la phénologie, l'indice de surface foliaire, la hauteur, le suivi de la biomasse des différents organes de la plante ainsi que leur teneur en azote, les composantes de rendement, le nombre de nodules et la teneur en azote du sol.

L'essai variétal a permis de mettre en évidence l'effet significatif du choix variétal sur la biomasse, le taux d'azote de cette biomasse, l'indice de surface foliaire, la biomasse des racines et le nombre de nodules, la densité de tiges, la hauteur, la densité de gousses, la répartition des fleurs et des gousses sur la tige, le poids de 1000 grains et le rendement.

L'étude des relations entre les variables montre que les différences de rendement entre les variétés sont liées à la capacité de remplissage du grain caractérisée par le poids de 1000 grains. Cette capacité de remplissage dépend elle-même de la nutrition azotée (nombre de nodules et taux d'azote dans les feuilles) et de la précocité.

Mots-clés : féverole d'hiver, *Vicia faba* L., choix variétal, composantes, rendement

## Abstract

Faba bean is an interesting leguminous crop for its protein-rich grain production and its agronomic and environmental benefits.

This study analyse the setting of the yield components as well as the above-ground and below-ground development of the plant. The aim is to identify the varieties that are best suited for the soil and climate conditions of the Hesbaye. The study also aims to determine the yield components and the morphological and physiological factors that explain the yield.

The study is based on the monitoring of a varietal trial on micro-plots located in Temploux during the 2024-2025 growing season. Five varieties were sown in this trial (AUGUSTA, CURLEW, DIVA, GL ALICE and NAIROBI). Measurements related to crop development were carried out: phenology, leaf area index, plant height, biomass monitoring of different plant organs and their nitrogen content, yield components, number of nodules, and soil nitrogen content.

The variety trial highlighted the significant effect of variety choice on biomass, biomass nitrogen content, leaf area index, root biomass and number of nodules, stem density, plant height, pod density, distribution of flowers and pods along the stem, thousand grain weight, and yield.

The study of the relationships between variables showed that the differences in yield between varieties were linked to grain filling capacity, characterized by thousand grain weight. This grain filling capacity itself depends on nitrogen nutrition (number of nodules and nitrogen content in the leaves) and earliness.

Keywords: winter faba bean, *Vicia faba* L., variety choice, components, yield.

# Table des matières

1 Introduction.....	1
2 Etat de l'art.....	1
2.1 Origine.....	1
2.2 Taxonomie .....	1
2.3 Description et phénologie.....	3
2.3.1 Appareil aérien.....	3
2.3.2 Appareil souterrain.....	4
2.3.3 Phénologie.....	6
2.4 Intérêt de la culture.....	8
2.4.1 Agronomique et environnemental .....	8
2.4.2 Production, débouchés et économie .....	8
2.5 Etude de l'élaboration du rendement .....	9
2.5.1 Approche du rendement par la matière sèche.....	10
2.5.2 Approche du rendement par ses composantes.....	11
2.6 Effet de l'interaction des facteurs génotypiques, environnementaux et des techniques culturales sur le rendement.....	12
2.6.1 Facteurs génotypiques.....	12
2.6.2 Facteurs environnementaux.....	14
2.6.3 Techniques culturales.....	16
3. Objectifs.....	16
4. Matériel et méthode .....	17
4.1 Site expérimental.....	17
4.1.1 Localisation et type de sol.....	17
4.1.2 Conditions climatiques.....	18
4.2 Dispositif expérimental .....	19
4.2.2 Plan de l'essai .....	19
4.2.2 Facteur étudié : Choix variétal .....	20
4.2.3 Itinéraire technique .....	20
4.4 Observations et variables mesurées .....	20
4.4.1 Synthèse des mesures.....	20
4.4.2 Stades phénologiques.....	22
4.4.3 Biomasse aérienne (tiges, feuilles, gousses, grains).....	22



4.4.4 Taux d'azote (tiges, feuilles et gousses).....	23
4.4.5 LAI.....	23
4.4.6 Biomasse racinaire et comptage des nodules .....	24
4.4.7 Analyse de sol.....	26
4.4.8 Densité et comptage de plantes, tiges, fleurs, gousses et grains. ....	26
4.4.9 PMG.....	27
4.4.10 Rendement grain.....	27
4.4.11 Hauteur .....	28
4.4.12 Manipulation de données .....	28
4.5 Analyse statistique.....	28
4.5.1 Analyse univariée .....	28
4.5.2 Analyse multivariée .....	29
5. Résultats et Discussion .....	30
5.1 Moyennes et groupes des mesures liées à l'approche par la matière sèche .....	30
5.2 Moyennes et groupes des mesures liées à l'approche par les composantes de rendement .....	32
5.3 Phénologie .....	34
5.4 Résultats des mesures basées sur l'approche par la matière sèche .....	37
5.4.1 Partie aérienne .....	38
5.4.2 Partie souterraine .....	43
5.5 Résultats des mesures basées sur l'approche par les composantes de rendement .....	44
5.5.1 Densité de Plantes.....	44
5.5.2 Densité de tiges et nombre de tiges par plante .....	45
5.5.3 Nombre d'étages par tige .....	45
5.5.5 Densité de fleurs et répartition des fleurs sur la plante.....	45
5.5.6 Densité de gousses et répartition des gousses sur la plante .....	46
5.5.7 Densité de grains et nombre de grains par gousse.....	48
5.5.8 Poids de 1000 grains .....	48
5.5.9 Rendement.....	49
5.6 Analyse multivariée.....	50
5.6.1 Corrélation entre les variables intervenant dans l'approche par les composantes de rendement.....	50
5.6.2 Corrélation entre les variables intervenant dans l'approche par la matière sèche....	52
5.6.3 Analyse en composante principale .....	54
6.Conclusion et recommandations .....	56
7.Contribution personnelle.....	57

6. Bibliographie.....	58
7. Annexes.....	63

## Table des figures :

Figure 1: Schéma de la plante (Duc, 1997).....	3
Figure 2: Composition des grains en pourcentage de MS (Cartryse et al., 2024). ....	4
Figure 3: Formation d'un nodule (Domergue, 2017). ....	5
Figure 4: Fonctionnement symbiotique d'un nodule (Schneider et al., 2015).....	5
Figure 5: Représentation des stades phénologiques (Terres inovia, 2024).....	6
Figure 6: Approches conceptuelles pour l'étude de l'élaboration du rendement (Reynolds et al., 2022).....	9
Figure 7: Tableau de corrélation entre les composantes de rendement et d'autres caractéristiques (Alghamdi, 2007). ....	12
Figure 8 : Image satellite de la zone d'implantation de l'essai, avec superposition de la carte numérique des sols de Wallonie ("WalOnMap   Géoportail de la Wallonie," March-14-2025). Le rectangle vert indique l'emplacement de l'essai. ....	17
Figure 9 : Graphique de l'évolution des températures et des précipitations du 1-10-24 au 18-07-25 à Gembloux ("Agromet.be," July-19-2025).....	18
Figure 10 : Plan et photo aérienne de l'essai. ....	19
Figure 11: Photos de gauche à droite : prélèvement, décorticage avec feuille de comptage, étuve, balance de précision. ....	22
Figure 12 : a et b: broyeur pour le pré-broyage; c et d: broyeur de laboratoire; e: résultat du broyage. ....	23
Figure 13 : Distribution du nombre de pixels selon leur teneur en vert moins leur teneur en rouge à gauche et selon leur teneur en vert moins leur teneur en bleu à droite. ....	24
Figure 14 : De gauche à droite : collage des feuilles; scan 300 dpi jpg; scan en noir et blanc : blanc = pixel considéré comme vert, noir = pixel non pris en compte pour la mesure de la surface foliaire.....	24
Figure 15 : a et b : prélèvement, c : trempage, d : nettoyage, e:comptage. ....	25
Figure 16 : prélèvement des échantillons de terre.....	26
Figure 17: a: plante en fleur, b: tige avec des gousses, c: gousse ouverte, d: tamisage, e: comptage des grains. ....	27
Figure 18 : Moisson de l'essai.....	28
Figure 19 : Mesure de la hauteur.....	28
Figure 20 : Evolution des stade BBCH par variété. ....	34
Figure 21: Suivi de la phénologie et de la mise en place des composantes de rendement. ....	35
Figure 22: Suivi du remplissage.....	36
Figure 23: Suivi de la maturation.....	36
Figure 24: Evolution de la biomasse et de sa répartition dans les organes de la plante. ....	37
Figure 25: Boxplot de la biomasse aérienne totale au stade BBCH 55.....	38
Figure 26: Boxplot de la biomasse des tiges au stade BBCH 89. ....	38
Figure 27: Boxplot de la biomasse des feuilles au stade BBCH 89.....	39
Figure 28: Boxplot du taux d'azote dans les tiges au stade BBCH 65.....	39
Figure 29: Boxplot des taux d'azote dans les feuilles aux stades BBCH 55, 65 et 75.....	40
Figure 30: Boxplot du taux d'azote dans les gousses au stade BBCH 75. ....	40
Figure 31: Boxplot du taux d'azote dans les grains au stade BBCH 75.....	41
Figure 32: Taux d'azote en fonction de la biomasse végétative aérienne en comparaison de courbes critiques de dilution azotée de référence pour les stades BBCH 55, 65 et 75. ....	42
Figure 33: Boxplot de l'indice de surface foliaire pour le stade BBCH 55.....	42

Figure 34: Boxplot de la biomasse racinaire pour le stade BBCH 55.....	43
Figure 35: Boxplot du nombre de nodules par plante. ....	44
Figure 36: Boxplots du nombre de tiges/m <sup>2</sup> à gauche et du nombre de tiges/plante à droite. ...	45
Figure 37: Boxplots du nombre d'étages /tige pour le stade BBCH 65 à gauche et BBCH 75 à droite. ....	45
Figure 38: Boxplots du nombre d'étages en fleurs/tige à gauche et du nombre de fleurs/étage portant des fleurs à droite.....	46
Figure 39: Boxplot du nombre de gousses/m <sup>2</sup> pour le stade BBCH 89.....	46
Figure 40: Boxplots du nombre de gousses/tige à gauche et du nombre d'étages portant des gousses à droite. ....	47
Figure 41: Nombre moyen de fleurs et de gousses sur chaque étage de la plante. ....	48
Figure 42: Boxplots du PMG pour les stades BBCH 75 et 89.....	49
Figure 43: Boxplot du rendement parcellaire. ....	49
Figure 44 : Matrice de corrélation entre les variables intervenant dans l'approche par les composantes de rendement. ....	51
Figure 45: Matrice de corrélation entre les variables intervenant dans l'approche par la matière sèche. ....	53
Figure 46: Analyse en composante principale. ....	54
Figure 47: Position des variétés selon les axes de l'analyse en composante principale. ....	55

## Table des tableaux

Tableau 1 : Classification. (De Ron, 2015; INPN, February-3-2025).....	2
Tableau 2: Caractéristiques agronomiques et technologiques des 5 variétés étudiées. ....	20
Tableau 3: Itinéraire technique.....	20
Tableau 4: Synthèse des mesures réalisées. ....	21
Tableau 5: Moyennes et groupes des mesures liées à l'approche par la matière sèche.....	30
Tableau 6: Suite du tableau 5: Moyennes et groupes des mesures liées à l'approche par la matière sèche.....	31
Tableau 7: Moyennes et groupes des mesures liées à l'approche par les composantes de rendement.....	32
Tableau 8: Suite du tableau 7: Moyennes et groupes des mesures liées à l'approche par les composantes de rendement. ....	33
Tableau 9: Durée et Date de début et de fin de la floraison. ....	35
Tableau 10 : Résultat des analyses de sol réalisées à la floraison et à la récolte. ....	44
Tableau 11 : Comparaison des biomasses du grain obtenues sur base des prélèvements de quadrat et de la moisson des micro-parcelles.....	50

## Table des annexes

Annexe 1: Autres tableaux de corrélations .....	63
Annexe 2: Autres techniques culturales couramment utilisées .....	64
Annexe 3: Caractéristiques agronomiques et technologiques des 5 variétés étudiées avec le détail des sources utilisées .....	65
Annexe 4: Echelle BBCH de la féverole (source: (Meier, 2001)) .....	66
Annexe 5: Scan LAI .....	70

Annexe 6: Boxplots de la biomasse des tiges et des feuilles au stade BBCH 55 .....	72
Annexe 7: Résultats des tests de significativité des différentes variables mesurées pour le facteur variété.....	73
Annexe 8: Résultats des tests de vérification des conditions de normalité et d'égalité des variances .....	73
Annexe 9: Résultats des analyses de sol réalisées à la sortie de l'hiver .....	77
Annexe 10: Boxplot du nombre de fleurs/tige .....	78
Annexe 11: Hauteur.....	78
Annexe 12: Matrice de corrélation des variables liées à l'approche par les composantes de rendement avec le détail des valeurs de corrélation r et les p-valeurs.....	79
Annexe 13: Matrice de corrélation des variables liées à l'approche par la matière sèche avec le détail des valeurs de corrélation r et les p-valeurs .....	80

## **Abréviations :**

Mt : millions de tonnes

t : tonnes

ha : hectare

CePiCOP : Centre Pilote wallon des Céréales et des Oléo-Protéagineux asbl

CRA-W : Centre wallon de Recherches agronomiques

PMG : poids de 1000 grains

LAI : Leaf Area Index = indice de surface foliaire

# 1 Introduction

A l'échelle mondiale, la demande en protéines végétales est croissante et, pour répondre à cette demande, la féverole présente un potentiel élevé (Gela et al., 2023). A l'échelle globale, la culture est relativement importante (Alharbi et al., 2020; "FAOSTAT," February-10-2025) : la féverole est la quatrième espèce de protéagineux la plus produite mondialement après le pois chiche (*Cicer arietinum* L.), le pois (*Pisum sativum* L.) et la lentille (*Lens culinaris* L.). En 2023, sa production s'élevait à 6,07 millions de tonnes ("FAOSTAT," February-10-2025). Sa culture ne représentait que 1,2% de la surface totale de légumineuses à graines cultivée dans le monde en 2011. Cependant, dans l'union européenne (27), elle représente 21,3% de la surface de légumineuses à graines cultivée et se classe deuxième, succédant le pois et précédant le soja (De Ron, 2015).

En Europe, malgré ses intérêts agronomiques et environnementaux, la production de féverole a diminué (Schmaucks, 2022). Le taux d'approvisionnement de la Belgique est faible avec une consommation annuelle comprise entre 5 500 à 16 800 t entre 2016 et 2022 pour une production variant entre 3 000 et 5 600 t sur la même période (Cartrysse et al., 2024). Cela peut s'expliquer par un rendement instable d'année en année, moins élevé que celui des céréales mais aussi par les avantages apportés par la culture de céréales qui s'adapte facilement à de nombreux environnements différents et enfin par l'importation à bas prix de soja (Alharbi et al., 2020; Schmaucks, 2022; Cartrysse et al., 2024).

Afin d'y remédier, l'UE développe des plans protéiques et des stratégies bas carbone pour accroître son autonomie en protéines végétales et rendre l'agriculture plus durable en réduisant sa dépendance aux énergies fossiles. Pour rendre la culture plus attractive pour les agriculteurs, l'UE apporte des soutiens financiers pour augmenter son développement (Schmaucks, 2022).

Pour exploiter davantage ce potentiel, et répondre à la croissance de la demande mondiale en protéines végétales, d'autres leviers sont à encourager afin de maintenir et augmenter la productivité, par exemple en sélectionnant des variétés à haut potentiel de rendement et avec une meilleure stabilité interannuelle (Gela et al., 2023).

Pour établir ces programmes, il est intéressant d'étudier l'élaboration de son rendement à travers le développement de la plante (Alghamdi, 2007; Alharbi et al., 2020; Ali Mohamed Osman et al., 2013).

## 2 Etat de l'art

### 2.1 Origine

L'origine de la féverole n'est pas connue avec certitude et fait encore débat étant donné que son ancêtre sauvage n'a pas été identifié et qu'elle n'aurait pas pu se croiser avec d'autres espèces proches car elle compte 12 chromosomes au lieu de 14 pour ces espèces (Duc, 1997; Schilperoord, 2016). Elle est probablement originaire du moyen orient et a été cultivée à partir du début du néolithique (Duc, 1997; De Ron, 2015; Schilperoord, 2016; GRDC, 2017).

### 2.2 Taxonomie

La féverole (*Vicia faba* L.) appartient à la famille des *Fabaceae* et au genre *Vicia*. Comme la grande majorité des espèces de ce genre, celle-ci est une herbacée annuelle. Cependant, elle

présente une tige robuste et dressée au lieu des fines tiges ramifiées avec des vrilles rencontrées chez la plupart des espèces du genre *Vicia* (Schilperoord, 2016).

Tableau 1 : Classification. (De Ron, 2015; INPN, February-3-2025).

Règne	<i>Plantae</i> Haeckel, 1866
Classe	<i>Equisetopsida</i> C.Agardh, 1825
Sous-Classe	<i>Magnoliidae</i> Novák ex Takht., 1967
Ordre	<i>Fabales</i> Bromhead, 1838
Famille	<i>Fabaceae</i> Lindl., 1836
Sous-Famille	<i>Papilionoideae</i> DC., 1825
Genre	<i>Vicia</i> L., 1753
Espèce	<b><i>Vicia faba</i> L., 1753</b>
Variété botanique	<i>V. faba</i> sp. <i>faba</i> var. <i>major</i>
Variété botanique	<i>V. faba</i> sp. <i>faba</i> var. <i>equina</i>
Variété botanique	<i>V. faba</i> sp. <i>faba</i> var. <i>minor</i>
Sous-espèce	<i>V. faba</i> sp. <i>paucijuga</i>

Les différentes variétés botaniques se différencient sur base de la forme, de la taille et du poids de leur graines. Ainsi, la variété *major* regroupe les féveroles dont les grains pèsent plus de 1g (développées dans le sud de la méditerranée et en Chine), la variété *equina* regroupe les féveroles dont la taille de la graine est intermédiaire : entre 0,45 et 1,1 g par grain (développée au moyen orient et au nord de l’Afrique), tandis que la variété botanique *minor* correspond aux plus petites grains, compris entre 0,2 et 0,5 g (développée dans les hauts plateaux d’Ethiopie, au Soudan et dans le nord de l’Europe) (De Ron, 2015). La sous espèce *paucijuga*, originaire d’Asie centrale, produit également des petits grains et est généralement utilisée en tant que couvert végétal (De Ron, 2015; Alharbi et al., 2020; Deb et al., 2024).

Les variétés (cultivars) sont également réparties en deux groupes selon leur tolérance au gel, besoin en vernalisation, photopériodisme, moment de floraison. Ces deux groupes sont les variétés de printemps, qui sont semées au printemps et les variétés d’hiver qui sont semées en automne. Cependant, la distinction entre les deux groupes n’est pas toujours nette et une variété de printemps dans un climat plus froid peut parfois être cultivée comme une variété d’hiver dans certains climats méditerranéens (De Ron, 2015). Certaines variétés d’hiver peuvent résister à des températures allant jusqu’à -12°C (Cartrysse et al., 2024). Selon Mínguez et al. (2021), un troisième groupe se distingue également : les variétés méditerranéennes adaptées au semis d’automne dans les climats méditerranéens et ayant des besoins en vernalisation modérés.

Rem : Dans le cadre de ce TFE, l’étude se focalise sur des variétés d’hiver.



## 2.3 Description et phénologie

La féverole (figure 1) est une plante herbacée annuelle avec une tige robuste et dressée (Mínguez et al., 2021). C'est une plante dont les graines sont riches en protéines, capable de fixer symbiotiquement l'azote atmosphérique grâce à des bactéries du genre *Rhizobium*, principalement cultivée dans les régions au climat tempéré et méditerranéen (Lake et al., 2019).

### 2.3.1 Appareil aérien

#### A. Appareil végétatif

Les tiges sont creuses et de section carrée dont les angles présentent une proéminence débutant à la base des feuilles et se prolongeant vers le bas (Schilperoord, 2016; Schmaucks, 2022). La hauteur de la plante est généralement comprise entre 0,5 et 1.8 m (GRDC, 2017; Mínguez et al., 2021).

Le nombre et la forme des feuilles est variable selon la variété (Schmaucks, 2022). La disposition des feuilles sur les tiges est alterne. Les feuilles composées, pennées, comptent entre 2 et 6 folioles et mesurent entre 10 et 25 cm de long. Les folioles, de couleur gris-vert glauque peuvent atteindre 8 cm de long (GRDC, 2017; Mínguez et al., 2021). Les feuilles pennées possèdent une petite extrémité courbée prolongeant la nervure principale au lieu des vrilles rencontrées chez la majorité des représentants du genre *vicia* (Schilperoord, 2016; GRDC, 2017). Les folioles sont dépourvues de trichomes (GRDC, 2017). Les deux premières feuilles ne possèdent qu'une seule paire de folioles (Schilperoord, 2016; GRDC, 2017). De part et d'autre des nœuds, se trouvent des stipules (feuille écailleuse dépourvue de limbe et de pétiole). Des nectaires caractérisées par une tache sombre sont présentes sur ces stipules (Schilperoord, 2016). Les féveroles d'hiver forment généralement 2 à 4 pousses latérales à partir de bourgeons situés au niveau des nœuds les plus bas (Etemadi et al., 2018). Par contre, les variétés de printemps ne forment pas de ramification (Arvalis et al., 2011).

#### B. Appareil reproducteur

La féverole forme des fleurs papilionacées de grande taille (1-2,5 cm de long), ces fleurs se développent par groupe de 1 à 5 et sont rattachées au racème (inflorescence) par de courts pédicelles. Ces inflorescences se développent à l'aisselle des feuilles (GRDC, 2017; Mínguez et al., 2021; Schmaucks, 2022). Les fleurs comptent 5 pétales, elles peuvent être complètement blanches, brunes ou violettes et possèdent dans la plupart des cas une tache de mélanine noire ou brune située sur les ailes (Duc, 1997; GRDC, 2017; Schmaucks, 2022). Chaque fleur compte 10 étamines dont une est libre tandis que les filets des 9 autres forment une gaine autour de l'ovaire. Des nectaires se trouvent à la base du tube de la corolle (Schmaucks, 2022).

La féverole étant partiellement allogame, une partie de la pollinisation se fait par autopolinisation et l'autre partie se fait par pollinisation croisée grâce aux insectes (Singh et

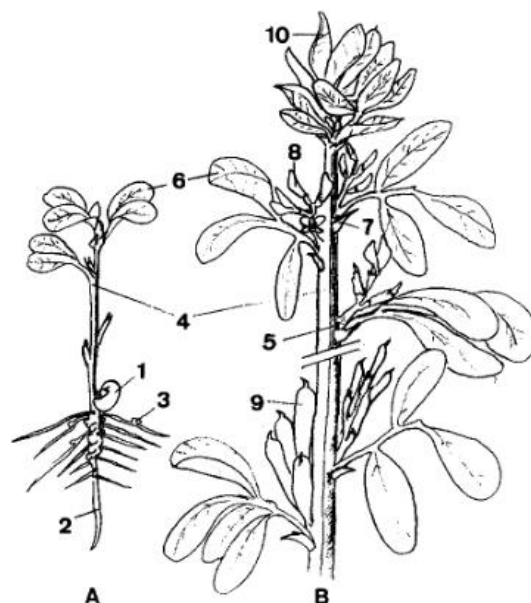


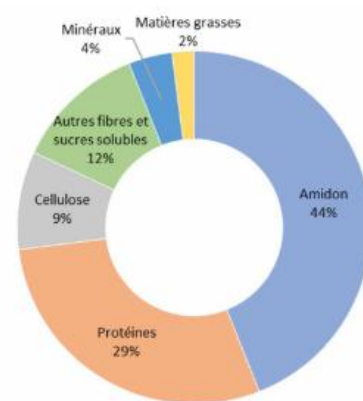
Fig. 2. Structure of the faba bean plant at two leaf stage (A) and end of flowering stage (B). 1 – seed, 2 – tap root, 3 – nodules, 4 – main stem, 5 – node, 6 – leaflets, 7 – stipules, 8 – pod raceme, 9 – flower raceme, 10 – apex.

*Figure 1: Schéma de la plante (Duc, 1997).*

al., 2016). Le taux de pollinisation croisée varie selon les variétés, les conditions environnementales, la présence d'insectes pollinisateurs et l'écartement entre les rangs de la culture (Musallam et al., 2004). Celui-ci varie entre 4 et 84% et vaut en moyenne 35% (Singh et al., 2017; Smith et al., 2021). Une partie de l'autopollinisation dépend également des insectes pollinisateurs, ceux-ci libèrent le pollen et favorisent la libération d'exsudats par le stigmate ce qui facilite la germination du pollen (Suso et al., 1996; Smith et al., 2021).

Une partie de ces fleurs se transforment en gousses (contenant les graines) de forme cylindrique dont la surface externe verte est soyeuse tandis que l'intérieur est recouvert d'un duvet blanc (Alharbi et al., 2020; Schmaucks, 2022).

Les graines sont rondes à ovales et mesurent généralement entre 20 et 25 mm de long, 15 mm de large et 5 à 10 mm d'épaisseur (GRDC, 2017). La couleur des graines peut aller du jaune au violet en passant par le vert, le brun et le noir. Certaines graines possèdent également des rayures ou des points bruns près du hile qui peut être noir ou clair (Duc, 1997). En Belgique, le taux de protéine observé varie généralement entre 27 et 31% de la matière sèche (figure 2) (Cartrysse et al., 2024).



*Figure 2: Composition des grains en pourcentage de MS (Cartrysse et al., 2024).*

### **2.3.2 Appareil souterrain**

#### **A. Appareil racinaire**

Le système racinaire pivotant de la féverole est constitué d'un pivot racinaire avec des racines secondaires qui permettent d'augmenter le volume de sol exploré (Duc, 1997; GRDC, 2017). Ce système racinaire est robuste mais il ne pénètre pas toujours profondément dans le sol (GRDC, 2017). La proportion de racines situées dans les 15 premiers centimètres du sol est de 50% (Turpin et al., 2002).

#### **B. Nodosité, nodulation et fixation de l'azote atmosphérique**

Les racines forment des nodosités résultant d'une symbiose avec des bactéries fixatrices d'azote atmosphérique (*Rhizobium leguminosarum*, bv, *viciae*) présentes dans le sol (Duc, 1997; De Ron, 2015; Schmaucks, 2022).

La formation d'un nodule (figure 3) commence par la réaction à un facteur Nod sécrété par une bactérie symbiotique et un récepteur transmembranaire des cellules des poils racinaires (De Ron, 2015; Domergue, 2017). Les rhizobia présents dans la rhizosphère à l'état saprophytique sont attirés (chimiotactisme positif) par les exsudats racinaires et notamment pas certains flavonoïdes plus spécifiques des légumineuses (Domergue, 2017). Si le facteur Nod est inducteur, c'est à dire si la souche de

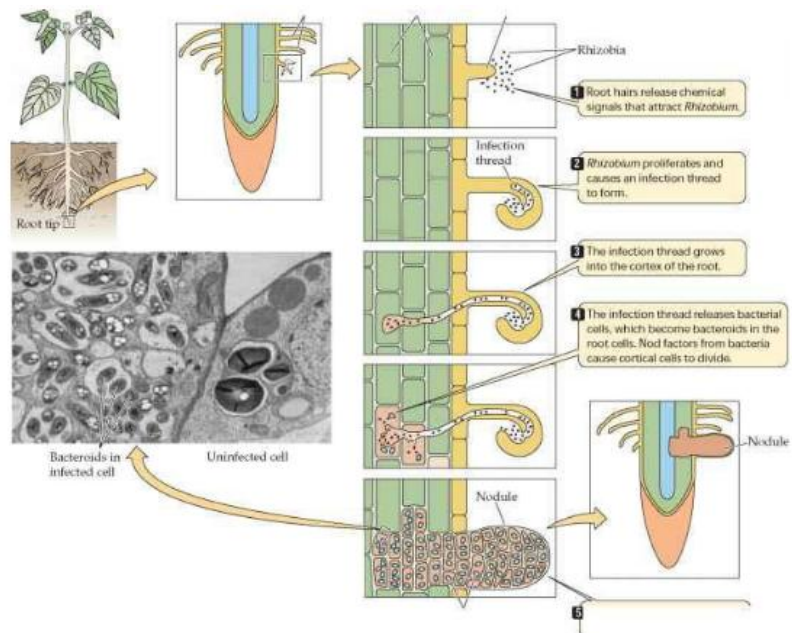


Figure 3: Formation d'un nodule (Domergue, 2017).

rhizobium est compatible pour réaliser une symbiose efficace avec l'espèce de légumineuse, après une dépolarisation membranaire et des oscillations calciques intracellulaires, des gènes sont exprimés, les poils absorbants se courbent, le cytosquelette est modifié et la division des cellules corticales est initiée (De Ron, 2015; Domergue, 2017). Un primordium nodulaire est alors formé, puis les cordons d'infection se développent à travers les couches de cellules et atteignent le primordium cellulaire où les rhizobia sont relargués. Le primordium devient alors une nodosité (ou nodule) et le rhizobium entouré d'une membrane pér bactérianne le séparant du cytoplasme des cellules végétales se différencie en bactéroïde. Deux types de nodules (indéterminé et déterminé) se distinguent selon leur forme (respectivement allongé et rond). La féverole possède des nodules de type indéterminé dont la forme coralloïde, généralement en Y, s'explique par le développement constant du méristème apical (Domergue, 2017).

La relation symbiotique (figure 4) entre la plante et la bactérie se fait par des échanges via le xylème et le phloème. Grace à l'énergie issue de sucres produits par la photosynthèse et aux micronutriments apportés par la plante, la bactérie est capable de fixer l'azote atmosphérique à partir de l'air présent dans la porosité du sol. Cet azote  $N_2$ , transformé en ammonium  $NH_4^+$  se retrouve dans le cytoplasme des cellules colonisées et est utilisé pour synthétiser les acides aminés, les protéines ainsi que les macromolécules tel que les acides aminés dont la plante a besoin

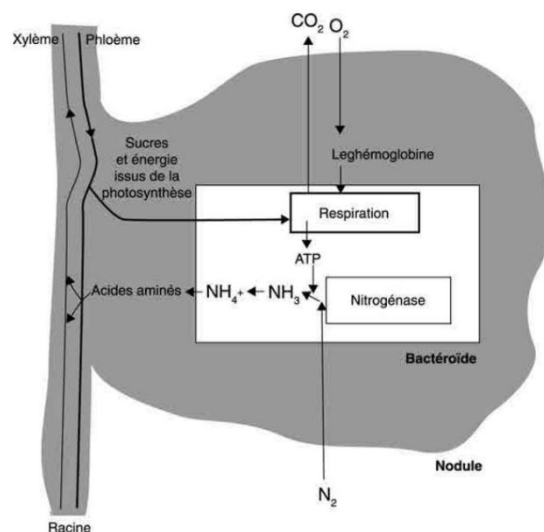
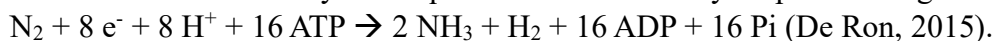


Figure 4: Fonctionnement symbiotique d'un nodule (Schneider et al., 2015).

pour son métabolisme (Schneider et al., 2015).

La réaction de fixation symbiotique de l'azote est catalysée par la nitrogénase (enzyme) :



La bactérie a donc besoin d'ATP (source d'énergie) issue de la respiration, elle-même nécessitant de l'O<sub>2</sub>. Cependant, l'oxygène en excès inhibe la nitrogénase réalisant la fixation. Le maintien d'une faible concentration en oxygène dans la zone centrale où se trouvent les bactéroïdes est donc nécessaire (De Ron, 2015; Schneider et al., 2015). Elle est assurée par deux mécanismes : d'une part, une barrière empêchant la diffusion de l'oxygène au niveau du cortex des nodules et un taux de respiration élevé qui caractérise les bactéroïdes (De Ron, 2015). D'autre part, une hémoprotéine nommée leghémoglobine dont la globine provient de la plante et l'hème du rhizobium permet de transporter l'oxygène jusqu'aux bactéroïdes (Schneider et al., 2015; Domergue, 2017). Cette protéine assure le maintien d'une haute concentration en O<sub>2</sub> dans le nodule tout en conservant une faible pression partielle permettant à la nitrogénase de fonctionner correctement (Domergue, 2017). C'est la leghémoglobine qui donne leur couleur rosée (observable en les coupant) aux nodosités actives (Schneider et al., 2015).

Presque tous les nodules se retrouvent dans les 30 premiers cm du sol et 90% d'entre eux sont situés dans les 15 premiers centimètres à partir de la surface du sol (GRDC, 2017). Cette localisation en surface s'explique par la localisation des racines et la porosité du sol qui y est plus élevée, surtout lorsque les sols sont compactés. Cependant, cela augmente leur sensibilité à un éventuel manque d'humidité (Schneider et al., 2015).

La quantité totale d'azote atmosphérique fixée par la féverole varie entre 135 et 275 kg N/ha avec des reliquats pouvant aller jusqu'à 155 kg N/ha, la féverole possède donc une grande capacité de fixation d'azote (Turpin et al., 2002; Domergue, 2017).

Rem : Des associations avec des endomycorhizes sont également réalisées (Duc, 1997; Schmaucks, 2022).

### 2.3.3 Phénologie

Les principaux stades phénologiques des légumineuses à graines sont la levée, la croissance végétative, la floraison, la formation puis le remplissage des gousses avant la maturité physiologique et la sénescence des gousses suivie de celle des tiges (figure 5) (Patrick et al., 2010; Etemadi et al., 2018; Mínguez et al., 2021).



Figure 5: Représentation des stades phénologiques (Terres inovia, 2024).

La féverole peut avoir un mode de croissance déterminée ou indéterminée (López-Bellido et al., 2005; Alharbi et al., 2020; Schmaucks, 2022). Le type indéterminé est caractérisé par une poursuite de la croissance entre la floraison et la sénescence. Ces variétés produisent beaucoup de nœuds par tiges (Krylova et al., 2020). Elles sont plus hautes et donc plus sensibles à la verse (López-Bellido et al., 2005). Le type déterminé, résultant d'une mutagenèse artificielle se distingue par le remplacement de son apex par une inflorescence terminale après la formation d'un certain nombre de nœuds (Nachi et al., 1996; Schmaucks, 2022). Ces variétés déterminées

sont plus petites, possèdent un nombre réduit de nœuds par tige et développent davantage de pousses latérales. Des variétés semi-déterminées existent également. Ces variétés produisent 10 à 12 nœuds portant des fleurs avant que les méristèmes reproductifs et végétatifs n'entrent en sénescence alors que ce nombre de nœuds peut aller jusqu'à 25 pour le type indéterminé (Duc, 1997). Pour ces variétés, la croissance végétative continue au début de la phase reproductive mais elle peut s'arrêter d'elle-même avant que le manque d'eau ne devienne un facteur limitant (GRDC, 2017).

### A. Levée

La germination de la féverole est hypogée, les cotylédons restent donc en dessous de la surface du sol. Selon les conditions d'humidité, de température et la profondeur de semis, l'émergence a lieu entre 7 et 30 jours après le semis (GRDC, 2017). Le nombre de degrés-jours ( $T_{\max} - T_{\min} / 2$ ) requis pour l'émergence varie entre 200 et 300 (Alharbi et al., 2020).

### B. Croissance végétative

La vitesse de croissance est fortement influencée par la température. La féverole doit accumuler un certain nombre de degrés-jours avant de fleurir. Ce nombre de degrés-jours nécessaire varie selon la variété, la localisation et la photopériode, la température de base pour la féverole est de 0°C (GRDC, 2017). La somme de degrés-jours requise pour la croissance d'un nœud varie entre 54 et 65,9°C (Alharbi et al., 2020).

Les premiers nodules se développent 2 semaines après la levée, le nombre maximal de nodules est atteint à la floraison et le taux de fixation maximal d'azote est atteint après la floraison (De Ron, 2015; Schmaucks, 2022). La fixation d'azote atmosphérique débute 10 à 21 jours après la contamination (De Ron, 2015).

### C. Phase reproductive

La floraison a lieu entre 830 et 1000 degrés-jours après le semis (Patrick et al., 2010; Alharbi et al., 2020). Celle-ci débute généralement lorsque la température est supérieure ou égale à 16°C (Alharbi et al., 2020). L'indice de surface foliaire (LAI) atteint son maximum entre la floraison et le début du remplissage des gousses (López-Bellido et al., 2005). La plupart des génotypes européens de féverole d'hiver présentent un besoin de vernalisation nécessaire pour la floraison des nœuds situés les plus bas (GRDC, 2017; Alharbi et al., 2020). Cependant, cette période de vernalisation est courte et facultative puisque la floraison a lieu même en absence de vernalisation (Alharbi et al., 2020). Les féveroles peuvent être soit des plantes de jour long (9,5 -12h de période critique) soit des plantes de jour neutre (Patrick et al., 2010; GRDC, 2017). La floraison débute généralement entre les 5<sup>ème</sup> et 10<sup>ème</sup> nœuds puis les autres étages s'ouvrent successivement en terminant par le haut de la plante (GRDC, 2017; Alharbi et al., 2020). Seulement 10 à 30% de ces fleurs se transforment ensuite en gousses (Alharbi et al., 2020). La floraison dure longtemps, de sorte que les premières gousses à la base de la plante sont formées alors que la floraison est toujours en cours. De même, par après, ces premières gousses sont matures et risquent de s'ouvrir alors que les gousses supérieures sont encore en phase de remplissage (Patrick et al., 2010).

Après une courte période de latence, la phase de remplissage des grains commence (GRDC, 2017). La graine commence à accumuler rapidement de la matière sèche 25 à 35 jours après la floraison (López-Bellido et al., 2005). Lorsque la matière sèche des cotylédons atteint 40%, l'accumulation de matière sèche décroît fortement (Patrick et al., 2010). Après cette phase de remplissage, la plante entre en sénescence parallèlement au moment où les graines arrivent à

maturité. La maturité est atteinte lorsque les gousses sont noires et que les grains sont assez durs pour ne plus pouvoir être rayés avec l'ongle. La moisson peut débuter à partir de 18% d'humidité, lorsque les tiges sont encore partiellement vertes, le risque d'égrenage augmente lorsque les gousses sont trop sèches (Singh et al., 2016; Cartrysse et al., 2024; Deb et al., 2024).

## **2.4 Intérêt de la culture**

### **2.4.1 Agronomique et environnemental**

Son intérêt agronomique réside d'une part dans le fait qu'elle ne nécessite pas de fertilisation azotée grâce à son association avec des bactéries fixatrices d'azote atmosphérique. De ce fait, elle est un excellent précédent cultural en raison de ses importants reliquats azotés bénéfiques pour la culture suivante. D'autre part, elle permet de diversifier et d'allonger la rotation des cultures, contribuant ainsi à rompre les cycles des maladies et des ravageurs. Par ailleurs, cette diversification de rotation facilite les méthodes de lutte contre les adventices applicables à l'échelle de la rotation (López-Bellido et al., 2005; Lake et al., 2019; Alharbi et al., 2020; Cartrysse et al., 2024). De plus, l'absence de fertilisation azotée sur cette culture et la réduction sur la culture suivante bénéficiant des reliquats permet de réduire la consommation d'énergie fossile et les émissions de gaz à effet de serre. En effet, en comparaison avec des cultures fertilisées avec 160 à 190 kg N/ha, la culture de la féverole permet une réduction des besoins en énergie fossile de 50% et une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 70%. De plus, elle augmente la biodiversité grâce à ses fleurs qui attirent et favorisent l'activité des insectes pollinisateurs et auxiliaires (Cartrysse et al., 2024).

### **2.4.2 Production, débouchés et économie**

La féverole est une légumineuse produisant des graines avec des teneurs élevées en protéines et en énergie utilisée principalement en alimentation animale et humaine (Mínguez et al., 2021; Cartrysse et al., 2024). En 2023, la production mondiale s'est élevée à 6 Mt. Les principaux pays producteurs étaient la Chine (1,7 Mt), l'Éthiopie (1,2 Mt), le Royaume-Uni (0,7 Mt) et l'Australie (0,6 Mt). La surface totale récoltée s'élevait à 2,8 millions d'ha ("FAOSTAT," February-10-2025). En Belgique, la production moyenne entre 2019 et 2023 était de 5100 t avec un rendement moyen de 4,4 t/ha ("Exploitations agricoles et horticoles | Statbel," February-24-2025). Le rendement moyen mondial s'élevait à 2.18 t en 2023 ("FAOSTAT," February-10-2025). Au cours des 50 dernières années, la production mondiale de féverole a diminué de 56%. Cela peut s'expliquer notamment par l'instabilité de son rendement, l'utilisation de variétés peu adaptées à leur environnement, la sensibilité aux stress (abiotique et biotique), la monoculture extensive de céréales et l'utilisation d'engrais chimiques ainsi que les facteurs antinutritionnels contenus dans ses graines (Gela et al., 2023). En Europe, sa productivité est similaire voire supérieure à celle du pois (*Pisum stivum*) faisant de la féverole une des espèces les plus performantes parmi les légumineuses à graines (Cernay, 2016).

Même si elle est utilisée pour l'alimentation humaine dans les pays en développement situés majoritairement en Asie et en Afrique (Duc, 1997; Singh et al., 2016), la part de la production destinée à l'alimentation humaine est seulement d'environ 15%. Cela est dû à la présence de facteurs antinutritionnels et à un goût désagréable. Cependant, elle pourrait être utilisée sous forme de farine pour produire des pâtes, des produits sans gluten etc, ou entrer dans la composition de certaines boissons. Il y a également un intérêt croissant pour la production industrielle d'isolats et de concentrés de protéines de féverole pour une utilisation notamment en tant que substitut de viande et de produits laitiers (Punia Bangar et al., 2022).



En occident, elle est donc principalement utilisée pour l'alimentation animale (Plūduma-Pauniņa et al., 2019; Punia Bangar et al., 2022). Des groupes variétaux se distinguent selon leur teneur en facteurs antinutritionnels et cela influence leur utilisation (Schneider et al., 2015). Les Ruminants peuvent consommer toutes les variétés de féverole, y compris celles à fleur colorée (riches en tanins) étant donné que ces tanins n'impactent pas la digestibilité des protéines dans le rumen (Schneider et al., 2015; Cartrysse et al., 2024). Chez les monogastriques, leur présence entraîne une baisse de la digestibilité des protéines. Il est donc préférable d'utiliser des variétés à fleurs blanches sans tanins pour l'alimentation des porcs. De même, la vicine et la convicine entraînent une diminution du poids des œufs en élevage de poules pondeuses. Des variétés à faible teneur en vicine et convicine sont donc utilisées (Schneider et al., 2015; Cartrysse et al., 2024).

Cependant, L'union européenne a changé de stratégie pour rendre l'agriculture plus durable (Schmaucks, 2022) et dans le cadre d'un soutien couplé de la PAC 2023-2027 en Wallonie, les agriculteurs cultivant des protéagineux peuvent bénéficier d'une aide de 375€/ha (Cartrysse et al., 2024). La marge brute (y compris les aides PAC) de la féverole atteint environ 680 €/ha, ce qui reste relativement faible en comparaison du froment par exemple dont la marge brute est d'environ 850 €/ha (Ercoli et al., 2022).

## 2.5 Etude de l'élaboration du rendement

Chez les plantes à graines, Reynolds et al (2022) étudie l'élaboration du rendement selon deux grandes approches, différentes mais complémentaires : la matière sèche et les composantes du rendement (figure 6).

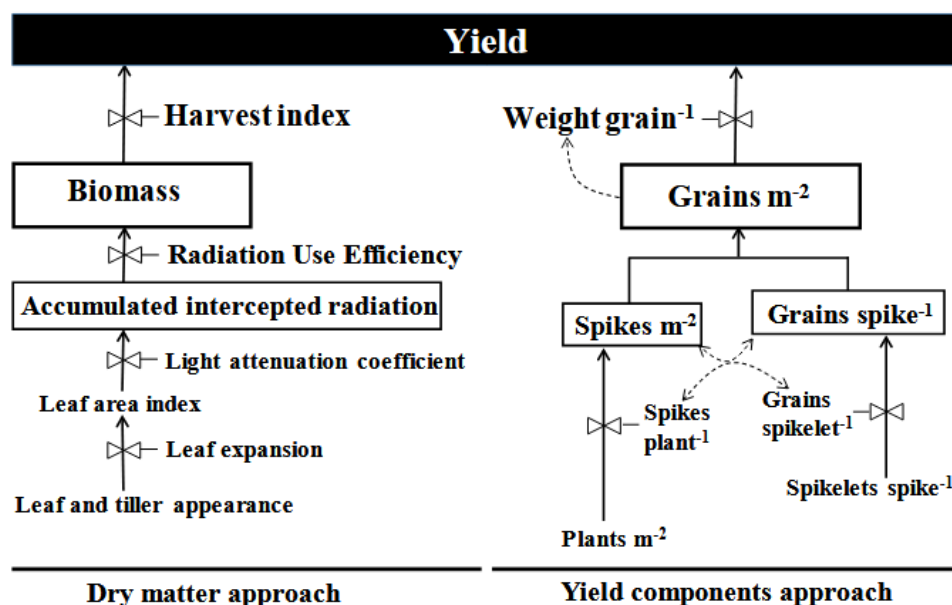


Figure 6: Approches conceptuelles pour l'étude de l'élaboration du rendement (Reynolds et al., 2022).

Ces approches, utilisées en sélection variétale, sont adaptées à notre cas d'étude car elles se basent sur des caractères mesurables à partir d'un essai en champ. Elles permettent de comprendre la façon dont la plante utilise ses ressources et de cibler les traits favorisant le potentiel de production.

Toutefois, chacune de ces deux approches présente des limites, la première suggère que le rendement dépend principalement de la force source de la plante (photosynthèse permettant de produire de la biomasse). Or le rendement ne peut pas être amélioré en augmentant la croissance et la biomasse sans augmentation en parallèle de la force puits (capacité de stockage dans les organes reproducteurs principalement) qui n'est prise en compte que de manière implicite par l'indice de récolte dans cette approche. À l'inverse, la deuxième approche suggère, quant à elle, que le rendement est uniquement limité par la force puits et ne prend pas en compte les limitations possibles par la force source de la plante (Reynolds et al., 2022). Dans ce TFE, ces deux approches sont étudiées simultanément (en mettant l'accent sur les composantes de rendement) afin de combler les lacunes de chacune.

### **2.5.1 Approche du rendement par la matière sèche**

Cette première approche est basée sur la biomasse, à partir de laquelle le rendement est obtenu en la multipliant par l'indice de récolte (Reynolds et al., 2022). La production de biomasse dépend de l'activité photosynthétique des feuilles (dépendant elle-même du LAI, de la radiation solaire, de la température et des précipitations) (Schmaucks, 2022). Les plantes sont en concurrence pour l'eau, la lumière et les nutriments. Parmi ces ressources, celle qui impacte le plus le rendement est la radiation solaire photosynthétiquement active interceptée par la culture. En effet, l'accumulation de matière sèche par la plante augmente linéairement avec celle-ci (López-Bellido et al., 2005).

Il semble y avoir un consensus sur le fait que la biomasse de la plante et la force puits des grains ou le nombre de puits jouent un rôle essentiel pour l'élaboration du rendement car ils influencent la quantité de biomasse qui est accumulée dans les graines et donc le rendement (López-Bellido et al., 2005; Etemadi et al., 2018; Alharbi et al., 2020; Papastylianou et al., 2021; Schmaucks, 2022). Cependant, l'humidité et la température impactent la relation complexe qui existe entre la biomasse et le rendement. Une croissance végétative excessive entraîne une baisse de rendement (Manning et al., 2020).

La biomasse et sa distribution dans les organes puits est donc liée directement au rendement (Schmaucks, 2022). Durant la phase végétative, la proportion de la biomasse contenue dans les tiges et les feuilles est équivalente puis la part d'hydrates de carbone alimentant les tiges augmente lors de la formation des gousses (Alharbi et al., 2020). La féverole accumule 2/3 de sa biomasse totale avant la fin de la floraison. La biomasse diminue au cours de la sénescence. Durant la phase reproductive, des compétitions entre différents organes se mettent en place. Premièrement, pendant la floraison il y a une compétition entre la croissance végétative et les fleurs ainsi que les jeunes gousses en formation. À partir de la mi floraison, les gousses d'une même inflorescence entrent également en compétition. Ces compétitions vont influencer le taux d'avortement des fleurs et donc le nombre de gousses/tige. Ensuite, pendant le remplissage des grains, il y a une concurrence entre les gousses, celles situées le plus bas et le plus haut bénéficiant de moins d'assimilats (Alharbi et al., 2020; Schmaucks, 2022).

À maturité, la biomasse aérienne varie entre 8,2 et 8,6 t/ha avec une concentration en azote comprise entre 2,3 et 3,2%. La quantité d'azote dans la biomasse aérienne est donc comprise entre 224 et 268 kg/ha. La biomasse racinaire à maturité est de 4,6 t/ha. Le rapport appareil racinaire sur appareil aérien est de 0,55 à maturité (Turpin et al., 2002). Ces biomasses aériennes et souterraines sont donc liées et leur répartition peuvent varier en fonction des conditions environnementales rencontrées. Par exemple, la proportion de biomasse souterraine augmente en cas de stress hydrique ou de carence en nutriment (Alharbi et al., 2020). La quantité d'azote



contenue dans l'appareil racinaire est de 66 kg/ha et le pourcentage d'azote contenu dans l'appareil racinaire par rapport à la quantité d'azote totale contenue dans la plante est de 21%. Mais selon d'autres études, cette proportion pourrait être plus élevée : entre 27 et 40% (Turpin et al., 2002).

L'indice de récolte mesure l'efficacité avec laquelle la plante transloque ses assimilats vers les graines. Cet indice peut varier en fonction de la densité de semis, la fertilisation, la date de semis et la variété (López-Bellido et al., 2005). Un excès d'eau peut également favoriser la croissance végétative au détriment des grains entraînant une baisse de l'indice de récolte (López-Bellido et al., 2005; Manning et al., 2020). L'indice de récolte maximal de la féverole est d'environ 50% mais il varie généralement entre 35 et 41% (López-Bellido et al., 2005; Etemadi et al., 2018).

### **2.5.2 Approche du rendement par ses composantes**

Selon cette approche, l'élaboration du rendement peut être étudiée en décomposant la mise en place de ses composantes. Il est possible d'établir une équation du rendement sur base des composantes trouvées dans la littérature scientifique (López-Bellido et al., 2005; Chaieb et al., 2011; Ali Mohamed Osman et al., 2013; Schmaucks, 2022):

$$\text{Rendement} = \text{Plantes/m}^2 \times \text{Tiges/plante} \times \text{Gousses/tige} \times \text{Grains/gousse} \times \text{Poids de 1 grain}$$

Rem : Il est possible de détailler cette équation en ajoutant le nombre de nœuds portant des gousses par tiges et le nombre de gousses par nœud. Il est également possible d'en regrouper certaines et d'utiliser alors le nombre de gousses ou de grains par plante.

Il existe des phénomènes de compensation entre ces composantes. L'augmentation d'une des composantes de rendement va réduire la valeur d'une ou de plusieurs composantes s'établissant par après et inversement afin de maximiser l'efficacité d'utilisation des ressources disponibles à chaque étape du développement de la plante (López-Bellido et al., 2005). La plasticité du nombre de grains est plus élevée que celle du PMG (Sandaña et al., 2019). Les composantes de rendement s'établissent dans l'ordre de l'équation et la plasticité phénotypique permettant la capacité de compensation diminue au fur et à mesure de la mise en place des composantes de rendement (Lenoir et al., 2023).

Les composantes les plus importantes pour l'élaboration du rendement sont la densité de plantes, le nombre de gousses/plante et le nombre de grains/gousse ainsi que le poids des grains. La taille, le poids des grains étant stable, c'est le nombre de grains/m<sup>2</sup> qui est la composante impactant le plus le rendement et qui regroupe les trois composantes citées ci-dessus (Schmaucks, 2022). Cependant, selon Alharbi et al. (2020), les avis divergent concernant la composante ayant le plus grand impact sur le rendement. Selon certaines sources, ce serait le nombre de gousses/plante, selon d'autres ce serait le nombre de graines/plante ou encore le nombre de gousses/m<sup>2</sup> (Alharbi et al., 2020; Schmaucks, 2022).

Le rendement est également significativement corrélé avec le nombre de pousses latérales par plante (Chaieb et al., 2011; Ali Mohamed Osman et al., 2013; Kumar et al., 2017). Mais selon Alghamdi (2007) cette corrélation est significativement négative (figure 7). La corrélation entre le rendement et le nombre de gousses/plante ainsi que le nombre de grains/gousse est significativement positive (Chaieb et al., 2011; Kumar et al., 2017). Enfin, la valeur de la corrélation entre le rendement et le PMG varie selon les études : elle peut être significativement

négative (Alghamdi, 2007), non significative (Papastylianou et al., 2021) ou significativement positive (Kumar et al., 2017; Wafa et al., 2022).

La période reproductive est l'étape la plus déterminante pour le rendement. Cette période de 1 à 3 semaines après la floraison durant laquelle plus de 70% des gousses sont formées constitue le moment où la sensibilité de la féverole aux facteurs de stress est maximale (Alharbi et al., 2020). Cette période de sensibilité à la disponibilité des assimilats est plus longue que pour les céréales car la formation des premières gousses commence alors que les étages supérieurs commencent seulement à fleurir. La période critique pour l'établissement du nombre de grains des légumineuses à graines se situe en grande partie après la floraison alors qu'elle est située majoritairement avant la floraison pour les céréales (Sandaña et al., 2019). L'avortement des fleurs et des gousses est l'une des raisons principales expliquant l'instabilité des rendements (Nachi et al., 1996).

	Flowering date	Maturity date	Plant height	No. of branches/plant	Number of pods/plant	Number of seeds/plant	Seed weight/plant	100-seed weight	Biological yield (t/ha)
Maturity date	0.819**								
Plant height	-0.005	0.040							
No. of branches/plant	0.781**	0.749**	0.175						
Number of pods/plant	-0.713**	-0.460**	0.463**	-0.376*					
Number of seeds/plant	-0.651**	-0.389*	0.442**	-0.283	0.857**				
Seed weight/plant	-0.290	-0.032	0.440**	0.025	0.659**	0.823**			
100-seed weight	0.795**	0.643**	-0.066	0.580**	-0.600**	-0.556**	-0.202		
Biological yield (t/ha)	-0.269	0.147	-0.097	0.054	0.368*	0.472**	0.469**	-0.250	
Seed yield (t/ha)	-0.691**	-0.437**	-0.261	-0.446**	0.491**	0.546**	0.354*	-0.540**	0.548**

\* and \*\* indicate significant at 0.05 and 0.01 level of probability, respectively.

Figure 7: Tableau de corrélation entre les composantes de rendement et d'autres caractéristiques (Alghamdi, 2007).

Rem : D'autres tableaux de corrélation sont disponibles en annexe 1.

## 2.6 Effet de l'interaction des facteurs génotypiques, environnementaux et des techniques culturales sur le rendement

L'expression du phénotype de la féverole résulte de l'interaction entre les facteurs génotypiques (G)(variétés), environnementaux (E) et les techniques culturales utilisées (M). Ces éléments influencent directement l'élaboration du rendement et ses composantes ( $p = G \times E \times M$ ). Dans ce travail, le facteur d'intérêt est le génotype, étudié à travers un essai comparant différents cultivars d'hiver, tandis que les autres facteurs restent constants pour toutes les variétés analysées.

### 2.6.1 Facteurs génotypiques

De nombreuses variétés de féverole existent, le choix variétal joue un rôle clé dans le rendement et doit être fait en fonction du contexte pédoclimatique et de la destination finale de la production. Le génotype influence significativement la biomasse, le PMG, la précocité, le nombre de grains et de gousses/plante et le rendement (Papastylianou et al., 2021). Il explique entre 4,2% et 10,7% de la variance du rendement en grains (Arya et al., 2022; Gela et al., 2023).

Cela peut paraître relativement faible mais l'influence de l'interaction entre le génotype et l'environnement est plus élevée. Celle-ci varie entre 9,5 et 32,9% selon Gela et al. (2023) et Arya et al. (2022) respectivement.

Selon la composante de rendement étudiée, l'influence du facteur génotypique est plus ou moins importante. L'héritabilité au sens large des caractéristiques mesurées peut être calculée en divisant la variance génotypique par la variance phénotypique (Sharifi, 2015). Au plus la valeur de l'héritabilité est élevée, au plus la sélection sur base de ce critère aura un grand impact sur l'amélioration de cette caractéristique, au plus le gain génétique sera élevé. Cette possibilité d'amélioration des caractéristiques par la sélection est liée au fait que les traits dont l'héritabilité est élevée sont liés à des gènes additifs (Alghamdi, 2007; Sharifi, 2015). L'héritabilité des différentes composantes de rendement varie entre les valeurs suivantes : 37-65,1% pour le nombre de tiges/plante ; 24,6-69% pour le nombre de gousses/tige, 68-99,9 % pour le nombre de grains/gousse, 36,2-99% pour le PMG et enfin 6,6-90,6% pour le rendement en grains. L'héritabilité d'autres paramètres a également été calculée : 51,6–83% pour la hauteur ; 97 - 99,9% pour la date de floraison ; 90,5-97% pour la date de maturité ; 24-96% pour le nombre de gousses/plante ; 10,6-95,7% pour le nombre de grains/plante. La tendance générale montre des valeurs d'héritabilité modérées à élevées pour la précocité (dates de floraison et de maturité), le PMG et le rendement en grains tandis que ces valeurs sont généralement plus faibles pour les nombres de tiges et de gousses. Cependant, les grandes variations d'héritabilité entre les différentes études sont dues au fait que les valeurs varient selon les variétés utilisées pour les essais et les conditions environnementales dans lesquelles ces essais sont réalisés, celles-ci peuvent donc varier d'année en année (Toker, 2004; Alghamdi, 2007; Sharifi, 2015).

Le nombre de pousses latérales par plante semble être en partie dépendant du génotype aussi (Chaieb et al., 2011; Etemadi et al., 2018). Même si cette caractéristique semble être avantageuse car elle est directement liée au nombre de tiges par plante qui est une composante de rendement, celle-ci ne doit pas être considérée comme un critère de sélection positif étant donné que ces pousses latérales produisent moins que les tiges principales (Etemadi et al., 2018).

Il a été démontré dans plusieurs études que le nombre de grains/gousse est également déterminé par le génotype (Chaieb et al., 2011). Même s'il est également influencé par d'autres facteurs (compétition pour la lumière et l'eau, densité de plantes) celui-ci est davantage influencé par la variété que par les conditions environnementales (López-Bellido et al., 2005).

Le poids de 1000 grains est également principalement déterminé par le génotype. Cependant, l'influence de celui-ci est un peu moins grande que pour le nombre de grains/gousse puisqu'il est fixé à la fin du cycle et peut être réduit en cas de stress hydrique pendant la période de remplissage des grains (López-Bellido et al., 2005). Les rendements des variétés du type *equina* seraient plus élevés que ceux du type *minor* de par leur poids des grains plus élevé (López-Bellido et al., 2005; Ali Mohamed Osman et al., 2013). Cependant, selon Schmaucks (2022), cette relation est erronée et des rendements équivalents peuvent être atteints avec des variétés produisant des petites graines si les densités de semis sont adaptées.

Les variétés à croissance indéterminée produisent généralement plus que les variétés à croissance déterminée (Nachi et al., 1996; López-Bellido et al., 2005; Mínguez et al., 2021). Le rendement des variétés semi-déterminées est également plus élevé que celui des variétés déterminées (Duc, 1997).

Le génotype influence également le LAI (López-Bellido et al., 2005). Celui-ci est un facteur clé de l'approche par la matière sèche pour l'étude de l'élaboration du rendement car il conditionne la capacité de la plante à intercepter la radiation solaire pour produire de la biomasse.

Enfin, la hauteur est un paramètre dépendant du génotype (Chaieb et al., 2011). Il existe une corrélation significativement positive entre la hauteur et le rendement (Chaieb et al., 2011; Plūduma-Pauniņa et al., 2019). Cependant, certaines études indiquent un impact non significatif (Alghamdi, 2007; Kumar et al., 2017) ou une corrélation négative entre la hauteur et le rendement (Ali Mohamed Osman et al., 2013). Une corrélation positive avec le rendement peut s'expliquer par le fait qu'une plante plus haute possède des tiges plus longues pouvant compter plus de nœuds portant des gousses (Schmaucks, 2022). De plus, une augmentation de la hauteur entraîne une augmentation de la distance entre le sol et la première gousse ce qui diminue le risque de perte lors de la moisson étant donné que les gousses les plus basses sont les plus difficiles à récolter (López-Bellido et al., 2005; Chaieb et al., 2011). La baisse de rendement ou l'impact non significatif observé dans certaines études pourrait s'expliquer par une augmentation de la sensibilité à la verse (López-Bellido et al., 2005; Schmaucks, 2022).

### **2.6.2 Facteurs environnementaux**

Les facteurs environnementaux ont le plus grand impact sur le rendement (Gela et al., 2023). En effet, selon Alharbi et al. (2020) et Gela et al., (2023) ils expliquent respectivement 89% ou 76,6% de la variation du rendement. D'après Papastylianou et al. (2021), ces facteurs environnementaux expliquent 80% de la variation totale des composantes de rendements, excepté le PMG, dont la part de variabilité expliquée par l'environnement est de 49%. Les variations interannuelles de rendement sont très élevées, même lorsque les facteurs de stress biotique sont bien contrôlés. Elles peuvent être expliquées majoritairement par la pluviométrie et les réserves d'eau du sol entre la floraison et la récolte ou par des températures élevées provoquant la sénescence de la plante dans les systèmes irrigués (López-Bellido et al., 2005).

#### **A. Conditions pédoclimatiques optimales de croissance**

Bien que la culture soit possible dans différents types de sol, ceux permettant une croissance optimale sont ceux dont la texture est fine ou moyenne. L'optimum étant les limons riches en argile retenant l'humidité (Singh et al., 2016; Y. BELACHEW et al., 2023; Deb et al., 2024). Son pH optimal est neutre voir légèrement alcalin pour maximiser la fixation d'azote mais elle peut se développer dans une gamme de pH allant de 6 à 9 (Y. BELACHEW et al., 2023; Cartrysse et al., 2024; Deb et al., 2024). Sa plage de température idéale va de 18 à 27°C (Deb et al., 2024). La température idéale pendant la floraison est de 22 à 23° C (Alharbi et al., 2020). La féverole exprime bien son potentiel dans des climats où les précipitations annuelles sont de l'ordre de 650 à 1000 mm (Singh et al., 2016; Deb et al., 2024). Elle est considérée comme la légumineuse la moins résistante à la sécheresse (Singh et al., 2016). En Belgique, les précipitations cumulées ont un impact positif sur le rendement et les besoins en eau sont de 300 mm entre le stade 7 feuilles et la maturité (Cartrysse et al., 2024). Elle est reconnue comme la légumineuse la plus tolérante à l'engorgement en eau du sol même si celui-ci entraîne une baisse de rendement (Punia Bangar et al., 2022).

## B. Stress abiotique

En conditions tempérées, les principaux facteurs limitant le rendement sont les faibles températures, le manque de lumière et l'excès d'eau (López-Bellido et al., 2005). Des températures basses à la fin de l'automne et en hiver peuvent entraîner une augmentation de la mortalité des jeunes plantules et ainsi réduire le nombre de plantes/m<sup>2</sup> (López-Bellido et al., 2005). La disponibilité en eau est le principal facteur affectant le développement des tiges et des feuilles, or, comme le montre la première approche de l'élaboration du rendement, un LAI et une biomasse élevés sont les bases de l'élaboration du rendement (López-Bellido et al., 2005). La capacité d'ajustement osmotique de la féverole est faible, ce qui la rend sensible à la sécheresse (Manning et al., 2020). Le manque de lumière et la compétition pour les photoassimilats au sein de la plante, un excès d'eau, des températures trop basses ou encore des températures trop élevées et un stress hydrique par manque d'eau constituent des conditions peu propices pour la pollinisation et la fructification (López-Bellido et al., 2005). Ce qui risque d'impacter négativement le nombre de gousses/branche et le nombre de grains/gousse. En effet, la féverole est notamment vulnérable aux températures élevées et la chute de certaines fleurs et gousses débute lorsque celles-ci dépassent 29°C (Manning et al., 2020). De même, un manque d'eau après la floraison entraîne une accélération de la sénescence des feuilles et une baisse du poids des graines (López-Bellido et al., 2005). Une sécheresse peut causer des pertes de rendement jusqu'à 79% (Alharbi et al., 2020). En cas de sécheresse, la fixation d'azote atmosphérique est également réduite, la période de sensibilité maximale à ce stress correspond au remplissage du grain (Falconnier et al., 2019).

Ces stress abiotiques vont modifier l'allocation de la biomasse dans les différents compartiments de la plante et modifier les relations sources-puits (Schmaucks, 2022).

## C Stress biotiques

Les stress biotiques peuvent aussi entraîner des pertes de rendement non négligeables (Alharbi et al., 2020).

Les trois principales maladies fongiques affectant la féverole sont l'anthracnose (*Ascochyta fabae*) et le Botrytis (*Botrytis fabae*) en condition humide ainsi que la rouille (*Uromyces viciae-fabae*) si des conditions chaudes et sèches sont rencontrées lors de la floraison (Alharbi et al., 2020; Cartryse et al., 2024; Deb et al., 2024).

La féverole est tolérante à l'*Aphanomyces* (*Aphanomyces euteiches*) (champignon tellurique) causant la pourriture des racines d'autres espèces de légumineuses (Mínguez et al., 2021; Gela et al., 2023; Cartryse et al., 2024).

Des ravageurs peuvent également causer des dégâts. Les larves de sitones (*Sitona lineatus*) consomment les nodosités et les racines tandis que les adultes se nourrissent sur les feuilles. Les pucerons noirs (*Aphis fabae*), pouvant être vecteur de virose, et les pucerons vert du pois (*Acyrtosiphon pisum*) affaiblissent les plantes en consommant la sève. Les Bruches (*Bruchus rufimanus*) sont, quant à elles, responsables de petits trous ronds dans les graines. Les pigeons ramiers (*Columba palumbus*) peuvent aussi causer des dégâts au moment de la levée et à la fin du cycle de la culture. Les corvidés posent également problème lors de l'implantation de la culture et enfin les sangliers peuvent être responsables de pertes importantes dans les régions où ils sont présents (Cartryse et al., 2024).

Le manque d'insectes pollinisateurs peut augmenter le taux d'avortement des fleurs (López-Bellido et al., 2005; GRDC, 2017). L'absence totale de pollinisateurs entraîne une baisse de rendement comprise entre 25 et 49% (Alharbi et al., 2020).

### **2.6.3 Techniques culturales**

Rem : seule la densité de semis est détaillée ici car cette technique influence directement la densité de plantes, première composante de rendement à être établie. La mise en place des composantes suivantes en dépend (López-Bellido et al., 2005). Un résumé des autres techniques culturales couramment utilisées est disponible en annexe 2.

Le choix de la densité de semis est un paramètre important qui va grandement influencer la densité de plantes (sauf en cas de conditions environnementales défavorables entraînant une mauvaise levée ou des pertes de plantes). Cette densité de plantes exerce une influence sur de nombreux paramètres : le développement du couvert végétal et la radiation solaire interceptée, la biomasse, l'évaporation de l'eau du sol, le développement des adventices et des maladies fongiques et virales, la hauteur de la première gousse et le rendement. En effet, cette première composante du rendement impacte également les autres composantes. L'écartement entre les rangs varie généralement entre 10 et 50 cm et n'a pas d'influence sur la croissance et le rendement. Cependant la mortalité des plantules est plus élevée lorsque les écarts entre les rangs sont élevés car pour une même densité de semis, les plantes sont plus proches les unes des autres, il y a donc plus de compétition. Une densité de semis élevée entraîne une augmentation du LAI, de la biomasse, de la hauteur, du taux d'avortement des fleurs et des jeunes gousses. Au contraire, elle entraîne une diminution du nombre de gousses/plante et du nombre de tiges/plante (rem : le nombre de nœuds portant des gousses est plus élevé sur la tige principale puis diminue progressivement sur les pousses latérales selon leur ordre d'apparition) (López-Bellido et al., 2005). Selon Etemadi et al. (2018), il est donc préférable d'augmenter la densité de plantes que de sélectionner des variétés produisant plus de pousses latérales. L'augmentation de la densité de plantes entraîne une augmentation asymptotique du rendement jusqu'à atteindre un plateau voir une baisse de rendement en raison de l'augmentation de la compétition entre les plantes, des maladies, de la verse et de la mortalité des plantes en hiver (López-Bellido et al., 2005).

En Belgique, la densité de semis recommandée est de 25 à 35 grains/m<sup>2</sup> pour les féveroles d'hiver (Cartrysse et al., 2024). Les semis précoces requièrent des densités de semis moins élevées. Toutefois, il est recommandé de semer entre le 25 octobre et le 10 novembre (possiblement jusqu'au 15 décembre) pour éviter un développement trop important avant l'hiver, augmentant la sensibilité au gel (López-Bellido et al., 2005; Cartrysse et al., 2024).

## **3. Objectifs**

L'objectif de ce travail est l'étude de l'impact du choix variétal sur le développement végétal aérien et souterrain de la féverole d'hiver tout au long de son cycle de croissance ainsi que sur l'élaboration du rendement. Cette étude menée selon une approche expérimentale repose sur le suivi de micro parcelles d'essai en champs sur lesquelles diverses mesures ont été réalisées. L'élaboration du rendement est analysée en combinant deux approches complémentaires : les composantes de rendement et la matière sèche. Les relations entre les variables mesurées ont également été analysées. Cette étude permet ainsi de contribuer à identifier les traits variétaux les mieux adaptés au climat et au sol de la Hesbaye.

## 4. Matériel et méthode

### 4.1 Site expérimental

#### 4.1.1 Localisation et type de sol

L'essai variétal a été mis en place par l'université de Liège (Gembloux Agro-Bio Tech, Unité de phytotechnie) et implanté pour la saison culturale 2024-2025 par les équipes de l'université de Liège et du CePiCOP.

La plateforme expérimentale était située à Temploux, (50.497811 ; 4.734581) ("Google Maps," March-14-2025). Le type de sol est Aba 1. Il s'agit donc d'un sol limoneux (A), à drainage naturel favorable (b), avec un horizon B textural (a) et un horizon A mince de moins de 40 cm d'épaisseur (1) (Bah et al., 2005). Ce sol limoneux à drainage naturel favorable est représentatif de la Hesbaye (PCNSW, 2005)



Figure 8 : Image satellite de la zone d'implantation de l'essai, avec superposition de la carte numérique des sols de Wallonie ("WalOnMap | Géoportail de la Wallonie," March-14-2025). Le rectangle vert indique l'emplacement de l'essai.

#### 4.1.2 Conditions climatiques

En Belgique, selon la classification de Köppen, le climat est de type Cfb, ce qui correspond à un climat tempéré avec des hivers doux, des étés frais et des précipitations réparties sur toute l'année (Peel et al., 2007; Eveno et al., 2016). Les précipitations annuelles moyennes sont de 838 mm avec une température moyenne annuelle de 10,9°C ("IRM - Climatogrammes periode 1991-2020," July-18-2025). Comme le montre la figure 9, la saison culturale de la féverole d'hiver a débuté par un automne relativement chaud et humide. L'hiver a ensuite été humide tandis que la moyenne des températures de la saison (4,2° C) était très proche de la normale (4,1°C) ("IRM - Hiver," July-19-2025; "2025 – Livre Blanc Céréales," 2025). Le printemps a, quant à lui, été très sec avec des températures supérieures aux normales de saison (11,8°C pour une normale de 10,5°C) ("IRM - Printemps," July-19-2025). En effet, à Gembloux, la pluviométrie ne s'est 'élevée qu'à 5,4 mm en mars ; 23,7 en avril ; 33,8 en mai et 44,5 en juin ("Agromet.be," July-19-2025).

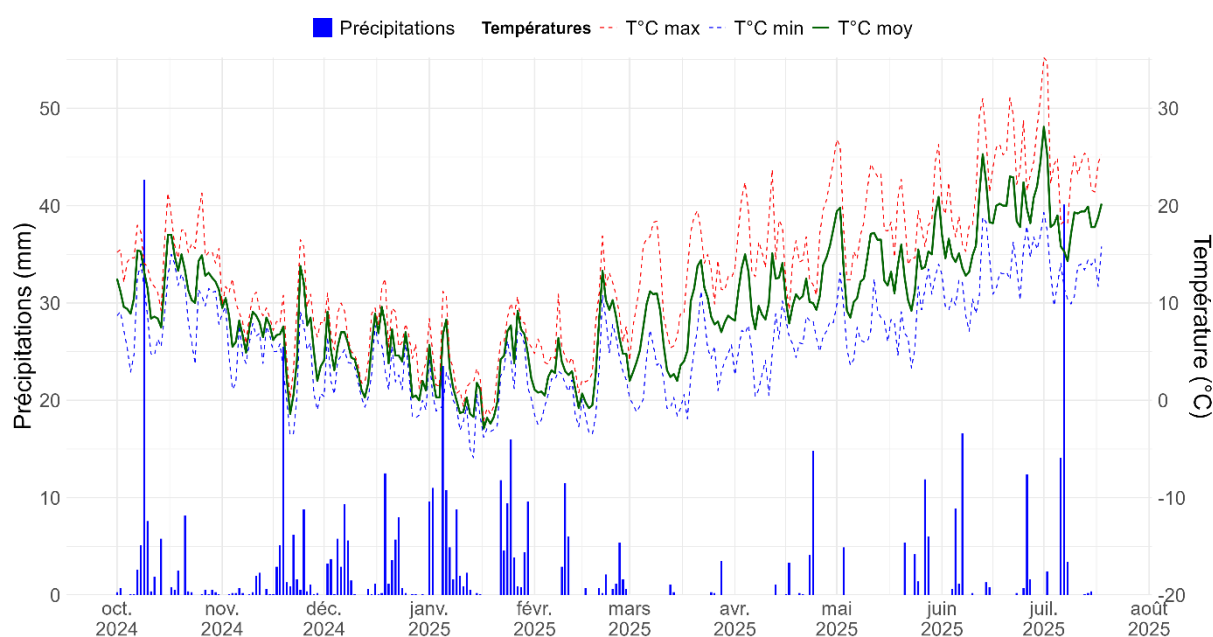


Figure 9 : Graphique de l'évolution des températures et des précipitations du 1-10-24 au 18-07-25 à Gembloux ("Agromet.be," July-19-2025).



## 4.2 Dispositif expérimental

### 4.2.2 Plan de l'essai

Le dispositif expérimental (figure 10) utilisé pour l'essai est un bloc aléatoire complet. Il compte 24 micro-parcelles de 8 x 2 m réparties en 4 blocs (A, B, C et D) de 6 parcelles. Il y a 6 objets (5 variétés + 1 mélange féveroles-pois) et 4 répétitions. L'interligne est de 12,5 cm.

Rem : Les mélanges féveroles-pois présents dans l'essai ne sont pas étudiés dans le cadre de ce TFE.

		28	29	30	31	32	33	34	35
	1100	1128-7	1129-7	1130-7	1131-7	1132-7	1133-7	1134-7	1135-7
D	1000	1028-7	1029-9 NAIROBI	1030-7 AUGUSTA	1031-F9P14 NAIROBI- ASTEROID	1032-12 CURLEW	1033-5 GLALICE	1034-1 DIVA	1035-7
C	900	928-7	929-7 AUGUSTA	930-12 CURLEW	931-1 DIVA	932-9 NAIROBI	933-F9P14 NAIROBI- ASTEROID	934-5 GL ALICE	935-7
B	800	828-7	829-5 GL ALICE	830-F9P14 NAIROBI- ASTEROID	831-12 CURLEW	832-1 DIVA	833-7 AUGUSTA	834-9 NAIROBI	835-7
A	700	728-7	729-1 DIVA	730-9 NAIROBI	731-5 GL ALICE	732-7 AUGUSTA	733-12 CURLEW	734-F9P14 NAIROBI- ASTEROID	735-7
	600	628-7	629-7	630-7	631-7	632-7	633-7	634-7	635-7

Légende:	
	Bordure
	Féverole d'hiver
	Mélange féveroles-pois
xxx(x)-y	N° Parcelle-variété

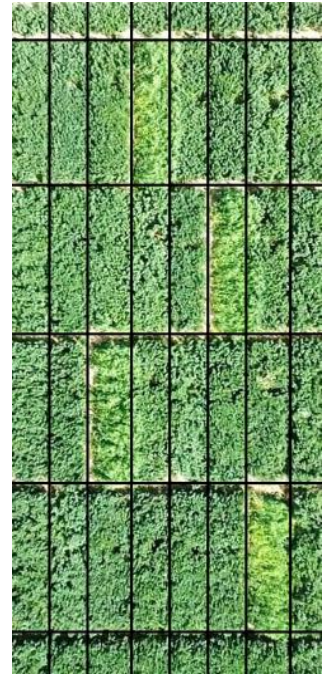


Figure 10 : Plan et photo aérienne de l'essai.

### 4.2.2 Facteur étudié : Choix variétal

Les caractéristiques agronomiques et technologiques des 5 variétés étudiées sont présentées dans le tableau 2 ci-dessous.

*Tableau 2: Caractéristiques agronomiques et technologiques des 5 variétés étudiées.*

Nom	DIVA	GL ALICE	Nairobi	Curlew	AUGUSTA
Obtenteur	Agri Obtentions	SGZ	Agri Obtentions	NPZ	NPZ
Pays d'inscription	France	Autriche	France	France	Allemagne
Année d'inscription	2001	2017	2021	2023	2018
Précocité à floraison	1/2 précoce	Tardive	1/2 tardive	1/2 précoce	Intermédiaire
Précocité à maturité	1/2 précoce	Tardive-Intermédiaire	1/2 tardive	1/2 tardive	Intermédiaire
Hauteur	Moyenne	Haute	Moyenne-Haute	Faible-Moyenne	Moyenne-113 cm
Sensibilité à la verse	Assez tolérante	Tolérante	Très tolérante	Assez tolérante	Très tolérante
Tolérance au froid	Tolérante	Tolérante	Moyennement tolérante	Moyennement tolérante	Tolérante
Sensibilité au botrytis	n.d.	Peu sensible	Peu sensible	Peu sensible	n.d.
Sensibilité à la rouille	n.d.	Très peu sensible	Moyennement tolérante	Moyennement sensible	n.d.
Sensibilité à l'ascochytose/antrachnose	Peu sensible	n.d.	Peu sensible	Peu sensible	n.d.
Coloration des fleurs	Colorées	Colorées	Colorées	Colorées	Colorées
Teneur en vicine-convicine	Elevée	n.d.	Elevée	Elevée	Elevée
Teneur en protéines	Faible	Faible-moyenne	Elevée	Faible-Moyenne	Moyenne
PMG	450-500 g	>550 g	>550 g	>550 g	Moyen-540 g

rem : Un tableau plus complet avec le détail des sources est disponible en annexe 3.

### 4.2.3 Itinéraire technique

L'essai a été mené sous une conduite culturale conventionnelle. L'itinéraire technique est synthétisé dans le tableau 3.

*Tableau 3: Itinéraire technique.*

Intervention	Date	Stade BBCH	Produit utilisé	Dose
Semis	07-11-24	/	/	35 grains/m <sup>2</sup>
Herbicide	08-11-24	01	Challenge Stomp Aqua	1,5 L/ha 1,8 L/ha
Fongicide	12-05-25	65	Chamane SC	1 L/ha
Insecticide	19-05-25	65	Evure	0,2 L/ha
Fongicide	02-06-25	69	Scala	1,5 L/ha
Insecticide			Pirimor	0,4 Kg/ha
Récolte	19-07-25	93	/	/

## 4.4 Observations et variables mesurées

### 4.4.1 Synthèse des mesures

Le tableau 4 synthétise les mesures réalisées sur l'essai. Il reprend le type de mesure, ainsi que le(s) stade(s) au(x)quel(s) la mesure a été réalisée, et les modalités de son implémentation.

Tableau 4: Synthèse des mesures réalisées.

Mesure	Date et stade BBCH							Nbr ovbservations/parcelle
	05-02-25	26-02-25	09-04-25	18-04-25	12-05-25	16-06-25	14-07-25	
	12	13	50	55	65	75	89	
Stade phénologique	x	x	x	x	x	x	x	15 plantes
Biomasse des tiges				x	x	x	x	1 (0,25 m²)
Biomasse des feuilles				x	x	x	x	1 (0,25 m²)
Biomasses des gousses						x	x	1 (0,25 m²)
Biomasse des grains						x	x	1 (0,25 m²)
Taux d'azote des tiges				x	x	x		1
Taux d'azote des feuilles				x	x	x		1
Taux d'azote des gousses						x		1
Taux d'azote des grains						x		1
LAI-Indice de surface foliaire				x	x			1( 1ligne de semis * 0,5m)
Biomasse des racines				x	x			2 plantes /parcelle
Nombre de nodules/plante				x	x			2 plantes /parcelle
Biomasse tiges + feuilles*				x	x			2 plantes /parcelle
Sol : Teneur en C organique		x			x			5 prélèvements mélangés
Sol : Teneur en N-NO <sub>3</sub>		x			x		x	5 prélèvements mélangés
Sol : Teneur en N-NH <sub>4</sub>		x			x		x	5 prélèvements mélangés
Sol : Teneur en N total		x			x			5 prélèvements mélangés
Sol : Teneur en P		x						5 prélèvements mélangés
Sol : Teneur K		X						5 prélèvements mélangés
Nombre de plantes/m²	x		x	x		x	x	3 (BBCH 12 et 50), 1 (BBCH 55,75 et 89)
Nombre de tiges/m²					x	x	x	1 (0,25 m²)
Nombre de tiges/plante						x	x	1 (0,25 m²)
Nombre d'étages/tige					x	x		1 (0,25 m²)
Hauteur			x	x	x	x	x	2
Nombre de fleurs/m²					x			1 (0,25 m²)
Nombre de fleurs/tige					x			1 (0,25 m²)
Nombre d'étages en fleur/tige					x			1 (0,25 m²)
Nombre de fleurs/étage en fleur					x			1 (0,25 m²)
Nombre de gousses/m²						x	x	1 (0,25 m²)
Nombre de gousses/tige						x		1 (0,25 m²)
Nombre d'étages avec des gousses/tige						x		1 (0,25 m²)
Nombre de gousses par étage portant des gousses						x		1 (0,25 m²)
Nombre de grains /m²						x	x	1 (0,25 m²)
Nombre de grains/gousse						x		15 gousses
Poids de 1000 grains						x	x	1
Rendement grain							x	1 (parcelle entière moissonnée)

\* = des plantes dont la biomasse racinaire à été mesurée

#### 4.4.2 Stades phénologiques

Les stades phénologiques ont été observés à intervalles réguliers de une à trois fois par semaine selon la phase de développement. L'identification des stades a été réalisée sur base de l'échelle BBCH (disponible en annexe 4). Lorsque les stades clés définis préalablement pour les observations ont été atteints, celles-ci ont été réalisées.

#### 4.4.3 Biomasse aérienne (tiges, feuilles, gousses, grains)

Ces biomasses ont été mesurées à partir de prélèvements réalisés sur une surface de 0,25 m<sup>2</sup> (50x50 cm ou 4 lignes x 50 cm). Il y a eu un prélèvement par stade clé prédéfini et par micro parcelle. Une fois prélevées, les tiges, les feuilles et les gousses ont été séparées. Une fois séparés les différents échantillons ont été placés dans des sachets en plastique microperforé perméable. Ces sachets ont été placés dans une étuve à une température de 65°C pendant 4 à 5 jours puis ont été pesés avec une balance de précision une fois sec.



*Figure 11: Photos de gauche à droite : prélèvement, décorticage avec feuille de comptage, étuve, balance de précision.*

#### 4.4.4 Taux d'azote (tiges, feuilles et gousses)

Afin d'analyser la teneur en azote, un pré-broyage a d'abord été effectué à l'aide d'un broyeur à marteau avec une grille dont le diamètre des trous est de 2 mm. Ensuite, un deuxième broyage a été effectué avec un broyeur de laboratoire FOSS CT 293 Cyclotec™ équipé d'une grille avec des trous de 1mm. La teneur en azote a ensuite été analysée par Infrarouge au CRA-W.



Figure 12 : a et b: broyeur pour le pré-broyage; c et d: broyeur de laboratoire; e: résultat du broyage.

#### 4.4.5 LAI

Les prélèvements pour le LAI ont été réalisés sur une ligne de semis de 50 cm de long. Les feuilles ont ensuite été séparées des tiges et collées sur des feuilles de dimension A3. Ces feuilles ont ensuite été scannées à l'aide d'une imprimante RICOH IM C2500 en couleur avec une résolution de 300 DPI et au format JPG. Les scans (annexe 5) ont ensuite été analysés à l'aide de Rstudio et du package EBImage. Une fonction a été utilisée pour détecter et compter les pixels verts et ainsi distinguer les feuilles photosynthétiquement actives, de la feuille blanche et des feuilles sénescentes. Ainsi, un pixel est considéré comme étant vert à condition que ce pixel soit :

- plus vert que rouge + un seuil ( $\text{vert} > \text{rouge} + \text{seuil}$  )
- plus vert que bleu + un seuil ( $\text{vert} > \text{bleu} + \text{seuil}$  )



le seuil est fixé à 0,05 sur base des graphiques de distribution de nombre de pixels en fonction de leur quantité de vert moins leur quantité de rouge ou de bleu (figures 13 et 14).

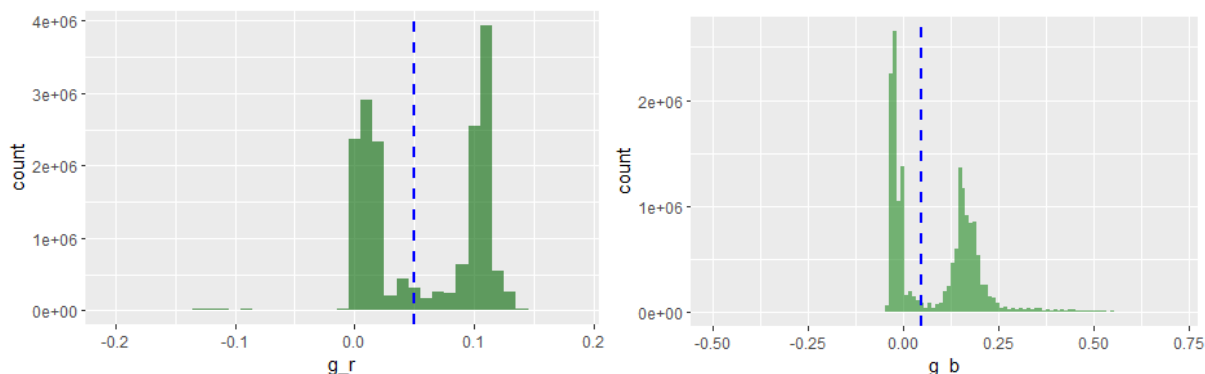


Figure 13 : Distribution du nombre de pixels selon leur teneur en vert moins leur teneur en rouge à gauche et selon leur teneur en vert moins leur teneur en bleu à droite.

Après l'ajustement de ces seuils sur base des graphiques, ceux-ci ont été validé en comparant les images en noir et blanc générées sur base de la détection des pixels verts et les scans originaux. Le LAI de chaque échantillon prélevé a ainsi pu être déterminé en multipliant le nombre de pixels verts par la surface d'un pixel.

Surface d'un pixels :  $(1 \text{ pouce})^2 / (\text{résolution en DPI})^2 = (0.0254)^2 / (300)^2 = 7,17 * 10^{-9} \text{ m}^2$

$$\text{LAI} = \text{Indice de surface foliaire} = \frac{\sum \text{pixels verts} * \text{surface d'un pixel}}{\text{Nombre de plantes prélevées}} * \text{Densité de plantes}$$



Figure 14 : De gauche à droite : collage des feuilles; scan 300 dpi jpg; scan en noir et blanc : blanc = pixel considéré comme vert, noir = pixel non pris en compte pour la mesure de la surface foliaire.

#### 4.4.6 Biomasse racinaire et comptage des nodules

La biomasse racinaire a été évaluée aux stades 55, 65 et 89 par des prélèvements de deux plantes par parcelle, soit 8 plantes par modalité.

Les racines ont été prélevées à la bêche en découpant un bloc de terre de 20\*20\*20 cm. Ces blocs de terre avec les plantes entières ont ensuite été placés dans des bacs avec de l'eau afin

d'humidifier la terre pour qu'elle se détache plus facilement des racines sans les casser. Les racines ont ensuite été nettoyées à l'aide d'un jet d'eau sur une grille. Puis, les comptages du nombre de nodules/racine ont été réalisés aux stades BBCH 55 et 65. Enfin, les tiges feuillées ont été séparées des racines et les deux parties de la plante ont été placées dans des sacs perméables puis dans l'étuve à 60°C pendant 4 à 5 jours pour peser la masse sèche des deux parties avec une balance de précision.



*Figure 15 : a et b : prélèvement, c : trempage, d : nettoyage, e:comptage.*

#### 4.4.7 Analyse de sol

A la sortie de l'hiver, des échantillons de sol ont été prélevés sur l'ensemble de l'essai afin d'évaluer le profil azoté (3 horizons : 0-30 ; 30-60 ; 60-90cm) en début de cycle de végétation pour la féverole.

Ensuite, au stade mi-floraison (65) et en post-récolte (89), les échantillonnages de sol ont été réalisés sur toutes les micro-parcelles de l'essai, à raison de 5 échantillons/parcelle pour étudier l'influence du choix variétal sur l'azote nitrique et ammoniacal dans le premier horizon. Tous ces échantillons ont été analysés au centre provincial de l'agriculture et de la ruralité (membre de REQUASUD) à la Hulpe.



*Figure 16 : prélèvement des échantillons de terre.*

#### 4.4.8 Densité et comptage de plantes, tiges, fleurs, gousses et grains.

La densité de plantes et tiges ainsi que le nombre de tiges/plante ont été mesurés tout au long du cycle depuis la levée, en passant par des stades clés tels que le stade boutons floraux (BBCH 55), la floraison (BBCH 65), le remplissage (BBCH 75) jusqu'à récolte (BBCH 89), à l'aide de quadrat de 0,25m<sup>2</sup> sur chaque micro-parcelle (voir synthèse des mesures réalisées tableau 4).

Aux stades floraison et mi-remplissage, respectivement les comptages de fleurs/m<sup>2</sup> et de gousses/m<sup>2</sup> ont été réalisés sur chaque tige du quadrat de biomasse prélevée, ainsi que le nombre d'étages/tige, nombre d'étages en fleur (ou de gousses)/tige, nombre de fleurs (ou de gousses)/tige, nombre de fleurs (ou de gousses)/étage portant des fleurs (ou des gousses).

Quant aux grains, avant le décortiquage des gousses, le nombre de grains par gousse a été compté sur 15 gousses par parcelle sélectionnée aléatoirement au stade BBCH 75. Ensuite, les gousses de l'ensemble du prélèvement de biomasse aux stades BBCH 75 et 89 ont été décortiquées manuellement. Après avoir été tamisés afin de retirer les petites impuretés, ces grains ont été comptés pour déterminer le nombre grains/m<sup>2</sup> et le PMG. Le comptage a été réalisé à l'aide d'un compteur de grains tripette & renaud NUMIGRAL II.





Figure 17: a: plante en fleur, b: tige avec des gousses, c: gousse ouverte, d: tamisage, e: comptage des grains.

#### 4.4.9 PMG

Le PMG a été calculé selon la formule suivante afin de le déterminer pour une humidité de 15% :

$$15\% : \frac{(biomasse\ des\ grains * (100/85))}{nombre\ de\ grains} * 1000$$

#### 4.4.10 Rendement grain

Le rendement en grains a été déterminé sur base du prélèvement au stade maturité des grains (BBCH 89).

Un rendement batteuse a également été réalisé par le CePiCOP correspondant au rendement parcellaire. Celui-ci a été ajusté en le ramenant à une humidité de 15% en appliquant la formule suivante :

$$\text{Rendement (15\%)} = \text{Rendement} * \left( \frac{100 - \text{Humidité de l'échantillon}}{85} \right)$$



*Figure 18 : Moisson de l'essai.*

#### **4.4.11 Hauteur**

La hauteur a été mesurée à deux répétitions par parcelle. Le matériel utilisé est un carré en aluminium gradué avec un plateau en polystyrène. Le carré gradué est déposé à la surface du sol puis le plateau est placé au sommet des plantes et la hauteur peut être lue sur les graduations.



*Figure 19 : Mesure de la hauteur.*

#### **4.4.12 Manipulation de données**

Teneur en protéine (%) = Teneur en azote (%) \* 6,25

Indice de récolte (%) = Biomasse des grains/Biomasse aérienne totale \* 100

Taux de fécondation (%) = Nbr gousses/m<sup>2</sup> (BBCH 75) / Nbr fleurs/m<sup>2</sup> (BBCH 65)

### **4.5 Analyse statistique**

#### **4.5.1 Analyse univariée**

L'analyse statistique des données mesurées a été réalisée à l'aide du logiciel R (version 4.4.1) via Rstudio. Les résultats ont été analysés sur base d'un modèle LMER avec pour facteur fixe

le choix variétal et pour facteur aléatoire les 4 blocs avec une analyse anova de ce modèle pour obtenir la p-valeur. Cette analyse a été réalisée pour chaque variable à chaque stade où elle a été mesurée. Pour certaines variables à certains stades la variabilité entre les différents blocs était trop faible pour pouvoir utiliser un modèle LMER. Dans ce cas, un modèle LM a été utilisé avec pour seul facteur les variétés.

Les conditions d'applications (normalité et égalité des variances ont été vérifiées à posteriori sur base du modèle à l'aide du package DHARMA. Lorsque ces conditions n'étaient pas respectées, des transformations de variable (log, racine carrée, ...) ont été effectuées, lorsque ces transformations n'ont pas permis de respecter la condition de normalité (ce qui a été le cas pour certains comptages), les données ont alors été analysées sur base d'un modèle GLMER ou GLM (en cas de trop faible variabilité entre les blocs) selon une distribution suivant la loi de Poisson. La condition d'absence de superdispersion (variance = moyenne) a alors été vérifiée et si elle n'est pas vérifiée, une distribution de quasi POISSON a été utilisée. Un test post-hoc a ensuite été réalisé sur base de ces modèles en utilisant la fonction emmeans du package emmeans et la fonction cld du package multcomp. Ce test post-hoc permet de classer dans des groupes différents les variétés présentant des différences significatives pour les mesures réalisées et de générer des lettres permettant de différencier ces groupes.

Rem : avant de réaliser les analyses décrites ci-dessus, un test anova a été effectué pour détecter la présence ou l'absence de différence significative entre les stades pour les variables ayant été observées à plusieurs stades. En cas d'absence de différence significative entre ces stades, les données de ces différents stades ont été regroupées en un seul jeu de données afin d'améliorer la puissance statistique des tests réalisés pour ces variables. Cela a été le cas pour le nombre de plantes/m<sup>2</sup>, le nombre de tiges/m<sup>2</sup> et le nombre de tiges/plante, le nombre de grains/m<sup>2</sup> ainsi que pour le nombre de nodules/plante.

#### **4.5.2 Analyse multivariée**

Une analyse des corrélations entre les différentes variables mesurées a d'abord été réalisée à l'aide des fonctions corrplot du package corrplot et ggpairs du package GGally.

Enfin, une analyse en composantes principales a également été réalisée à l'aide du package FactoMineR. Cette analyse a été faite en reprenant les variables qui présentent des corrélations significatives et intéressantes.

Le seuil de significativité utilisé pour toutes les analyses statistiques est de 0,05.

## 5. Résultats et Discussion

### 5.1 Moyennes et groupes des mesures liées à l'approche par la matière sèche

Les tableaux 5 et 6 reprennent respectivement les moyennes et groupes obtenus via emmeans pour les variables liées à l'approche par la matière sèche et l'indice de récolte

Tableau 5: Moyennes et groupes des mesures liées à l'approche par la matière sèche.

Mesure	Variété	Stade							
		BBCH 55		BBCH 65		BBCH 75		BBCH 89	
Biomasse des tiges (t/ha)	AUGUSTA	0,21	b	1,68	a	4,24	a	3,17	b
	CURLEW	0,25	b	1,56	a	3,54	a	2,26	a
	DIVA	0,19	ab	1,7	a	3,19	a	2,69	ab
	GL ALICE	0,11	a	2,13	a	3,72	a	2,67	ab
	NAIROBI	0,21	ab	1,44	a	3,26	a	2,36	a
Biomasse des feuilles (t/ha)	AUGUSTA	0,70	ab	1,95	a	2,78	a	0,84	c
	CURLEW	0,81	b	2,04	a	2,65	a	0,61	bc
	DIVA	0,58	ab	2,09	a	2,09	a	0,33	a
	GL ALICE	0,46	a	2,13	a	2,59	a	0,44	ab
	NAIROBI	0,74	ab	2,01	a	2,64	a	0,43	ab
Biomasses des gousses (t/ha)	AUGUSTA					2,5	a	1,78	a
	CURLEW					2,24	a	1,51	a
	DIVA					2,45	a	1,98	a
	GL ALICE					2,42	a	1,83	a
	NAIROBI					2,77	a	2,04	a
Biomasse des grains (t/ha)	AUGUSTA					1,17	a	6,45	a
	CURLEW					1,56	a	5,63	a
	DIVA					1,67	a	6,24	a
	GL ALICE					1,3	a	5,68	a
	NAIROBI					1,89	a	6,34	a
Biomasse aérienne totale (t/ha)	AUGUSTA	0,91	ab	3,63	a	10,5	a	12,23	a
	CURLEW	1,01	b	3,61	a	9,99	a	10,02	a
	DIVA	0,77	ab	3,79	a	9,41	a	11,3	a
	GL ALICE	0,57	a	4,26	a	10,03	a	10,61	a
	NAIROBI	0,94	ab	3,44	a	10,55	a	11,17	a
Taux d'azote des tiges (%)	AUGUSTA	2,19	a	1,58	ab	0,91	a		
	CURLEW	2,20	a	1,66	bc	0,95	a		
	DIVA	2,24	a	1,53	ab	0,90	a		
	GL ALICE	2,27	a	1,48	a	1,00	a		
	NAIROBI	2,22	a	1,72	c	0,85	a		
Taux d'azote des feuilles (%)	AUGUSTA	4,30	b	4,44	b	3,98	b		
	CURLEW	4,17	ab	4,10	ab	3,93	ab		
	DIVA	4,22	ab	4,11	ab	3,63	a		
	GL ALICE	3,93	a	4,14	ab	3,81	ab		
	NAIROBI	4,10	ab	4,01	a	3,72	ab		

Tableau 6: Suite du tableau 5: Moyennes et groupes des mesures liées à l'approche par la matière sèche.

Mesure	Variété	Stade					
		BBCH 55		BBCH 65		BBCH 75	
Taux d'azote des gousses (%)	AUGUSTA					3,40	c
	CURLEW					3,11	b
	DIVA					3,08	b
	GL ALICE					2,66	a
	NAIROBI					2,98	b
Taux d'azote des grains (%)	AUGUSTA					3,68	a
	CURLEW					3,62	a
	DIVA					3,75	a
	GL ALICE					3,57	a
	NAIROBI					3,98	b
Indice de surface foliaire-LAI	AUGUSTA	1,35	bc	5,60	a		
	CURLEW	1,52	c	3,72	a		
	DIVA	1,19	abc	4,39	a		
	GL ALICE	0,96	a	3,15	a		
	NAIROBI	1,08	ab	4,24	a		
Indice de récolte (%)	AUGUSTA						52,72 a
	CURLEW						55,98 a
	DIVA						54,67 a
	GL ALICE						53,36 a
	NAIROBI						55,85 a
Biomasse des racines (t/ha)	AUGUSTA	0,38	bc	0,94	a		0,76 a
	CURLEW	0,54	c	1,00	a		0,59 a
	DIVA	0,30	ab	0,84	a		0,43 a
	GL ALICE	0,25	a	0,81	a		0,43 a
	NAIROBI	0,36	ab	0,92	a		0,56 a
Nombre de nodules/plante	AUGUSTA	61,06		b			
	CURLEW	57,00		b			
	DIVA	36,19		a			
	GL ALICE	51,36		ab			
	NAIROBI	47,69		ab			
Sol : Teneur en N-NO3 (kg/ha)	AUGUSTA			32,25	a		19,75 a
	CURLEW			31,00	a		17,75 a
	DIVA			18,00	a		16,50 a
	GL ALICE			71,75	a		15,75 a
	NAIROBI			30,75	a		18,75 a
Sol : Teneur en N-NH4 (kg/ha)	AUGUSTA			15,80	a		0,40 a
	CURLEW			17,85	a		1,28 a
	DIVA			8,55	a		0,93 a
	GL ALICE			54,18	a		0,68 a
	NAIROBI			19,90	a		0,73 a

## 5.2 Moyennes et groupes des mesures liées à l'approche par les composantes de rendement

Les tableaux 7 et 8 reprennent respectivement les moyennes et groupes obtenus via emmeans pour les variables liées à l'approche par les composantes de rendement.

Tableau 7: Moyennes et groupes des mesures liées à l'approche par les composantes de rendement.

Mesure	Variété	Stade											
		BBCH 12		BBCH 50		BBCH 55		BBCH 65		BBCH 75		BBCH 89	
Nombre de plantes/m²	AUGUSTA	38										a	
	CURLEW	40										a	
	DIVA	39										a	
	GL ALICE	40										a	
	NAIROBI	37										a	
Nombre de tiges/m²	AUGUSTA							85				ab	
	CURLEW							75				ab	
	DIVA							89				b	
	GL ALICE							70				a	
	NAIROBI							70				a	
Nombre de tiges/plante	AUGUSTA									2,28			b
	CURLEW									2,13			ab
	DIVA									2,16			b
	GL ALICE									1,70			a
	NAIROBI									2,13			ab
Nombre d'étages /tige	AUGUSTA							12,42	a	18,90	c		
	CURLEW							13,85	b	19,30	c		
	DIVA							12,39	a	15,54	a		
	GL ALICE							14,10	b	20,63	d		
	NAIROBI							14,06	b	17,26	b		
Hauteur (cm)	AUGUSTA			8,7	a	34,2	ab	82,9	ab	103,9	b	99,0	b
	CURLEW			10,5	b	35,0	ab	83,5	b	100,5	ab	93,9	ab
	DIVA			8,9	a	37,0	b	81,5	ab	97,6	ab	91,6	ab
	GL ALICE			8,0	a	33,0	a	81,2	ab	102,3	ab	98,3	b
	NAIROBI			9,3	ab	33,8	a	77,1	a	91,5	a	88,1	a
Nombre de fleurs/m²	AUGUSTA							1669	a				
	CURLEW							2043	a				
	DIVA							2189	a				
	GL ALICE							1708	a				
	NAIROBI							1569	a				
Nombre de fleurs/tige	AUGUSTA							21,96	ab				
	CURLEW							27,24	c				
	DIVA							25,16	bc				
	GL ALICE							20,93	ab				
	NAIROBI							20,37	a				
Nombre d'étages en fleur/tige	AUGUSTA							5,13	a				
	CURLEW							5,68	ab				
	DIVA							6,67	b				
	GL ALICE							5,66	ab				
	NAIROBI							5,90	ab				
Nombre de fleurs/étage portant des fleurs	AUGUSTA							4,14	c				
	CURLEW							4,79	d				
	DIVA							3,80	bc				
	GL ALICE							3,69	ab				
	NAIROBI							3,35	a				

Tableau 8: Suite du tableau 7: Moyennes et groupes des mesures liées à l'approche par les composantes de rendement.

Mesure	Variété	Stade					
		BBCH 12	BBCH 50	BBCH 55	BBCH 65	BBCH 75	BBCH 89
Nombre de gousses/m <sup>2</sup>	AUGUSTA					621 a	461 ab
	CURLEW					575 a	341 a
	DIVA					542 a	505 b
	GL ALICE					599 a	468 ab
	NAIROBI					464 a	385 ab
Nombre de gousses/tige	AUGUSTA					6,75 ab	
	CURLEW					6,52 ab	
	DIVA					6,13 a	
	GL ALICE					7,79 b	
	NAIROBI					6,25 a	
Nombre d'étages portant des gousses/tige	AUGUSTA					5,96 ab	
	CURLEW					5,14 a	
	DIVA					5,34 ab	
	GL ALICE					6,34 b	
	NAIROBI					5,42 ab	
Nombre de gousses/étage portant des gousses	AUGUSTA					1,20 a	
	CURLEW					1,29 a	
	DIVA					1,17 a	
	GL ALICE					1,31 a	
	NAIROBI					1,16 a	
Nombre de grains /m <sup>2</sup>	AUGUSTA					1525 a	1456 a
	CURLEW					1341 a	1187 a
	DIVA					1286 a	1410 a
	GL ALICE					1187 a	1301 a
	NAIROBI					1126 a	1315 a
Nombre de grains/gousse	AUGUSTA					3,43 a	
	CURLEW					3,62 a	
	DIVA					3,42 a	
	GL ALICE					2,90 a	
	NAIROBI					3,33 a	
Taux de fécondation (%)	AUGUSTA					37,36 a	
	CURLEW					28,93 a	
	DIVA					26,42 a	
	GL ALICE					37,14 a	
	NAIROBI					30,76 a	
Poids de 1000 grains (g)	AUGUSTA					90,6 a	520,7 ab
	CURLEW					136,8 b	560,6 b
	DIVA					151,1 b	459,9 a
	GL ALICE					129,6 ab	514,8 ab
	NAIROBI					195,2 c	557,9 b
Rendement grain (t/ha)	AUGUSTA						5,71 b
	CURLEW						5,49 ab
	DIVA						4,53 a
	GL ALICE						4,88 ab
	NAIROBI						5,28 ab



### 5.3 Phénologie

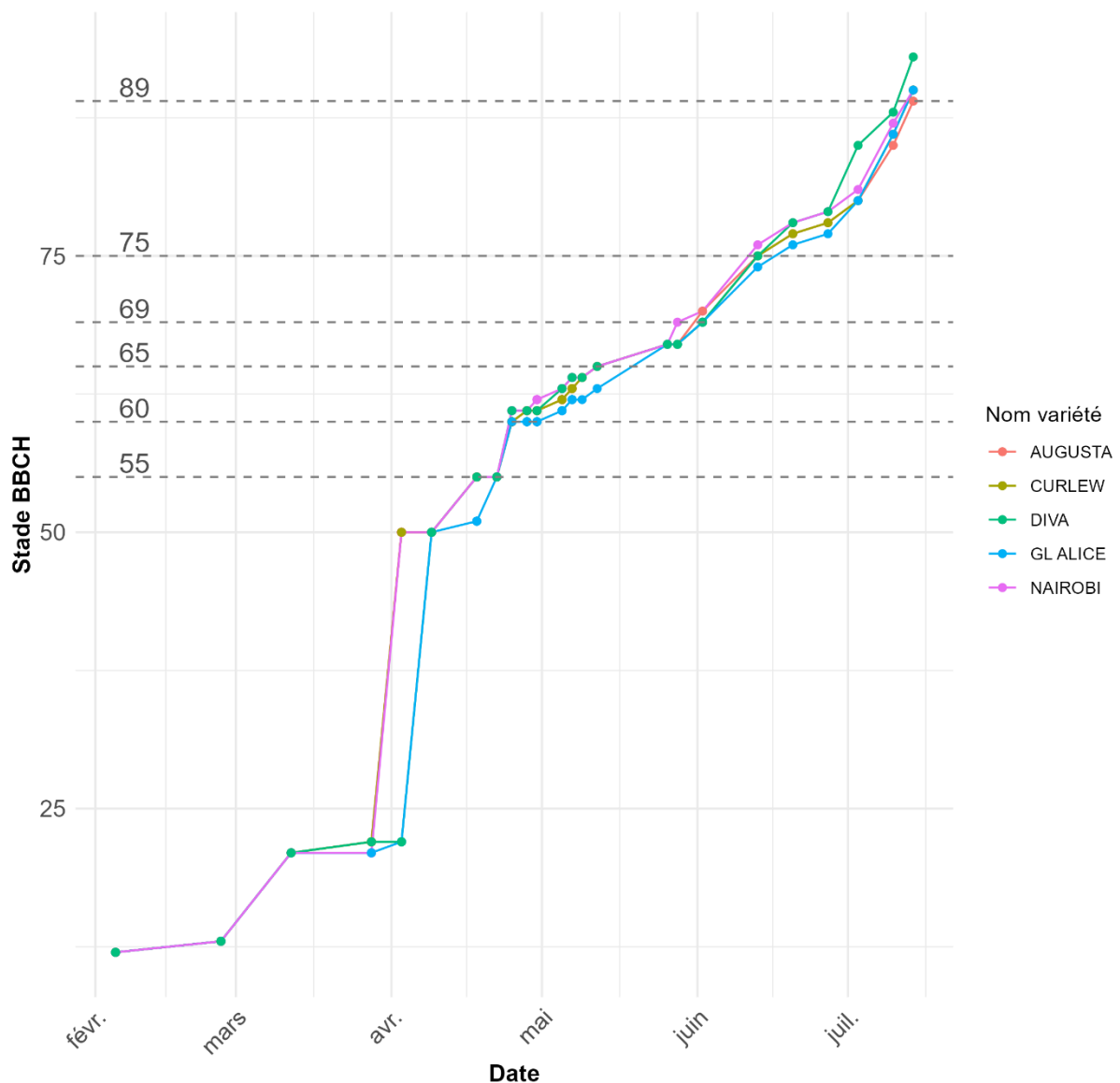


Figure 20 : Evolution des stade BBCH par variété.

Les écarts de phénologie entre les différentes variétés sont faibles. Concernant la précocité à floraison, DIVA et NAIROBI ont été les plus précoces à floraison (Tableau 7). Ensuite, GL ALICE était la plus tardive à atteindre le stade mi-floraison, correspondant à l'apparition des premières gousses sur le premier étage ayant commencé à fleurir. NAIROBI a atteint le stade fin floraison en premier suivi de d'AUGUSTA.

Quant à la durée de floraison (BBCH 60 à BBCH 69), celle-ci varie entre les variétés (Tableau 9). Au plus la durée de la floraison est élevée, au plus les risques de rencontrer des mauvaises conditions climatiques lors de la floraison sont étalés. A l'inverse, au plus la période de floraison est courte, au plus le risque d'avoir un taux de fécondation très faible suite à la coïncidence d'une période de conditions climatiques défavorables avec la floraison est élevé. Cependant, une durée de floraison élevée n'est pas forcément liée à un meilleur taux de fécondation, la précocité joue également un rôle et les températures plus basses au début de la période de floraison ainsi que les premiers pics de chaleur à la fin de cette période peuvent ne



pas être optimales pour la pollinisation (la température optimale se situant entre 22 et 23° C (Alharbi et al., 2020).

Tableau 9: Durée et Date de début et de fin de la floraison.

Variété	Date début floraison	Date fin floraison	Durée de la floraison (j)
<b>AUGUSTA</b>	25 avril	1 juin	38
<b>CURLEW</b>	25 avril	2 juin	39
<b>DIVA</b>	24 avril	2 juin	40
<b>GL ALICE</b>	25 avril	2 juin	39
<b>NAIROBI</b>	24 avril	28 mai	35

Le stade mi-remplissage (BBCH 75) a été atteint le 13 juin pour toutes les variétés sauf GL ALICE qui l'a atteint 1 jour plus tard.

Enfin, pour ce qui est de la précocité à maturité (BBCH 89), DIVA a devancé les autres variétés à partir du mi-remplissage, résultant en une maturité précoce à la récolte (figure 20).

Le suivi de la phénologie de la plante, du remplissage des gousses (figure 22) et de la maturation (figure 23) permet également de retracer la temporalité de la mise en place des composantes de rendement (figure 21).

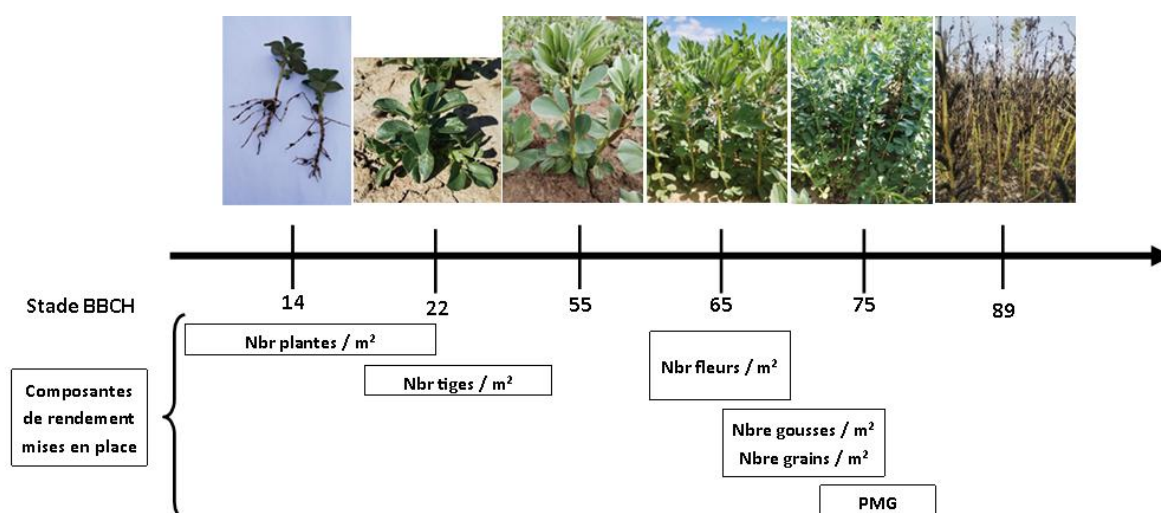


Figure 21: Suivi de la phénologie et de la mise en place des composantes de rendement.

### Remplissage



Stades BBCH 70 → 79

*Figure 22: Suivi du remplissage.*

### Maturation



Stades BBCH 80 → 89

*Figure 23: Suivi de la maturation.*

## 5.4 Résultats des mesures basées sur l'approche par la matière sèche

La biomasse totale à maturité varie entre 10 et 12 t/ha selon les variétés (figure 24). La biomasse des tiges et des feuilles atteint un pic durant le remplissage puis diminue jusqu'à la récolte en raison de la translocation des assimilats contenus dans les tiges et les feuilles vers le grain et de la chute des feuilles sénescentes (López-Bellido et al., 2005). La biomasse des gousses atteint son maximum au stade BBCH 75 puis reste constante ou diminue légèrement. La biomasse racinaire maximale est atteinte au stade BBCH 65 (Streit, 2019).

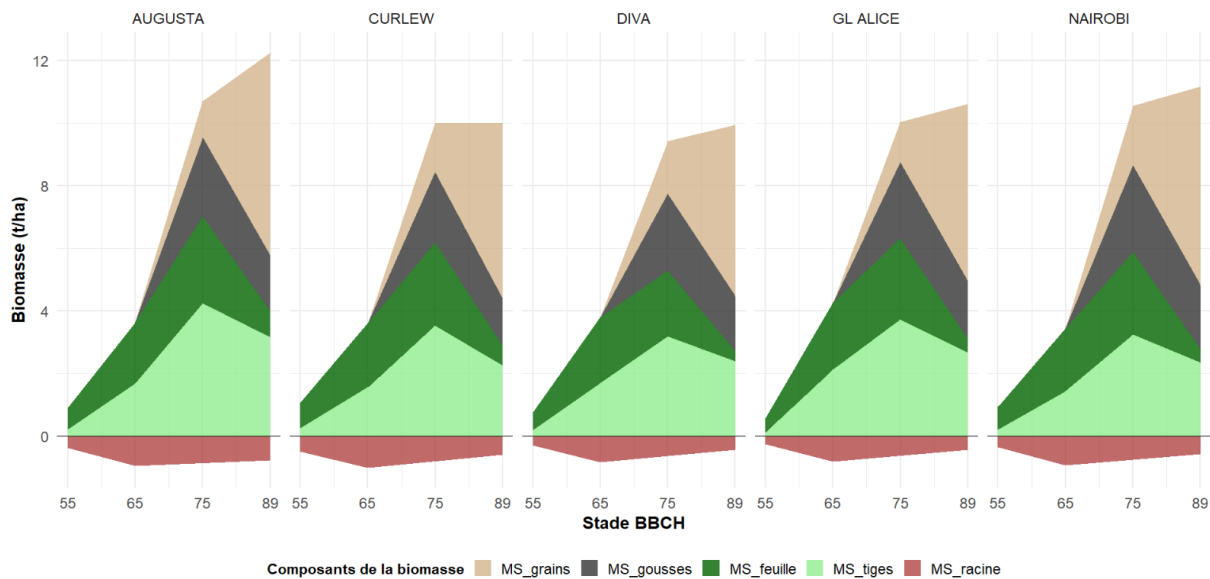


Figure 24: Evolution de la biomasse et de sa répartition dans les organes de la plante.

## 5.4.1 Partie aérienne

### 5.4.1.1 Biomasse aérienne

Au moment de l'apparition des boutons floraux (BBCH 55), une différence significative a été observée entre les variétés pour les biomasses des tiges et des feuilles ainsi que pour la biomasse totale (figure 25). A ce stade GL ALICE avait les biomasses de tiges et de feuilles les plus faibles tandis que celles de CURLEW étaient les plus élevées (annexe 6).

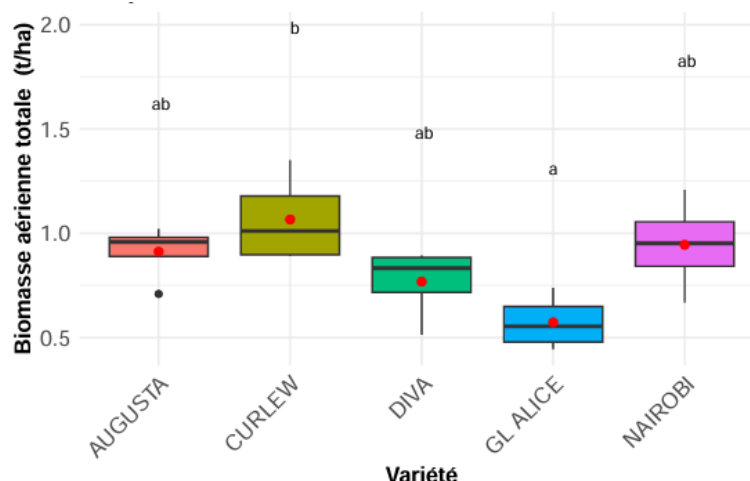


Figure 25: Boxplot de la biomasse aérienne totale au stade BBCH 55.

La biomasse des tiges à maturité varie significativement entre les variétés au stade BBCH 89. AUGUSTA possède la biomasse des tiges la plus élevée (3,17 t/ha) tandis que CURLEW et NAIROBI présentent les deux plus faibles valeurs avec respectivement 2,26 et 2,36 t/ha.

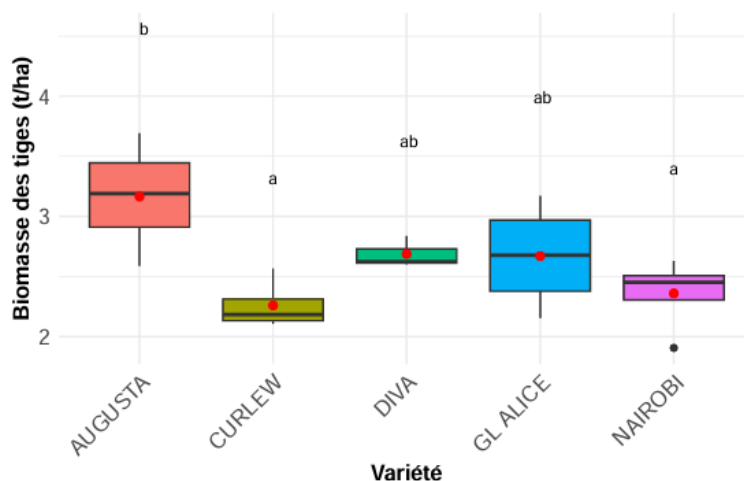


Figure 26: Boxplot de la biomasse des tiges au stade BBCH 89.

La biomasse de feuilles à la récolte correspond à la biomasse de feuilles restant sur les tiges. Celle-ci reflète notamment la précocité à maturité observée des variétés. DIVA, étant la variété la plus précoce à maturité, elle présentait les biomasses foliaires les plus faibles (figure 27).

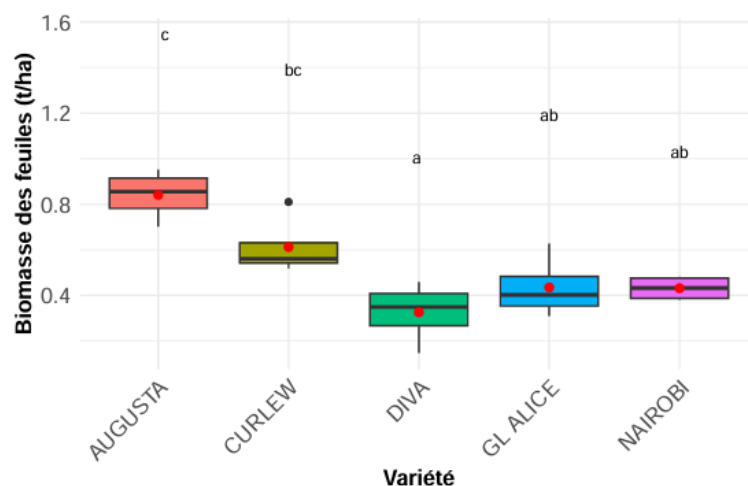


Figure 27: Boxplot de la biomasse des feuilles au stade BBCH 89.

#### 5.4.1.2 Teneur en azote de la biomasse aérienne

##### I Tiges

Une différence très hautement significative du taux d'azote dans les tiges existe entre les variétés au stade BBCH 65. Ces différences ne sont pas significatives aux stades BBCH 55 et 75. Au stade BBCH 65, NAIROBI et GL ALICE présentent respectivement le taux d'azote le plus élevé (1,72 %) et le plus faible dans les tiges (1,48 %) (figure 28).

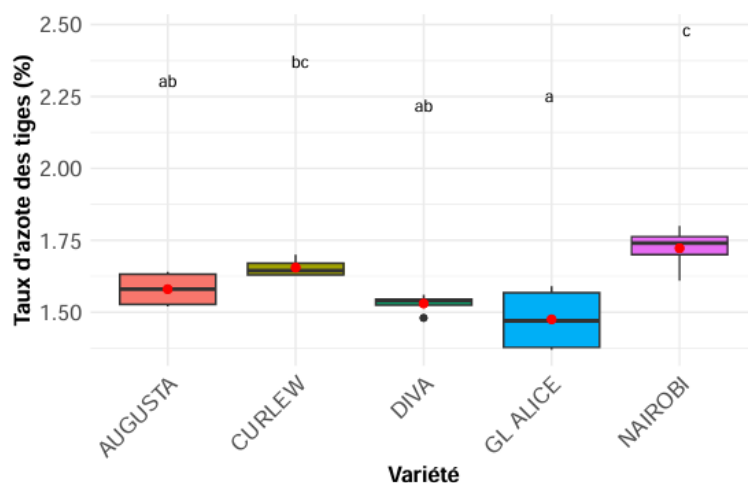


Figure 28: Boxplot du taux d'azote dans les tiges au stade BBCH 65.

##### II Feuilles

Le taux d'azote dans les feuilles varie significativement entre les variétés aux stades BBCH 55, 65 et 75. La variété AUGUSTA possède les taux d'azote les plus élevés dans les feuilles aux trois stades, respectivement de 4,3 ; 4,44 et 3,98 % (figure 29).

Ce taux d'azote dans les feuilles est lié à la capacité photosynthétique des feuilles. En effet, au plus ce taux d'azote dans les feuilles est élevé, au plus le taux maximal de photosynthèse net de la feuille est élevé (Jia et al., 2003).

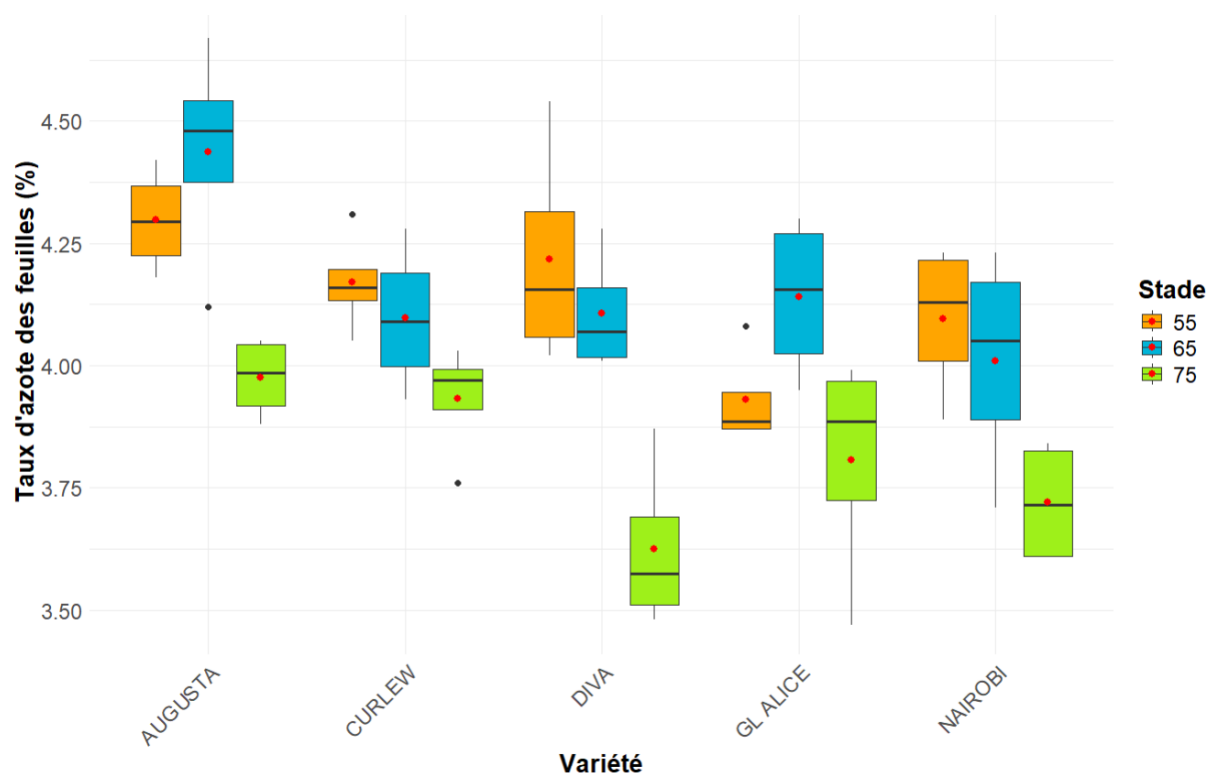


Figure 29: Boxplot des taux d'azote dans les feuilles aux stades BBCH 55, 65 et 75.

### III Gousses

Au stade BBCH 75, la p-valeur (annexe 7) pour le taux d'azote dans les gousses est très hautement significative. Comme pour le taux d'azote dans les feuilles, AUGUSTA possède le taux d'azote dans les gousses le plus élevé (3,4%). A l'inverse, le plus faible (2,66%) correspond à la variété GL ALICE tandis que ceux des 3 autres variétés sont proches de 3%.

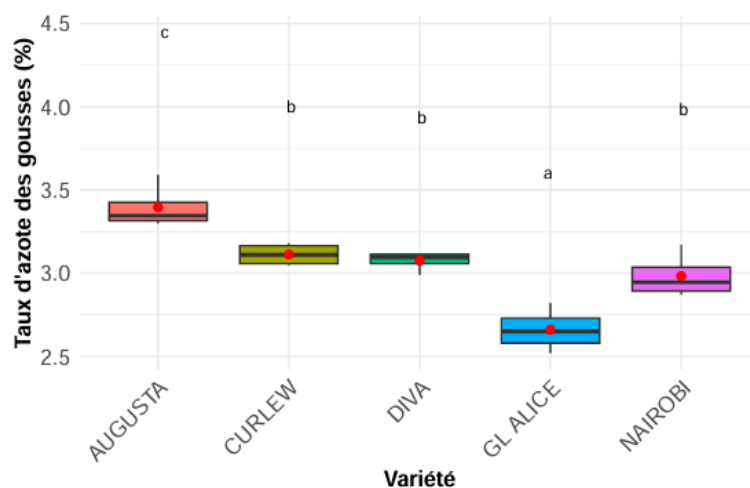


Figure 30: Boxplot du taux d'azote dans les gousses au stade BBCH 75.

### IV Grains

Au stade BBCH 75, une différence très hautement significative a été observée entre les variétés pour le taux d'azote dans les grains. La variété NAIROBI se distingue des autres variétés avec la teneur en azote la plus élevée (3,98%) (figure 31).

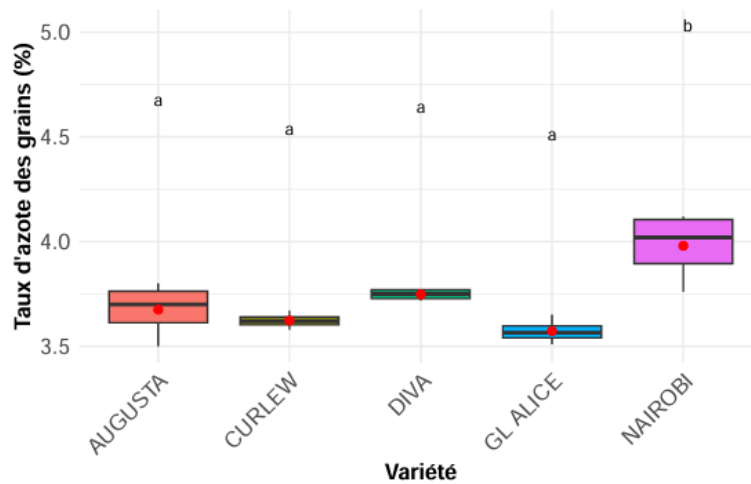


Figure 31: Boxplot du taux d'azote dans les grains au stade BBCH 75.

#### *V Courbe de dilution de l'azote*

Sur base de ces taux d'azote et des mesures de biomasse, il est possible d'évaluer la nutrition azotée de la fève (figure 32) en comparant les valeurs de la dilution de l'azote dans la biomasse végétative aérienne avec des courbes critiques de dilution de l'azote servant de référence (Guinet, 2019).

Les courbes critiques de dilutions de l'azote utilisées ici sont celles du pois :  $\%N = 5,08 * (\text{Biomasse})^{-0,32}$  (Ney et al., 1997) et du haricot :  $\%N = 4,72 * (\text{biomasse})^{-0,32}$  (Soratto et al., 2025). La droite verticale indique le seuil de biomasse à partir duquel les courbes critiques de dilution de l'azote sont considérées comme valide (Guinet, 2019). Les concentrations en azote dans la biomasse végétative aérienne au stade BBCH 65 (dont la biomasse est comprise entre 2,5 et 5 t/ha) ont tendance à être légèrement inférieures mais très proche des courbes critiques de dilution azotée utilisées comme références. Ce qui indique globalement une nutrition azotée quasi optimale (Guinet, 2019). Cependant une différence significative de nutrition azotée est observée entre les variétés pour le prélèvement réalisé au stade BBCH 75, la variété DIVA ayant le taux d'azote dans la biomasse végétative aérienne (tiges et feuilles confondues) le plus faible (1,98%) tandis que CURLEW a le plus élevé (2,22%).

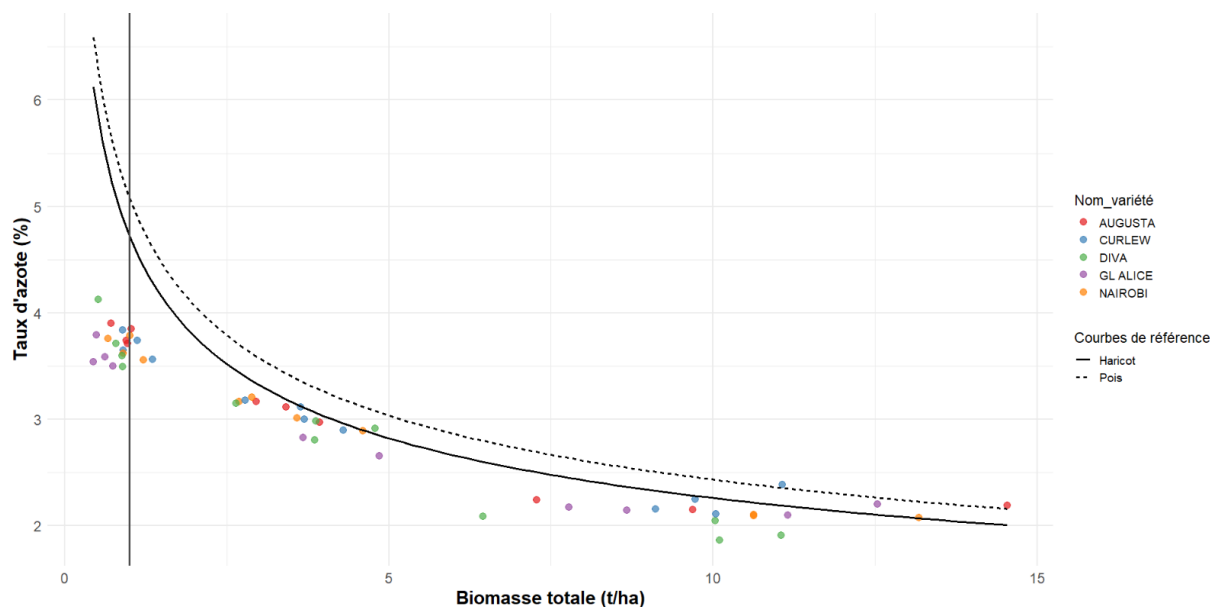


Figure 32: Taux d'azote en fonction de la biomasse végétative aérienne en comparaison de courbes critiques de dilution azotée de référence pour les stades BBCH 55, 65 et 75.

#### 5.4.1.3 Indice de surface foliaire-LAI

Une différence hautement significative a été observée entre les variétés au stade BBCH 55. La variété CURLEW possède l'indice de surface foliaire le plus élevé (1,52) tandis que GL ALICE possède, de même que pour la biomasse, la moyenne la plus faible (figure 33).

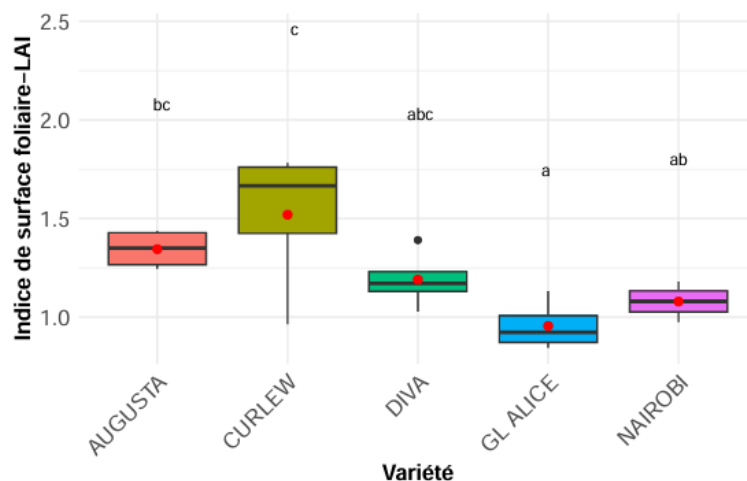


Figure 33: Boxplot de l'indice de surface foliaire pour le stade BBCH 55.

Au stade BBCH 65, les différences entre les variétés ne sont plus significatives, la moyenne générale pour toutes les variétés confondues atteint 4,22.

Les valeurs de LAI observées au stade BBCH 55 et 65 correspondent aux valeurs proposées par López-Bellido et al. (2005). C'est-à-dire 170 jours près le semis (soit avant le stade BBCH 55), un LAI inférieur à 1,5 et des valeurs de LAI maximum au-delà de 4 entre 220 et 230 jours après le semis (soit à la floraison).



#### 5.4.1.4 Indice de récolte

Aucune différence significative n'a été observée entre les variétés pour l'indice de récolte. La moyenne générale de celui-ci toutes variétés confondues est de 54,52%. Selon López-Bellido et al. (2005), l'indice de récolte maximal atteignable par la plante se situe aux alentours de 50%. Cet indice de récolte supérieur à 50% peut s'expliquer par le fait qu'une partie des feuilles tombées par terre n'ont pas été incluses dans la biomasse totale. De plus, les conditions météorologiques sèches rencontrées ont défavorisé la croissance végétative favorisant un indice de récolte élevé (López-Bellido et al., 2005).

### 5.4.2 Partie souterraine

#### 5.4.2.1 Biomasse des racines

La biomasse racinaire présente des différences très hautement significatives entre les variétés au stade BBCH 55 mais aucune différence significative aux stades BBCH 65 et 89. Il semblerait donc que le système racinaire des différentes variétés étudiées soit équivalent en termes de biomasse mais que certaines variétés mettent en place leur système racinaire plus rapidement que les autres. En effet, la variété CURLEW présente une biomasse racinaire au stade BBCH 55 de 0,54 t/ha alors que celle de GL ALICE est deux fois plus faible (0,25 t/ha).

A la mi-floraison, la moyenne générale de la biomasse racinaire s'élève à 0,9 t/ha et à 0,4 t/ha à maturité. Ces résultats sont inférieurs à ceux obtenus par Turpin et al. (2002) à maturité avec 2,3 t/ha dans les 15 premiers centimètres à la récolte. En revanche, ils sont supérieurs à ceux obtenu par Streit (2019) avec des valeurs de biomasse racinaires comprise entre 0,6 et 1,1 t/ha pour un prélèvement réalisé à la floraison sur une profondeur de 60 cm. Ce qui correspond à 0,3 à 0,55 t/ha sachant que 50% des racines sont situées dans les 15 premiers centimètres du sol (Turpin et al., 2002).

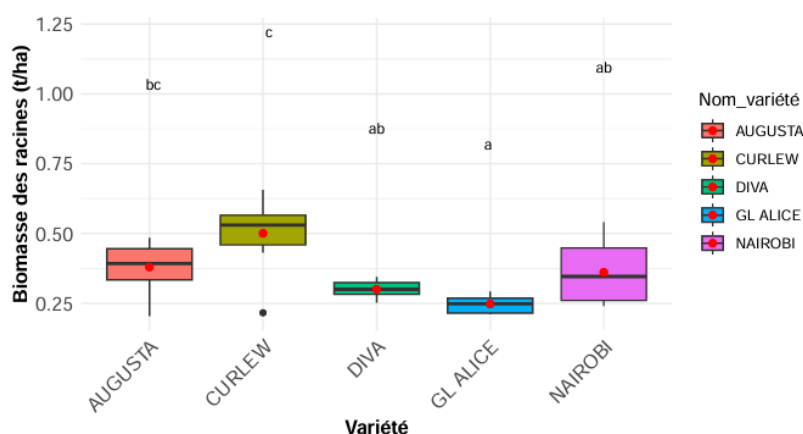


Figure 34: Boxplot de la biomasse racinaire pour le stade BBCH 55.

#### 5.4.2.2 Nombre de nodules par plante

La capacité de fixation d'azote atmosphérique des légumineuses dépend du nombre de nodosités (Luo et al., 2024). Aucune différence significative n'a été observée entre les stades BBCH 55 et 65, le nombre de nodules est donc fixé dès le stade BBCH 55.

Cependant, il y a une différence significative entre les variétés. Les variétés AUGUSTA et CURLEW présentent le plus de nodules par racine, respectivement 61 et 57 nodules/racine. Au contraire, DIVA présente le plus faible nombre de nodules avec 36 par racine (figure 35). Ces nombres de nodules/plante sont comparables à ceux rapportés par Melak (2018), soit entre 20

et 69. Cependant ils sont inférieurs à ceux observés par Argaw (2012) qui varient entre 60 et 181.

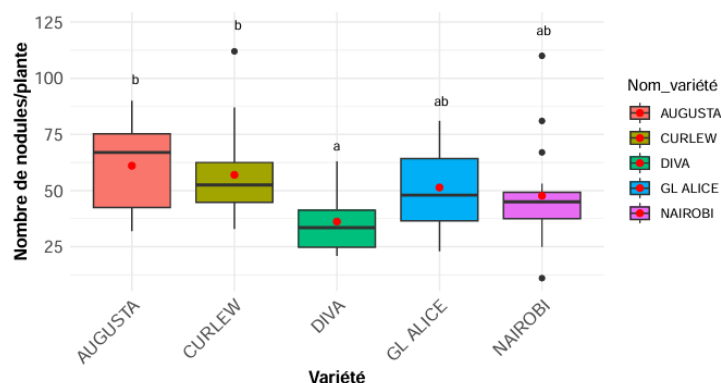


Figure 35: Boxplot du nombre de nodules par plante.

#### 5.4.2.3 Analyse de sol

Aucune différence significative n'a été observée entre les variétés sur la teneur en azote à la floraison et à la récolte (annexe 9). Cependant, au stade BBCH 65, DIVA a tendance à présenter des moyennes de teneur en azote nitrique et ammoniacal dans le sol inférieures à celles des autres variétés (tableau 6).

L'augmentation de la quantité d'azote dans le sol à la floraison (tableau 10) correspond au moment où le nombre de nodules est maximal et à un stade où le taux de fixation d'azote atmosphérique est élevé, celui-ci étant maximal après la floraison (De Ron, 2015; Schmaucks, 2022).

Tableau 10 : Résultat des analyses de sol réalisées à la floraison et à la récolte.

Analyse	Unité	Horizon	Sortie d'hiver	Floraison	Récolte
Azote nitrique	kg N-NO <sub>3</sub> /ha	H1	9,75	34,46	18,17
Azote ammoniacal	kg N-NH <sub>4</sub> /ha	H1	1,08	21,10	0,83

A la récolte, la teneur en azote totale (nitrique +ammoniacal) est de 19 kg N/ha dans le premier horizon. En comparaison aux résultats obtenu par Rothardt et al. (2021) avec des valeurs allant de 30-40 kg N/ha, cette valeur est faible. Cela s'explique par le fait que les analyses de sol ont été réalisées juste après la récolte. Les résidus de culture ne se sont donc pas encore décomposés.

## 5.5 Résultats des mesures basées sur l'approche par les composantes de rendement

### 5.5.1 Densité de Plantes

Aucune différence significative n'a été observée pour ce facteur entre les différentes variétés. Toutes les variétés ont bien levé et il n'y a pas eu de perte de plantes significative au cours du cycle de la culture. La moyenne générale du nombre de plantes/m<sup>2</sup> s'élève à 38,8 ; ce qui est même légèrement supérieur à la densité de semis théoriquement semée qui était de 35 grains/m<sup>2</sup>.

### 5.5.2 Densité de tiges et nombre de tiges par plante

Le nombre de tiges/m<sup>2</sup> ainsi que le nombre de tiges/plante (figure 36) varie significativement entre les 5 variétés. La variété DIVA possède le plus de tiges/m<sup>2</sup> (89) tandis que NAIROBI et GL ALICE sont les deux variétés qui en possèdent le moins (70 et 70,33 respectivement). Le nombre de tiges/plante suit une tendance similaire avec GL ALICE qui en possède le moins (1,7) et AUGUSTA et DIVA appartenant toute les deux au groupe de moyenne le plus élevé avec respectivement 2,28 et 2,16 tiges par plante.

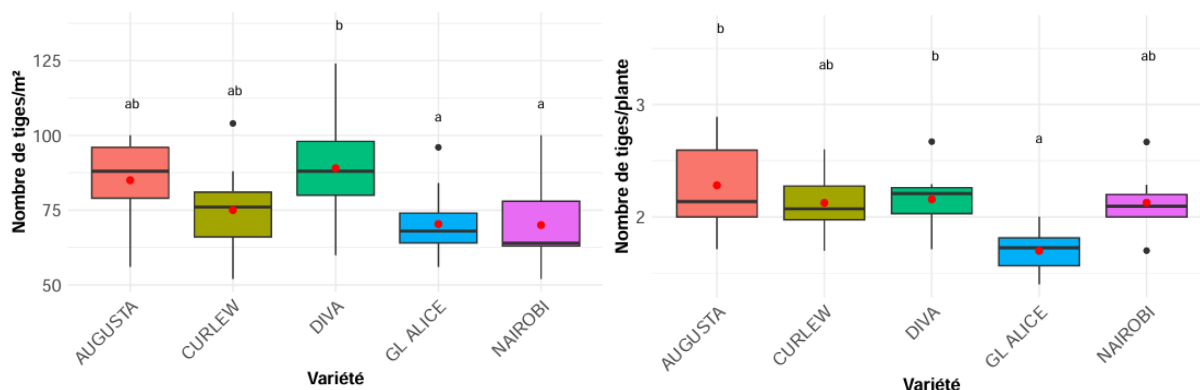


Figure 36: Boxplots du nombre de tiges/m<sup>2</sup> à gauche et du nombre de tiges/plante à droite.

### 5.5.3 Nombre d'étages par tige

A la floraison et au remplissage, le nombre de nœuds/tige varie significativement entre les variétés. DIVA présente le nombre d'étages le plus faible aux deux stades clés. Toutefois, AUGUSTA qui avait le deuxième plus faible nombre d'étages à la mi-floraison se retrouve, au stade BBCH 75 dans la moyenne haute avec CURLEW (18,9 et 19,3 respectivement), au-dessus de NAIROBI. Au remplissage, GL ALICE est la variété avec le plus de nœuds/tige (figure 37).

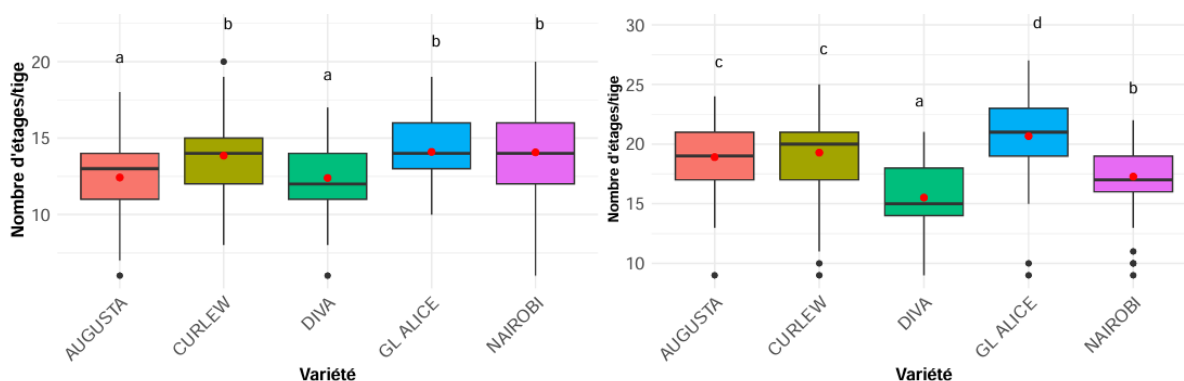


Figure 37: Boxplots du nombre d'étages /tige pour le stade BBCH 65 à gauche et BBCH 75 à droite.

### 5.5.5 Densité de fleurs et répartition des fleurs sur la plante

Le nombre de fleurs/m<sup>2</sup> ne varie pas significativement entre les variétés. La moyenne générale du nombre de fleurs/m<sup>2</sup> est de 1850. Cette valeur est supérieure à celle de 1350 fleurs/m<sup>2</sup> proposée par Alharbi et al. (2020).

Cependant, la répartition des fleurs sur la plante varie significativement entre les variétés. Concernant le nombre d'étages en fleur par tige (figure 38), la variété DIVA se démarque des autres variétés avec une moyenne de 6,67, tandis qu'AUGUSTA et CURLEW en ont le moins

avec des moyennes respectives de 5,13 et 5,68. Concernant le nombre de fleurs par étage en fleur (figure 38) CURLEW présente la valeur la plus élevée avec une moyenne de 4,79 tandis que NAIROBI en compte le moins avec une moyenne de 3,35.

Le nombre de fleurs/tige (annexe 10) est le plus élevé pour CURLEW (27,24). Cela s'explique par son nombre de fleurs/étage (figure 38) élevé, qui compense largement son nombre d'étages en fleur relativement faible par rapport aux autres variétés.

Le plus faible nombre de fleurs/tige de NAIROBI (20,37) est le résultat d'un nombre d'étages en fleur moyen en comparaison des autres variétés associé au plus faible nombre de fleurs/étage.

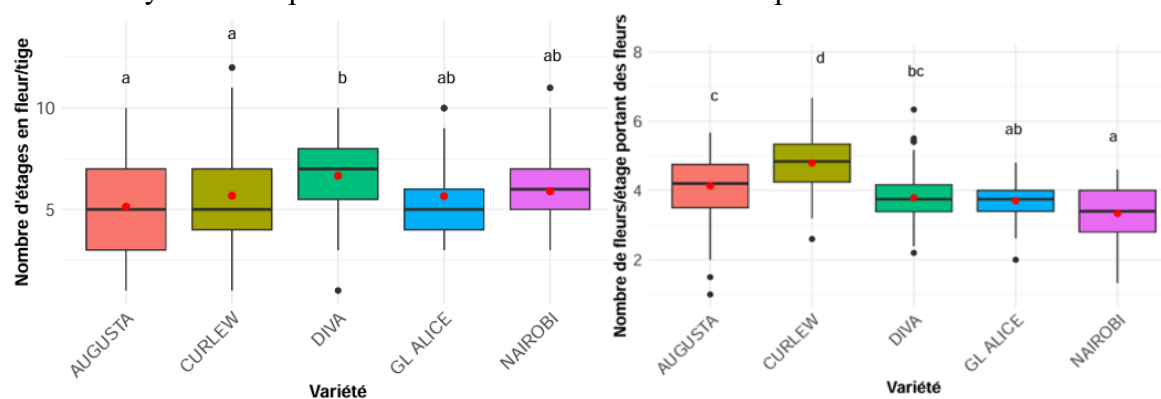


Figure 38: Boxplots du nombre d'étages en fleurs/tige à gauche et du nombre de fleurs/étage portant des fleurs à droite.

### 5.5.6 Densité de gousses et répartition des gousses sur la plante

Une différence significative pour le nombre de gousses/m<sup>2</sup> a été observée au stade BBCH 89, contrairement au stade BBCH 75. Cette différence de significativité entre les deux stades peut s'expliquer par l'avortement d'une partie des gousses entre ces deux stades (principalement dans les étages supérieurs des plantes pour lesquels certaines gousses encore très peu développées au stade 75 ont avorté).

Au stade BBCH 89, DIVA possède le plus de gousses/m<sup>2</sup> (505), tandis que CURLEW est celle qui en a le moins (341) (figure 39).

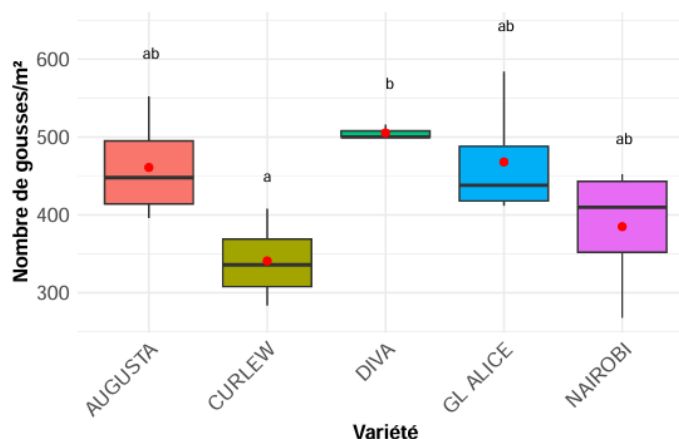


Figure 39: Boxplot du nombre de gousses/m<sup>2</sup> pour le stade BBCH 89.

Concernant la répartition des gousses sur la plante au remplissage, GL ALICE se distingue des autres variétés avec un nombre de gousses/tige plus élevé. Cela s'explique par un nombre

d'étages porteurs de gousses plus élevé (figure 40).

Il n'y a aucune différence significative entre les variétés pour le nombre de gousses/étage.

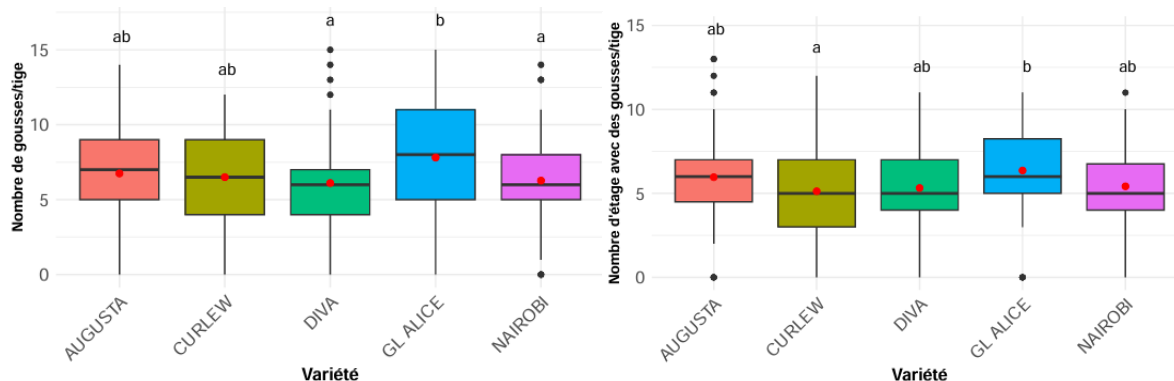


Figure 40: Boxplots du nombre de gousses/tige à gauche et du nombre d'étages portant des gousses à droite.

Le taux de fécondation ne varie pas significativement entre les variétés. La moyenne générale de celui-ci est de 31,61% et les moyennes par variété varient entre 26,42 et 37,36%. Ce Taux élevé, mais comparable à la littérature (10 à 30% selon Alharbi et al., (2020)), peut s'expliquer par les conditions météorologiques favorables rencontrées durant la floraison avec une absence de pic de chaleur ou d'excès de précipitations. Ceux-ci auraient pu entraîner l'avortement de certaines fleurs (López-Bellido et al., 2005).

La figure 41 permet de visualiser l'écart entre le nombre de fleurs et le nombre de gousses sur chaque étage, le décalage des pics de la répartition des gousses suit la même tendance que celui des fleurs. La position des fleurs et des gousses sur la tige semble être liée à la précocité. Ainsi, la variété DIVA, précoce à floraison et également précoce à maturité, concentre ses fleurs et ses gousses sur les étages situés plus bas. À l'inverse, GL ALICE qui est plus tardive à floraison, présente la majorité des fleurs et de ses gousses sur les étages supérieurs. Cette répartition des gousses sur la plante confirme que la mise en place des gousses est favorisée à mi-hauteur de la plante plutôt qu'à ses extrémités (Alharbi et al., 2020).

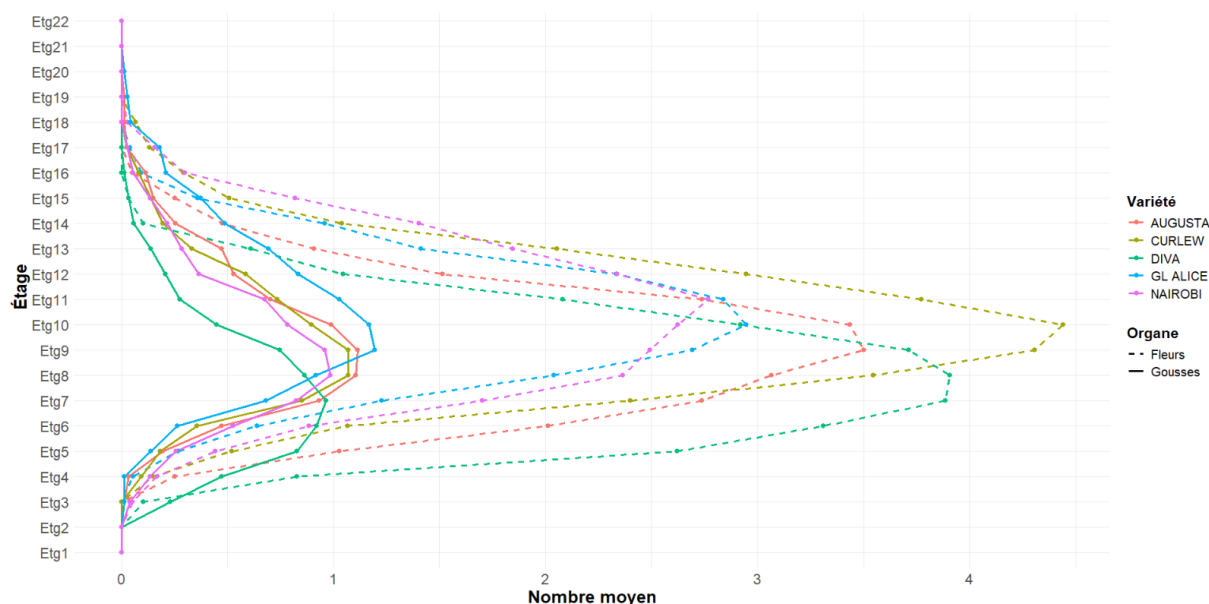


Figure 41: Nombre moyen de fleurs et de gousses sur chaque étage de la plante.

### 5.5.7 Densité de grains et nombre de grains par gousse

Aucune différence significative n'a été observée pour le nombre de grains/m<sup>2</sup> aux stades BBCH 75 et BBCH 89. Cependant, des tendances peuvent être observées entre les variétés au stade BBCH 89, ainsi AUGUSTA et DIVA ont les moyennes du nombre de grains/m<sup>2</sup> les plus élevées (respectivement 1456 et 1410) tandis que CURLEW présente la plus faible (1187).

Bien que principalement déterminé par le génotype (Toker, 2004; Alghamdi, 2007; Sharifi, 2015), le nombre de grains/gousse ne diffère pas significativement entre les variétés, avec des moyennes variant entre 2,9 et 3,62 respectivement pour GL ALICE et CURLEW.

### 5.5.8 Poids de 1000 grains

Des différences significatives ont été observées entre les variétés aux stades BBCH 75 et 89. Au stade BBCH 75, ces différences correspondent à des différences de cinétique de remplissage entre les variétés. NAIROBI se distingue des autres avec le PMG le plus élevé (195,17 g) et AUGUSTA avec le plus faible (90,62 g) au mi-remplissage (figure 42).

Au stade 89, CURLEW et NAIROBI présentent les PMG les plus élevés avec respectivement 560,59 et 557,90 g, tandis que le PMG le plus faible est celui de DIVA avec 459,89 g (figure 42). Ces valeurs de PMG sont proches de ceux repris dans le tableau 2 présentant les caractéristiques des différentes variétés.

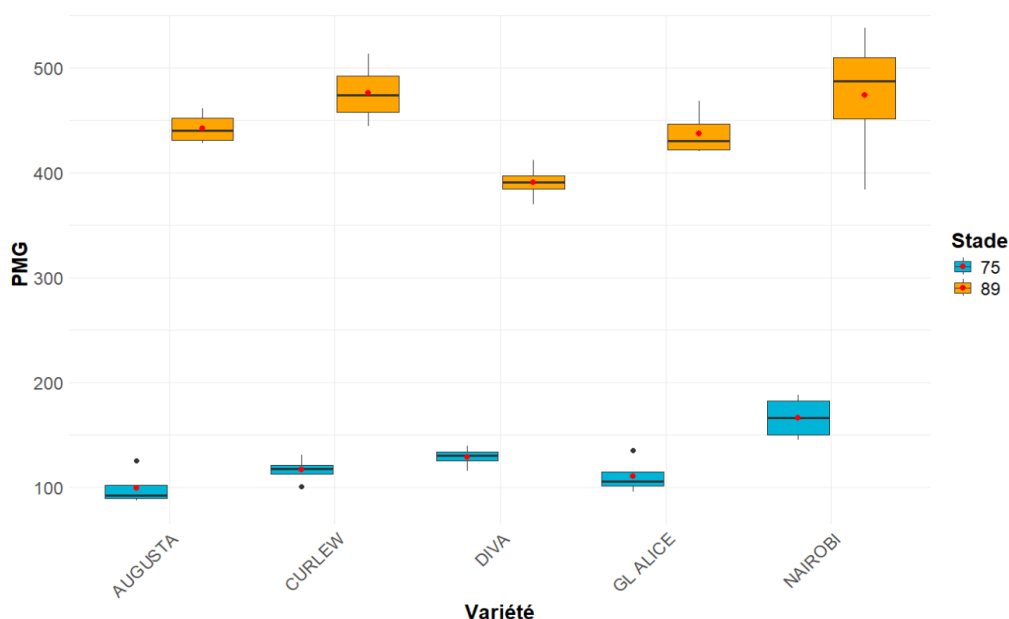


Figure 42: Boxplots du PMG pour les stades BBCH 75 et 89.

### 5.5.9 Rendement

Le test anova révèle une différence significative pour le rendement ( $p\text{-val} = 0,0211$ ). AUGUSTA performe le mieux avec une moyenne de 5,71 t/ha, tandis que DIVA produit le moins avec 4,53 t/ha. Les trois autres variétés appartiennent au même groupe de moyenne avec 4,88 ; 5,28 et 5,49 t/ha pour GL ALICE, NAIROBI et CURLEW respectivement (figure 43).

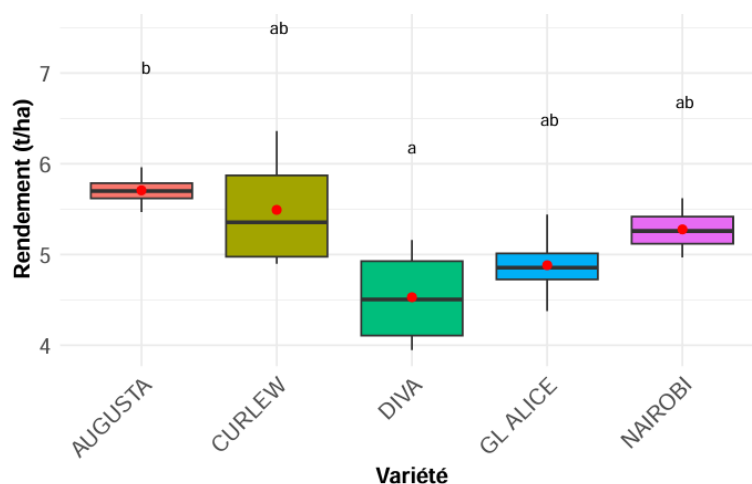


Figure 43: Boxplot du rendement parcellaire.

Les rendements obtenus cette année (5,18 t/ha en moyenne toutes variétés confondues) sont comparables et se situent à la limite supérieure des rendements obtenus entre 2019 et 2023 par le CePiCOP (entre 3,5 et 5t/ha) sur cette période. Ces rendements élevés peuvent s'expliquer par les conditions météorologiques favorables rencontrées après la floraison (absence de stress hydrique et température favorable). En effet, la période de 1 à 3 semaines après la floraison est la période critique pour l'élaboration du rendement de la féverole car plus de 70% des gousses sont formées durant cette période (Lake et al., 2019; Alharbi et al., 2020).

Le tableau 11 compare les biomasses de grains obtenues sur base des prélèvements de quadrat de 0,25 m<sup>2</sup> et la biomasse du grain calculée en ramenant le rendement obtenu lors de la moisson des micro-parcelles à 0% d'humidité. Les différences entre les deux mesures peuvent s'expliquer par les pertes de grains par la moissonneuse batteuse, les effets de bordures et variations de densité de plantes dans un quadrat (dû à la faible densité de semis et l'utilisation d'un semoir multigraines). Une hypothèse pour expliquer la l'écart particulièrement marqué pour DIVA serait des pertes plus importantes lors de la récolte à la moissonneuse en raison de son faible PMG. La biomasse des grains obtenue sur base des prélèvements de quadrats est donc utilisée pour l'étude des corrélations avec les autres variables mesurées sur base de cette même méthode de prélèvement. Cela permet d'identifier les variables intervenant dans l'élaboration du rendement de la féverole. Ensuite une analyse en composante principale est réalisée pour comparer les variétés entre elles et le rendement parcellaire obtenu lors de la récolte avec la moissonneuse est utilisé, celui-ci étant fiable car déterminé sur base d'une plus grande surface.

*Tableau 11 : Comparaison des biomasses du grain obtenues sur base des prélèvements de quadrat et de la moisson des micro-parcelles.*

Variété	Biomasse des grains (quadrat) (t/ha)	Biomasse des grains (batteuse) (t/ha)
AUGUSTA	6,45	4,85
CURLEW	5,63	4,67
DIVA	6,24	3,85
GL ALICE	5,68	4,15
NAIROBI	6,34	4,49

## 5.6 Analyse multivariée

### 5.6.1 Corrélation entre les variables intervenant dans l'approche par les composantes de rendement

Au début du cycle de la culture de la féverole d'hiver, la première composante de rendement qui est mise en place est la densité de plantes. Celle-ci dépend grandement de la densité de semis mais peut être réduite par une mauvaise levée ou des pertes de plantes durant l'hiver.

Ensuite, la plante va produire un certain nombre de ramifications ce qui va influencer la densité de tiges. La densité de tiges est corrélée à la densité de plantes (figure 44). Cependant, un premier phénomène de compensation entre le nombre de tiges/plante et la densité de plantes est révélé par la corrélation négative entre ces deux mesures. Chacune de ces tiges va produire un certain nombre de fleurs. Cependant, ce nombre de fleurs ne semble pas être un facteur limitant pour le nombre de gousses et de grains ce qui peut s'expliquer par le fait que seulement une faible proportion de ces fleurs forment des gousses (seulement 31,6% en moyenne observé dans le cadre de cette étude). Néanmoins ces densités de plantes et de tiges sont corrélées à la densité de gousses ( $r = 0,46$  et  $0,48$  respectivement), qui est elle-même fortement corrélée à la densité de grains ( $r = 0,87$ ).

Enfin, le rendement est corrélé avec la densité de gousses ( $r=0,71$ ) et fortement corrélé avec la densité de grains ( $r=0,87$ ). Cela confirme donc que la composante de rendement contribuant le plus à la production est la densité de grains (Alharbi et al., 2020).



Quant au PMG, bien que corrélé négativement avec la densité de plantes et de tiges, celui-ci semble être indépendant de la densité de grains.

Cette étude de l'élaboration du rendement permet donc de comprendre l'élaboration du rendement de la féverole jusqu'à la formation des grains. Toutefois, une fois que ces grains ont été mis en place, la plante doit encore les remplir. En effet, le rendement est le résultat du nombre de grains \* poids de 1 grain (PMG). Cette approche permet de comprendre l'élaboration du rendement par la force puits (Reynolds et al., 2022) mais ne permet pas d'expliquer le remplissage du grain.

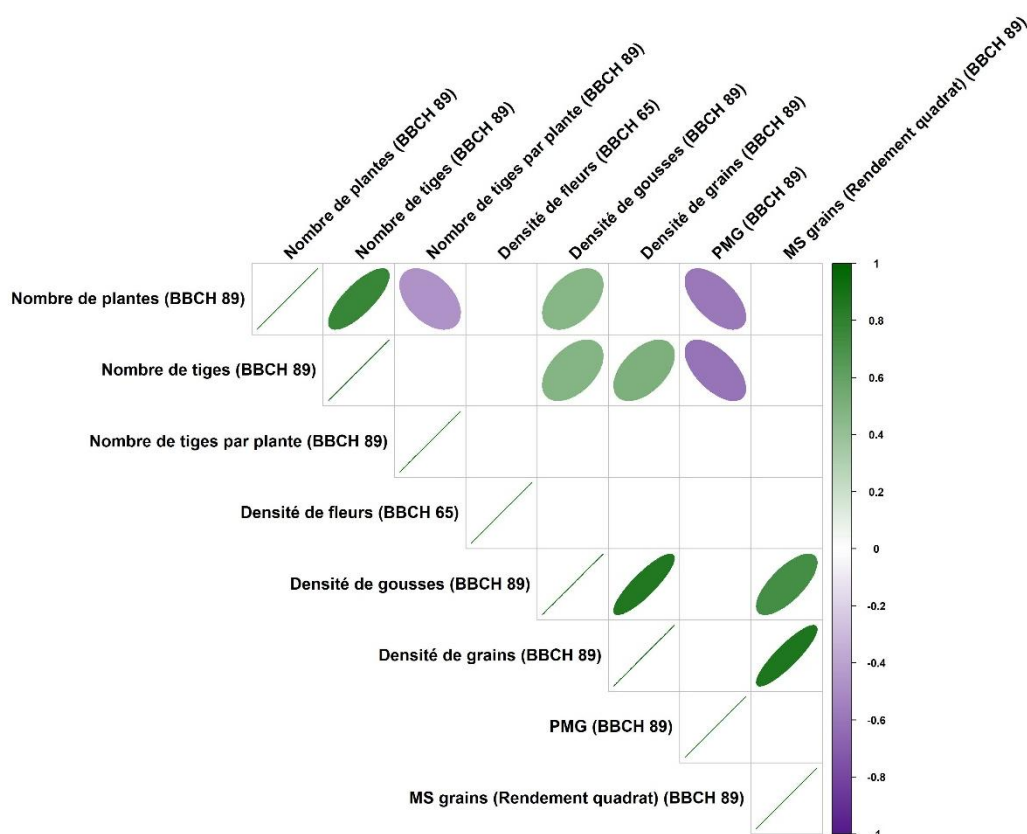


Figure 44 : Matrice de corrélation entre les variables intervenant dans l'approche par les composantes de rendement.

Rem : une matrice de corrélation avec les mêmes variables et avec le détail des valeurs de corrélation r et les p-valeurs est disponible en annexe 12

### 5.6.2 Corrélation entre les variables intervenant dans l'approche par la matière sèche

L'étude de l'élaboration du rendement via la biomasse est basée sur la quantité de biomasse accumulée par la plante et sa distribution dans les grains, qui est directement liée au rendement (Schmaucks, 2022). En effet, le rendement est le produit de la biomasse par l'indice de récolte (Reynolds et al., 2022). La production de biomasse par la plante dépend de l'activité photosynthétique des feuilles (Schmaucks, 2022). La capacité de production de biomasse dépend donc de l'indice de surface foliaire mais aussi de l'efficacité avec laquelle cette surface foliaire réalise la photosynthèse, qui est liée notamment au taux d'azote dans les feuilles (Jia et al., 2003).

Ces relations sont vérifiées dans le cadre de cette étude. L'indice de surface foliaire est lié à la biomasse de la plante à ce stade ( $r = 0,8$ ). De manière logique, le rendement est corrélé à la biomasse totale à la récolte ( $r = 0,97$ ) (et à l'indice de récolte ( $r = 0,62$ ) puisqu'il fait partie de la biomasse à la récolte et intervient dans le calcul de l'indice de récolte). Mais aussi parce que la capacité de production de la féverole dépend en plus de la capacité photosynthétique, de l'efficacité de translocation des assimilats depuis la biomasse végétative vers les tiges (Alharbi et al., 2020). Cette biomasse à la récolte est liée aux biomasses aux stades précédents étant donné que la biomasse s'accumule au cours de la croissance de la culture. Ainsi, la biomasse totale à la floraison est corrélée à la biomasse des tiges pendant le remplissage ( $r=0,55$ ). Cette dernière est elle-même corrélée avec la biomasse d'une tige et des gousses à la récolte ( $r = 0,52$  et  $r = 0,61$  respectivement). La biomasse d'une tige est également corrélée au PMG traduisant le phénomène de translocation des assimilats.

De même, le nombre de nodules est important pour la nutrition azotée de la plante comme le montre les corrélations entre les nombres de nodules des stades BBCH 55 et 65 et les taux d'azote dans les feuilles du stade de prélèvement suivant ( $r = 0,45$  et  $r = 0,48$  respectivement). Le nombre de nodules au stade BBCH 65 est fortement corrélé au PMG ( $r=0,72$ ). La corrélation positive entre la biomasse des feuilles à maturité et le PMG ( $r=0,55$ ) est liée au fait qu'une sénescence précoce des feuilles et donc une faible biomasse foliaire à maturité entraîne une baisse du PMG (López-Bellido et al., 2005).

La corrélation entre la biomasse racinaire et la biomasse des feuilles à la récolte ( $r = 0,45$ ) montre qu'un système racinaire puissant permet de garder les feuilles plus longtemps et ainsi d'assurer un meilleur remplissage des grains.

Cette approche par la matière sèche permet de combler les lacunes de l'approche par les composantes de rendement. Elle permet de mettre l'accent sur le remplissage du grain, qui présente des corrélations positives avec la biomasse de la tige, des feuilles, le taux d'azote dans les feuilles et le nombre de nodules. En effet, la biomasse allouée à l'élaboration du rendement dépend de la force puits des grains et des gousses ainsi que de la force source dépendant de la quantité d'assimilats stockée préalablement et de la capacité de production d'assimilats (Alharbi et al., 2020).

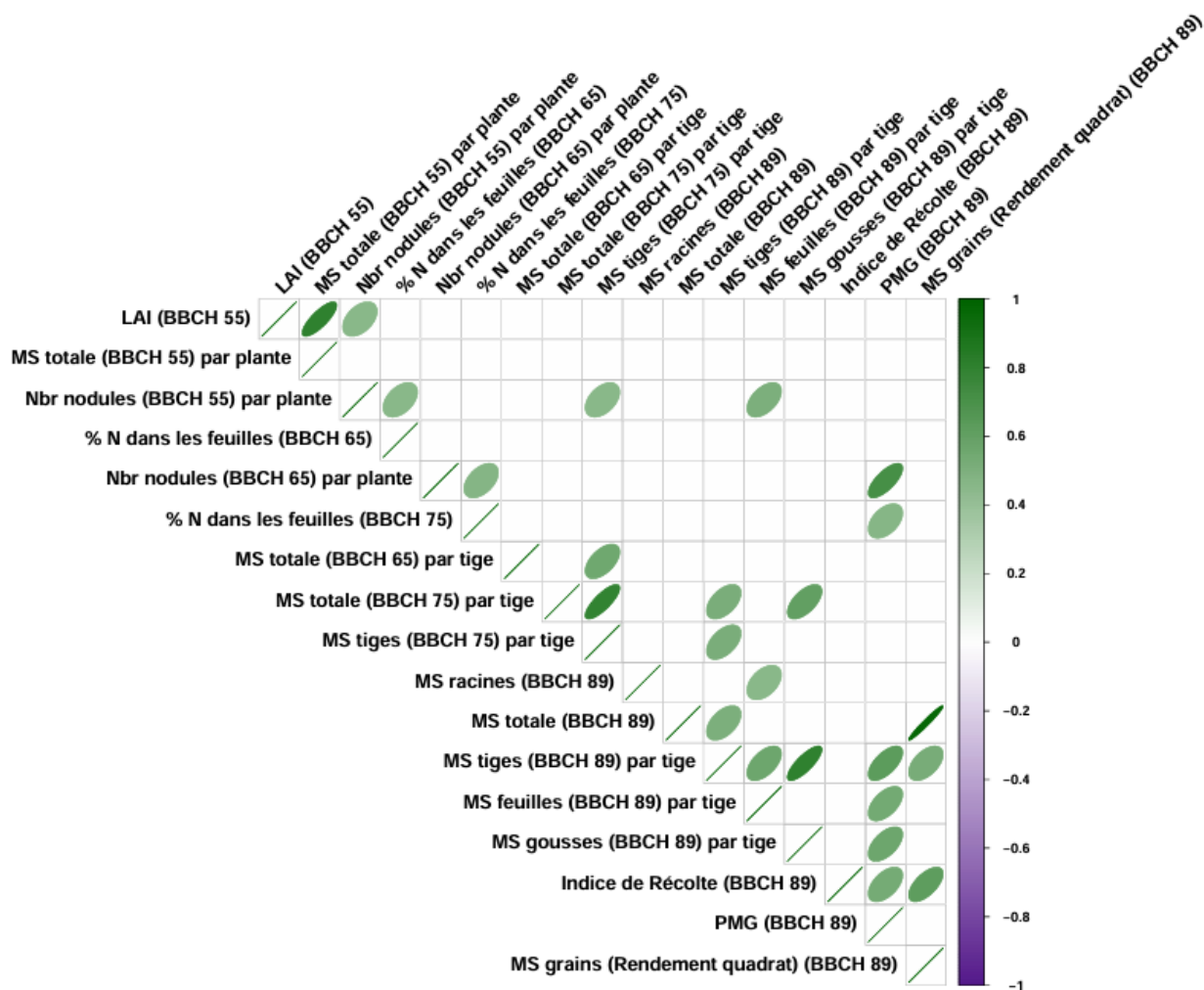


Figure 45: Matrice de corrélation entre les variables intervenant dans l'approche par la matière sèche.

Rem : une matrice de corrélation avec les mêmes variables mais avec le détail des valeurs de corrélation  $r$  et les  $p$ -valeurs est disponible en annexe 13

### 5.6.3 Analyse en composante principale

Sur base des mesures étudiées ci-dessus permettant de comprendre l'élaboration de rendement de la féverole d'hiver, il est désormais possible de sélectionner les variables utiles pour réaliser une analyse en composante principale (figure 46). Cela permet de comprendre sur base de quoi les variétés se différencient en terme de rendement en se basant cette fois sur le rendement parcellaire avec la moissonneuse batteuse (à posteriori dans l'ACP, en pointillé) ainsi que sur les variables permettant d'expliquer au mieux le rendement.

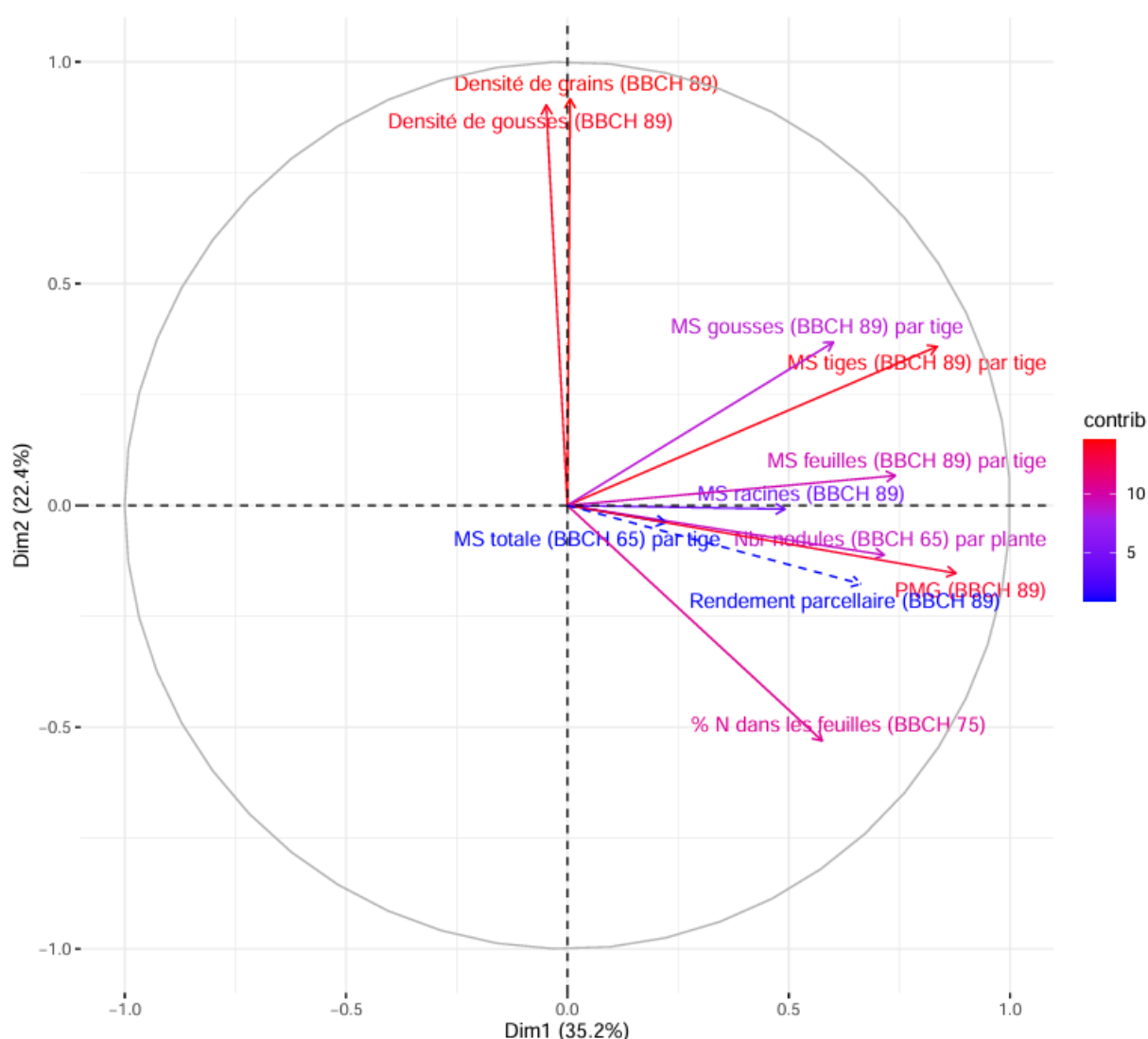


Figure 46: Analyse en composante principale.

Les variables liées à l'approche par la matière sèche ont tendance à s'aligner avec la dimension 1 tout comme le rendement. Les variables liées aux composantes de rendement s'alignent fortement avec la deuxième dimension. Les variétés situées plus à droite sont donc plus performantes en terme de capacité de remplissage de grains tandis que les variétés situées

plus haut selon la deuxième dimension sont plus performantes en terme de force puits avec une densité de gousses et de grains plus élevée.

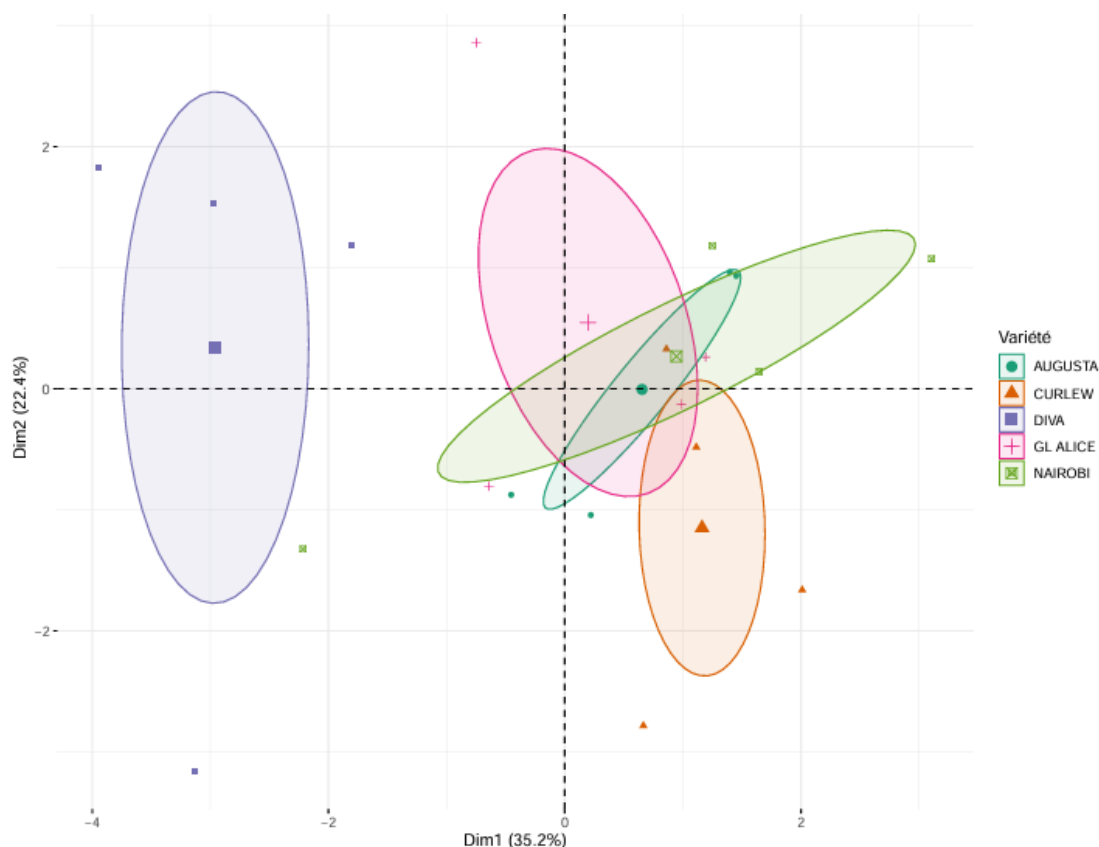


Figure 47: Position des variétés selon les axes de l'analyse en composante principale.

Les différentes variétés étudiées se différencient peu selon la deuxième dimension mais s'étalent plus selon la première dimension. La première dimension permet donc d'expliquer mieux les différences entre les variétés. Les faibles écarts selon la deuxième dimension correspondent à l'absence de différence significative entre les variétés pour la densité de grains, les légers écarts entre les variétés selon la deuxième dimension peuvent donc s'expliquer par les différences en terme de densité de gousses et les légères différences en terme de densité de grains, même si celles-ci ne sont pas significatives. Cependant les différences de rendement vont principalement s'expliquer par les différences de PMG entre les variétés qui elles, sont significatives.

Le rendement d'AUGUSTA (5,71 t/ha, le plus élevé) peut s'expliquer par une bonne combinaison entre la force source et la force puits. En effet, sa densité de grains est la plus élevée (même si les différences ne sont pas significatives). Son PMG est également élevé (520,73g) ce qui s'explique par un nombre de nodules élevé, favorisant une teneur en azote dans les feuilles plus élevée durant le remplissage, permettant le maintien de son activité photosynthétique. La biomasse élevée de ses tiges participe également au remplissage des grains via la translocation des assimilats.

Le rendement de DIVA (4,53 t/ha, le plus faible) s'explique majoritairement par son faible PMG (459,89 g, le plus faible). Ce faible PMG est lié à son plus faible nombre de nodules, plus faible taux d'azote dans les feuilles au moment du remplissage favorisant une maturité plus précoce.

## 6. Conclusion et recommandations

L'objectif principal était de déterminer l'impact du choix variétal sur le rendement de la féverole d'hiver. L'étude de l'élaboration du rendement a permis de comprendre que le rendement dépendait principalement de la mise en place d'un certain nombre de grains/m<sup>2</sup> ( $r=0,87$ ) sur base des composantes de rendement préalablement établies (densité de plantes, de tiges et gousses) et ensuite de la capacité de la plante à remplir ces grains ce qui se caractérise par le PMG. Une fois ces deux facteurs mis en évidence, les variétés ont pu être étudiées selon ces deux critères. L'absence de différence significative entre les variétés pour le nombre de grains/m<sup>2</sup> suggère que cette composante de rendement a été principalement limitée par les facteurs environnementaux et non par les facteurs génotypiques.

A l'inverse, la différence significative entre les variétés pour le PMG suggère que les variétés se distinguent sur base de leur capacité à remplir leur grain. En effet, 80% de la variabilité des composantes de rendement est due aux facteurs environnementaux sauf le PMG dont la part de variabilité expliquée par l'environnement est de 49% tandis que 40% de sa variabilité est expliquée par le génotype (Papastyliou et al., 2021). Cette capacité de remplissage semble liée à la précocité ainsi qu'à la capacité photosynthétique des plantes pendant le remplissage. Cette capacité photosynthétique dépend du nombre de nodules à la floraison permettant d'avoir une bonne nutrition azotée (Luo et al., 2024) et un taux d'azote dans les feuilles plus élevé durant le remplissage. En effet, la variété DIVA, la plus précoce à maturité, qui a perdu ses feuilles en premier a donné le rendement le plus faible. Les 4 autres variétés testées semblent mieux adaptées aux conditions pédoclimatiques de la Hesbaye. AUGUSTA et NAIROBI sont les deux variétés qui produisent le meilleur rendement.

Sur base des résultats obtenus la conclusion est que le choix variétal avec pour objectif d'atteindre un rendement élevé doit privilégier les variétés relativement tardives à maturité avec un PMG élevé.

### Recommandation :

L'étude pourrait être approfondie en étant reconduite :

- durant plusieurs années et dans des régions agricoles différentes afin de varier les conditions climatiques et pédologiques.
- en utilisant un semoir permettant d'augmenter l'homogénéité de la densité de plantes au sein des micro-parcelles et donc de diminuer la variabilité entre les quadrats prélevés.
- en approfondissant l'analyse de certaines mesures ayant montré des corrélations intéressantes dans cette étude. Par exemple, une mesure de l'activité des enzymes fixatrices d'azote dans les nodosités pourrait être réalisée potentiellement sur base de la méthode de la réduction de l'acétylène (Luo et al., 2024).

## **7.Contribution personnelle**

Lors de ce travail de fin d'étude, j'étais motivé à appliquer les compétences acquises au cours de mon cursus au travers d'une étude scientifique ainsi que d'en développer de nouvelles. Je me suis donc impliqué dans la prise des mesures et dans l'analyse de celles-ci pour réaliser un travail de qualité. Une fois le choix de mon sujet de TFE réalisé, le choix des mesures réalisées a été fait en collaboration avec ma co-promotrice et mon co-promoteur.

Les prélèvements et prises de mesures ont été réalisés par moi-même avec l'aide de ma co-promotrice. Ces prises de mesures ont nécessité une certaine organisation pour correspondre au mieux aux stades BBCH définis préalablement et s'adapter aux conditions du terrain. Certaines mesures telles que, entre autres, la mesure de la surface foliaire, le comptage et/ou décorticage des différents organes des plantes prélevées suivi du broyage de ces échantillons se sont révélées chronophage.

L'élaboration des codes sur Rstudio pour analyser les données a également nécessité du temps afin d'analyser correctement les données récoltées.

## 6. Bibliographie

2025 – Livre Blanc Céréales, n.d. .

Agromet.be, July-19-2025. . <https://agromet.be/fr/pages/home/>, (19/07/2025).

Alghamdi S., 2007. Genetic Behavior of Some Selected Faba Bean Genotypes. *Afr. Crop Sci Conf Proce* **8**.

Alharbi N.H. & Adhikari K.N., 2020. Factors of yield determination in faba bean (*Vicia faba*). *Crop Pasture Sci.* **71**(4), 305–321, DOI:10.1071/CP19103.

Ali Mohamed Osman A., Aziz Hamid Abdel Aziz A. & Bakheit Gailani M., 2013. Correlation between Seed Yield and Yield Components in Faba Bean (*Vicia faba* L.). , (24/02/2025).

Argaw A., 2012. Characterization of Symbiotic Effectiveness of Rhizobia Nodulating Faba bean (*Vicia faba* L.) Isolated from Central Ethiopia. *Res. J. Microbiol.* **7**(6), 280–296, DOI:10.17311/jm.2012.280.296.

Arvalis, UNIP & FNAMS, 2011. Féverole de printemps dans le Bassin Parisien. [https://www.arvalis.fr/sites/default/files/imported\\_files/fiche%20fp\\_bp%201215635262335879900.pdf](https://www.arvalis.fr/sites/default/files/imported_files/fiche%20fp_bp%201215635262335879900.pdf), (20/03/2025).

Arya R.K., Verma A. & V., 2022. Long-term evaluation of new elite genotypes of Faba bean (*Vicia faba* L.) by Superiority Index and AMMI analysis. *Indian J. Genet. Plant Breed.* **82**(02), 232–235, DOI:10.31742/IJGPB.82.2.14.

Bah B.B., Engels P. & Colinet G., 2005. Légende de la Carte numérique des sols de Wallonie.

Cartrysse C., Van der verren B., Vannoppen N., Campion M., Wavreille J. & Silvestre P., 2024. La féverolle, une légumineuse à graines riches en protéines et en énergie.

Cernay C., 2016. Identifier des légumineuses à graines productives en Europe par synthèses quantitatives de données à large échelle.

Chaieb N., Bouslama M. & Mars M., 2011. Growth and yield parameters variability among faba bean (*Vicia faba* L.) Genotypes.

De Ron A.M. (Ed.), 2015. *Grain Legumes*, Handbook of Plant Breeding, Springer New York, New York, NY.

Deb B.R. & Paul S.K., 2024. Agronomic Management of Faba Bean (*Vicia faba* L.): A Review. *Turk. J. Agric. - Food Sci. Technol.* **12**(s1), 2166–2179, DOI:10.24925/turjaf.v12is1.2166-2179.7102.

Domergue O., 2017. Diversité fonctionnelle des rhizobia associés à la féverole en agro-écosystème Sud de France.

Duc G., 1997. Faba bean (*Vicia faba* L.).

Ercoli J. & D’haene M., 2022. 31-01-22 -  
\_filieres\_proteines\_vegetales\_jorge\_ercoli\_marine\_dhaene.  
[https://centrespilotes.be/media/filer\\_public/c6/56/c656b601-c7d4-4684-ad3b-](https://centrespilotes.be/media/filer_public/c6/56/c656b601-c7d4-4684-ad3b-)



1d5e289bd8c0/31-01-22\_-\_filières\_proteines\_vegetales\_jorge\_ercoli\_marine\_dhaene.pdf, (27/03/2025).

Etemadi F., Hashemi M., Zandvakili O. & Mangan F.X., 2018. Phenology, Yield and Growth Pattern of Faba Bean Varieties. *Int. J. Plant Prod.* **12**(4), 243–250, DOI:10.1007/s42106-018-0023-1.

Eveno M., Planchon O., Oszwald J., Dubreuil V. & Quénol H., 2016. Variabilité et changement climatique en France de 1951 à 2010 : analyse au moyen de la classification de Köppen et des « types de climats annuels ». *Climatologie* **13**, 47–70, DOI:10.4267/climatologie.1203.

Exploitations agricoles et horticoles | Statbel, February-24-2025. . <https://statbel.fgov.be/fr/themes/agriculture-peche/exploitations-agricoles-et-horticoles#figures>, (24/02/2025).

Falconnier G.N., Journet E.-P., Bedoussac L., Vermue A., Chlébowski F., Beaudoin N. & Justes E., 2019. Calibration and evaluation of the STICS soil-crop model for faba bean to explain variability in yield and N<sub>2</sub> fixation. *Eur. J. Agron.* **104**, 63–77, DOI:10.1016/j.eja.2019.01.001.

FAOSTAT, February-10-2025. . <https://www.fao.org/faostat/fr/#data/QCL>, (10/02/2025).

Gela T.S., Khazaei H., Podder R. & Vandenberg A., 2023. Dissection of genotype-by-environment interaction and simultaneous selection for grain yield and stability in faba bean (*Vicia faba* L.). *Agron. J.* **115**(2), 474–488, DOI:10.1002/agj2.21268.

Google Maps, March-14-2025. . *Google Maps*. [https://www.google.com/maps/place/Isnes,+Gembloux/@50.4980238,4.7316985,756m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x47c1835ba788a847:0x412b84d36046264b!8m2!3d50.50598!4d4.72827!16s%2Fg%2F122zkc7h?entry=tту&g\\_ep=EgoyMDI1MDMxMS4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D](https://www.google.com/maps/place/Isnes,+Gembloux/@50.4980238,4.7316985,756m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x47c1835ba788a847:0x412b84d36046264b!8m2!3d50.50598!4d4.72827!16s%2Fg%2F122zkc7h?entry=tту&g_ep=EgoyMDI1MDMxMS4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D), (14/03/2025).

Grains research & development corporation, 2017. GrowNote-Faba-Bean-North-4-Physiology.

Guinet M., 2019. Quantification des flux d'azote induits par les cultures de légumineuses et étude de leurs déterminants: comparaison de 10 espèces de légumineuses à graines.

INPN, February-3-2025. *Vicia faba* L., 1753 - Vesce fève, Fève, Féverole, Féverolle. *Inventaire Natl. Patrim. Nat.* [https://inpn.mnhn.fr/espece/cd\\_nom/129171](https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/129171), (03/02/2025).

IRM - Climatogrammes periode 1991-2020, July-18-2025. . *KMI*. <https://www.meteo.be/fr/climat/climats-dans-le-monde/climatogrammes-periode-1991-2020>, (18/07/2025).

IRM - Hiver, July-19-2025. . *KMI*. <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/bilans-climatologiques/2025/hiver>, (19/07/2025).

IRM - Printemps, July-19-2025. . *KMI*. <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/bilans-climatologiques/2025/printemps>, (19/07/2025).

Jia Y. & Gray V.M., 2003. Interrelationships Between Nitrogen Supply and Photosynthetic Parameters in *Vicia faba* L. *Photosynthetica* **41**(4), 605–610, DOI:10.1023/B:PHOT.0000027527.08220.2c.

- Krylova E.A., Khlestkina E.K., Burlyaeva M.O. & Vishnyakova M.A., 2020. Determinate growth habit of grain legumes: role in domestication and selection, genetic control. *Ecol. Genet.* **18**(1), 43–58, DOI:10.17816/ecogen16141.
- Kumar P., Das R.R., Bishnoi S.K. & Sharma V., 2017. Inter-correlation and path analysis in faba bean ( *Vicia faba* L.). *Electron. J. Plant Breed.* **8**(1), 395, DOI:10.5958/0975-928X.2017.00059.X.
- Lake L., Godoy-Kutchartt D.E., Calderini D.F., Verrell A. & Sadras V.O., 2019. Yield determination and the critical period of faba bean (*Vicia faba* L.). *Field Crops Res.* **241**, 107575, DOI:10.1016/j.fcr.2019.107575.
- Lenoir A., Slafer G.A., Siah A. & Dumont B., 2023. Plasticity of wheat yield components in response to N fertilization. *Eur. J. Agron.* **150**, 126933, DOI:10.1016/j.eja.2023.126933.
- López-Bellido F.J., López-Bellido L. & López-Bellido R.J., 2005. Competition, growth and yield of faba bean (*Vicia faba* L.). *Eur. J. Agron.* **23**(4), 359–378, DOI:10.1016/j.eja.2005.02.002.
- Luo F., Mi W. & Liu W., 2024. Legume–grass mixtures improve biological nitrogen fixation and nitrogen transfer by promoting nodulation and altering root conformation in different ecological regions of the Qinghai–Tibet Plateau. *Front. Plant Sci.* **15**, 1375166, DOI:10.3389/fpls.2024.1375166.
- Manning B.K., Adhikari K.N. & Trethowan R., 2020. Impact of sowing time, genotype, environment and maturity on biomass and yield components in faba bean (*Vicia faba*). *Crop Pasture Sci.* **71**(2), 147–154, DOI:10.1071/CP19214.
- Melak W., 2018. Morphophysiological and Symbiotic Characteristics of Rhizobia Nodulating Faba Bean (*Vicia faba* L.) from Bale, Ethiopia. *J. Biol.*
- Mínguez M.I. & Rubiales D., 2021. Faba bean. In: *Crop Physiology Case Histories for Major Crops*. Elsevier, 452–481.
- Musallam I.W., Haddad N.J., Tawaha A.-R.M. & Migdadi O.S., 2004. The Importance of Bee-Pollination in Four Genotypes of Faba Bean (*Vicia faba* L.) **6**(1).
- Nachi N. & Le Guen J., 1996. Dry matter accumulation and seed yield in faba bean ( *Vicia faba* L.) genotypes. *Agronomie* **16**(1), 47–59, DOI:10.1051/agro:19960103.
- Ney B., Dore T. & Sagan M., 1997. Grain Legumes. In: Lemaire, G. ed. *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 107–117.
- Papastylianou P., Vlachostergios D.N., Dordas C., Tigka E., Papakaloudis P., Kargiotidou A., Pratsinakis E., Koskosidis A., Pankou C., Kousta A., Mylonas I., Tani E., Abraham E.M., Karatassiou M. & Kostoula S., 2021. Genotype X Environment Interaction Analysis of Faba Bean (*Vicia faba* L.) for Biomass and Seed Yield across Different Environments. *Sustainability* **13**(5), 2586, DOI:10.3390/su13052586.
- Patrick J.W. & Stoddard F.L., 2010. Physiology of flowering and grain filling in faba bean. *Field Crops Res.* **115**(3), 234–242, DOI:10.1016/j.fcr.2009.06.005.
- PCNSW, 2005. Principaux types de sols de la Région wallonne (Belgique).

- Peel M.C., Finlayson B.L. & McMahon T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **11**(5), 1633–1644, DOI:10.5194/hess-11-1633-2007.
- Plūduma-Pauniņa I., Gaile Z., Bankina B. & Balodis R., 2019. Variety, seeding rate and disease control affect faba bean yield components 509.8Kb, DOI:10.15159/AR.19.079.
- Punia Bangar S. & Bala Dhull S. (Eds.), 2022. *Faba Bean: Chemistry, Properties and Functionality*, Springer International Publishing, Cham.
- Reynolds M.P., Slafer G.A., Foulkes J.M., Griffiths S., Murchie E.H., Carmo-Silva E., Asseng S., Chapman S.C., Sawkins M., Gwyn J. & Flavell R.B., 2022. A wiring diagram to integrate physiological traits of wheat yield potential. *Nat. Food* **3**(5), 318–324, DOI:10.1038/s43016-022-00512-z.
- Rothardt S., Fuß R., Pahlmann I. & Kage H., 2021. Post-Harvest N<sub>2</sub>O Emissions Can Be Mitigated With Organic Amendments. *Front. Environ. Sci.* **9**, 712013, DOI:10.3389/fenvs.2021.712013.
- Sandaña P. & Calderini D.F., 2019. Source–Sink Relationships in Cereals and Legumes. In: Savin, R., Slafer, G.A. eds. *Crop Science*. Springer New York, New York, NY, 185–194.
- Schilperoord P., 2016. La fève commune des champs.
- Schmaucks T., 2022. Development, Biomass and Nitrogen Allocation, and Seed-Yield Components in Faba Bean (*Vicia faba*).
- Schneider A. & Huyghe C., 2015. *Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables*, éditions Quae.
- Sharifi P., 2015. Genetic variation for seed yield and some of agro-morphological traits in faba bean (*Vicia faba* L.) genotypes. *Acta Agric. Slov.* **105**(1), DOI:10.14720/aas.2015.105.1.08.
- Singh A.K., Bharati R.C., Manibhushan N.C. & Pedpati A., 2016. An assessment of faba bean (*vicia faba* L.) current status and future prospect.
- Singh A.K., Yasin J.K., Kumar R. & Sundaram P.K., 2017. Extent and Pattern of Seed Setting in Faba Bean under Self and Open Pollination Arrangement and its influence on Seed Production. *J. AgriSearch* **4**(04), DOI:10.21921/jas.v4i04.10198.
- Smith C., Rendón A., Barahona R. & Moya W., 2021. Consequences of the high abundance of *Bombus terrestris* on the pollination of *Vicia faba*. *J. Pollinat. Ecol.* **29**, DOI:10.26786/1920-7603(2021)630.
- Soratto R.P., Sandaña P., Sousa W.S., Fernandes A.M. & Ciampitti I.A., 2025. Critical nitrogen dilution curve for estimating nitrogen nutrition index of common beans. *Field Crops Res.* **322**, 109713, DOI:10.1016/j.fcr.2024.109713.
- Streit J., 2019. Biomass, root distribution and overyielding potential of faba bean/wheat and white clover/ryegrass mixtures (Doctoral Thesis).
- Suso M.J., Moreno M.T., Mondragao-Rodrigues F. & Cubero J.I., 1996. Reproductive biology of *Vicia faba*: role of pollination conditions. *Field Crops Res.* **46**(1–3), 81–91, DOI:10.1016/0378-4290(95)00089-5.

Toker C., 2004. Estimates of broad-sense heritability for seed yield and yield criteria in faba bean (*Vicia faba* L.): Broad-sense heritability for yield faba bean. *Hereditas* **140**(3), 222–225, DOI:10.1111/j.1601-5223.2004.01780.x.

Turpin J.E., Herridge D.F. & Robertson M.J., 2002. Nitrogen fixation and soil nitrate interactions in field-grown chickpea (*Cicer arietinum*) and fababean (*Vicia faba*). *Aust. J. Agric. Res.* **53**(5), 599, DOI:10.1071/AR01136.

Wafa H. & Heakel R., 2022. GENETIC VARIABILITY, CORRELATION AND FACTOR ANALYSIS FOR YIELD AND YIELD COMPONENTS OF SOME FABABEAN (*Vicia faba* L.) GENOTYPES. *Sinai J. Appl. Sci.* **11**(6), 1117–1128, DOI:10.21608/sinjas.2023.169776.1158.

Y. BELACHEW K., SÖDERHOLM-EMAS A., F.E. TOPP C., A. WATSON C. & L. STODDARD F., 2023. Management factors affecting faba bean yield.

## 7. Annexes

### Annexe 1: Autres tableaux de corrélations

**Table 7.** Pearson correlation coefficients and levels of significance between agronomic traits. Plant height (PH), number of pods per plant (PP), number of seeds per plant (SP), 1000-seed weight (TSW), seed yield (SY), earliness (EAR), and biomass yield (BY). Data were combined over genotypes, environments, and replications ( $n = 144$ ).

	BY	SY	PH	PP	SP	TSW
SY	0.455 **					
PH	0.674 **	0.380 **				
PP	0.263 **	0.491 **	0.068 <sup>ns</sup>			
SP	0.237 **	0.439 **	0.050 <sup>ns</sup>	0.977 **		
TSW	0.202 *	0.126 <sup>ns</sup>	-0.158 <sup>ns</sup>	0.141 <sup>ns</sup>	0.176 *	
EAR	0.440 **	-0.173 *	0.320 **	-0.404 **	-0.374 **	0.071 <sup>ns</sup>

ns: non-significant ( $p > 0.05$ ); \*, \*\* significant at  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$  levels of probability, respectively.

*Figure annexe 1 : Matrice de corrélation(Papastylianou et al., 2021).*

**Table 5.** Simple correlation coefficient between seed yield and its contributing characters in faba bean (over two seasons)

Character	Plant height (cm)	Number of branches/plant	Number of pods/plant	Number of seeds/pod	100-seed weight (g)
Plant height (cm)	1				
Number of branches/plant	-0.328ns	1			
Number of pods/plant	-0.441 *	0.881 **	1		
Number of seeds/pod	0.440ns	0.190ns	-0.013ns	1	
100-seed weight (g)	-0.166ns	0.814 **	0.739 **	0.029ns	1
Seed yield/fed (ton)	-0.323ns	0.783 **	0.844 **	0.021ns	0.861 **

ns, \* and \*\* indicate insignificant, significant at 5% and highly significant at 0.01%, levels of probability, respectively.

*Figure annexe 2: Matrice de corrélation(Wafa et al., 2022).*

**Table 1. Correlation between yield and its component traits in faba bean**

Characters	Days to 50% flowering	Days to maturity	Plant height	Branches per plant	Clusters per plant	Pods per plant	Pod length	Seed per pod	100 seed weight
Days to maturity	0.915**								
Plant height (cm)	-0.020	-0.218**							
Branches per plant	0.506**	0.471**	-0.210**						
Cluster per plant	0.219**	0.216**	0.167*	0.096					
Pods per plant	-0.041	0.092	-0.004	0.037	0.585**				
Pod length (cm)	0.551**	0.277**	0.337**	0.143*	-0.025	-0.253**			
Seeds per pod	0.682**	0.526**	0.108	0.196**	0.261**	-0.101	0.787**		
100 seed weight (g)	0.891**	0.761**	0.174*	0.467**	0.314**	-0.006	0.640**	0.649**	
Seed yield per plant (g)	0.798**	0.731**	0.070	0.541**	0.385**	0.216**	0.525**	0.587**	0.910**

\*, \*\* significant at 5 and 1 per cent level, respectively.

*Figure annexe 3: Matrice de corrélation(Kumar et al., 2017).*

## **Annexe 2: Autres techniques culturales couramment utilisées**

### *Place dans la rotation*

La féverole peut être utilisée en tant que culture de rente ou en tant qu'interculture. Sa position dans la rotation est généralement réfléchi par rapport à l'azote qu'elle apporte pour la culture suivante. Elle a également pour rôle de casser les cycles de bioagresseurs, de produire des ressources pour les pollinisateurs et de promouvoir l'activité des microbes du sol tout en réduisant les maladies telluriques (Deb et al., 2024).

### *Préparation du sol*

La féverole est rustique et peu exigeante en terme de structure du sol, une préparation grossière suffit (Cartrysse et al., 2024).

### *Semis*

Il est également possible d'inoculer les semences peu de temps avant le semis avec des bactéries (*R. leguminosarum* cv. *Viciae*) pour favoriser l'infection des racines dès la levée permettant de former plus rapidement les nodules. Cette inoculation permettant des gains de rendement compris entre 19 et 60% est particulièrement conseillée lorsque cela fait longtemps qu'il n'y a plus eu de légumineuse dans la parcelle (Y. BELACHEW et al., 2023; Deb et al., 2024).

### *Fertilisation*

La féverole ne nécessite aucun apport d'engrais azoté sous forme minérale ou organique, les apports d'azote réduisent le développement des nodosités et pénalisent le rendement en

favorisant la croissance végétative au détriment de la formation des graines et en augmentant la sensibilité à la verse (Cartrysse et al., 2024). En effet, la féverole échange une quantité suffisante d'assimilat avec les rhizobia pour une symbiose efficace, elle possède donc une capacité de fixation de l'azote élevée (Schmaucks, 2022).

La fertilisation en phosphore et en potassium peut être nécessaire selon les réserves de ces éléments dans le sol (Singh et al., 2016; Cartrysse et al., 2024). Les exportations par 100 kg de grains sont respectivement de 1,2 et 1,5 kg pour le P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et le K<sub>2</sub>O (Cartrysse et al., 2024). En effet, le phosphore est important pour les légumineuses. La réponse du rendement à la fertilisation en phosphore est élevée (Deb et al., 2024). Le soufre est également essentiel car il permet d'augmenter le rendement, la qualité et la fixation biologique d'azote (Deb et al., 2024).

### *Lutte contre les bioagresseurs*

Il est important d'appliquer la lutte intégrée contre les mauvaises herbes, les maladies et les ravageurs car si aucune méthode de lutte n'est appliquée, ces bioagresseurs peuvent causer d'importants dégâts dans certaines conditions. Par exemple, les adventices peuvent causer des pertes de rendement allant jusqu'à 50% ; pour la rouille les pertes peuvent osciller entre 22 et 42% tandis qu'elles varient entre 36 et 68% pour le Botrytis (Deb et al., 2024).

## **Annexe 3: Caractéristiques agronomiques et technologiques des 5 variétés étudiées avec le détail des sources utilisées**

Nom	GL ALICE			Nairobi	
Source	myvar	myvar	winterackerbohnen_gl_alice_2021	myvar	agriobtention
Obtenteur	Agri-Obtentions	Saatzucht Gleisdorf GmbH	SGZ, saatzucht gleisdorf	Agri Obtentions	Agri Obtentions
Pays d'inscription	France	Autriche	Autriche	France	France
Année d'inscription	2001	2017	n.d.	2021	2021
Précocité à floraison	1/2 précoce	Tardive	Intermédiaire	1/2 tardive	Tardive
Précocité à maturité	1/2 précoce	Tardive	Intermédiaire	1/2 tardive	Intermédiaire
Hauteur	Moyenne	Haute	Haute	Moyenne	Haute
Sensibilité à la verse	Assez tolérante	Tolérante	Tolérante	Très tolérante	Très résistante
Tolérance au froid	Tolérante	Tolérante	Tolérante	Moyennement tolérante	Moyennement tolérante
Sensibilité au botrytis	n.d.	n.d.	Peu sensible	n.d.	Peu sensible
Sensibilité à la rouille	n.d.	n.d.	Très peu sensible	n.d.	Moyennement tolérante
Sensibilité à l'ascochytose/antrachnose	Peu sensible	n.d.	n.d.	n.d.	Peu sensible
Coloration des fleurs	Colorées	Colorées	Colorées	Colorées	n.d.
Teneur en vicine-convicine	Elevée	n.d.	n.d.	Elevée	Elevée
Teneur en protéines	Faible	Faible	Moyenne	Elevée	Elevée
PMG	450-500 g	>550 g	Très élevé	>550 g	>550 g

Nom	Curlew		AUGUSTA	
Source	Norddeutsche Pflanzenzucht (NPZ)	RAGT semences	saaten union	CePiCOP
Obtenteur	Norddeutsche Pflanzenzucht (NPZ)	Norddeutsche Pflanzenzucht (NPZ)	Norddeutsche Pflanzenzucht (NPZ)	Norddeutsche Pflanzenzucht (NPZ)
Pays d'inscription	n.d.	France	n.d.	Allemagne
Année d'inscription	n.d.	2023	n.d.	2018
Précocité à floraison	Intermédiaire	1/2 précoce	Intermédiaire	n.d.
Précocité à maturité	Intermédiaire	1/2 tardive	Intermédiaire	n.d.
Hauteur	Faible à moyenne	Moyenne	Moyenne	113 cm
Sensibilité à la verse	Tolérante	Assez tolérante	Très tolérante	n.d.
Tolérance au froid	n.d.	Moyennement tolérante	Tolérante	n.d.
Sensibilité au botrytis	n.d.	Peu sensible	n.d.	n.d.
Sensibilité à la rouille	n.d.	Moyennement sensible	n.d.	n.d.
Sensibilité à l'ascochytose/antrachnose	n.d.	Peu sensible	n.d.	n.d.
Coloration des fleurs	n.d.	Colorées	n.d.	Colorées
Teneur en vicine-convicine	n.d.	Elevée	n.d.	Elevée
Teneur en protéines	Moyenne	Faible	Moyenne	n.d.
PMG	Moyen	>550 g	Moyen	540 g

*Figure annexe 4: Tableau complet des caractéristiques variétales avec les sources.*

## Annexe 4: Echelle BBCH de la féverole (source: (Meier, 2001))

### Féverole Weber und Bleiholder et al., 1990; Lancashire et al., 1991

#### Échelle BBCH des stades phénologiques de la féverole (*Vicia faba* L.)

Code	Définition
<b>Stade principal 0: germination</b>	
00	graine sèche
01	début de l'imbibition de la graine
03	imbibition complète
05	la radicule sort de la graine
07	la jeune pousse sort de la graine (apparition de la plumule)
08	la jeune pousse se dirige vers la surface du sol
09	la jeune pousse perce la surface du sol
<b>Stade principal 1: développement des feuilles<sup>1</sup></b>	
10	2 feuilles écailleuses visibles
11	première feuille étalée
12	2 feuilles étalées
13	3 feuilles étalées
1 .	et ainsi de suite ...
19	9 ou davantage de feuilles étalées
<b>Stade principal 2: formation de pousses latérales</b>	
20	pas de pousses latérales
21	début du développement de pousses latérales: première pousse latérale discernable
22	2 pousses latérales discernables
23	3 pousses latérales discernables
2 .	et ainsi de suite ...
29	fin du développement de pousses latérales, 9 ou davantage de pousses latérales
<b>Stade principal 3: élongation de la tige principale</b>	
30	début de l'élongation de la tige principale
31	l'élongation du premier entre-nœud est visible <sup>2</sup>
32	2 entre-nœuds visibles
33	3 entre-nœuds visibles
3 .	et ainsi de suite ...
39	9 ou davantage d'entre-nœuds visibles

<sup>1</sup> L'élongation de la tige principale peut intervenir avant le stade 19, dans ce cas continuez avec le stade de développement principal 3

<sup>2</sup> Le premier entre-nœud pour la féverole se situe entre le nœud de la feuille écailluse et le nœud de la première vraie feuille



## **Féverole** Weber und Bleiholder et al., 1990; Lancashire et al., 1991

### **Échelle BBCH des stades phénologiques de la féverole**

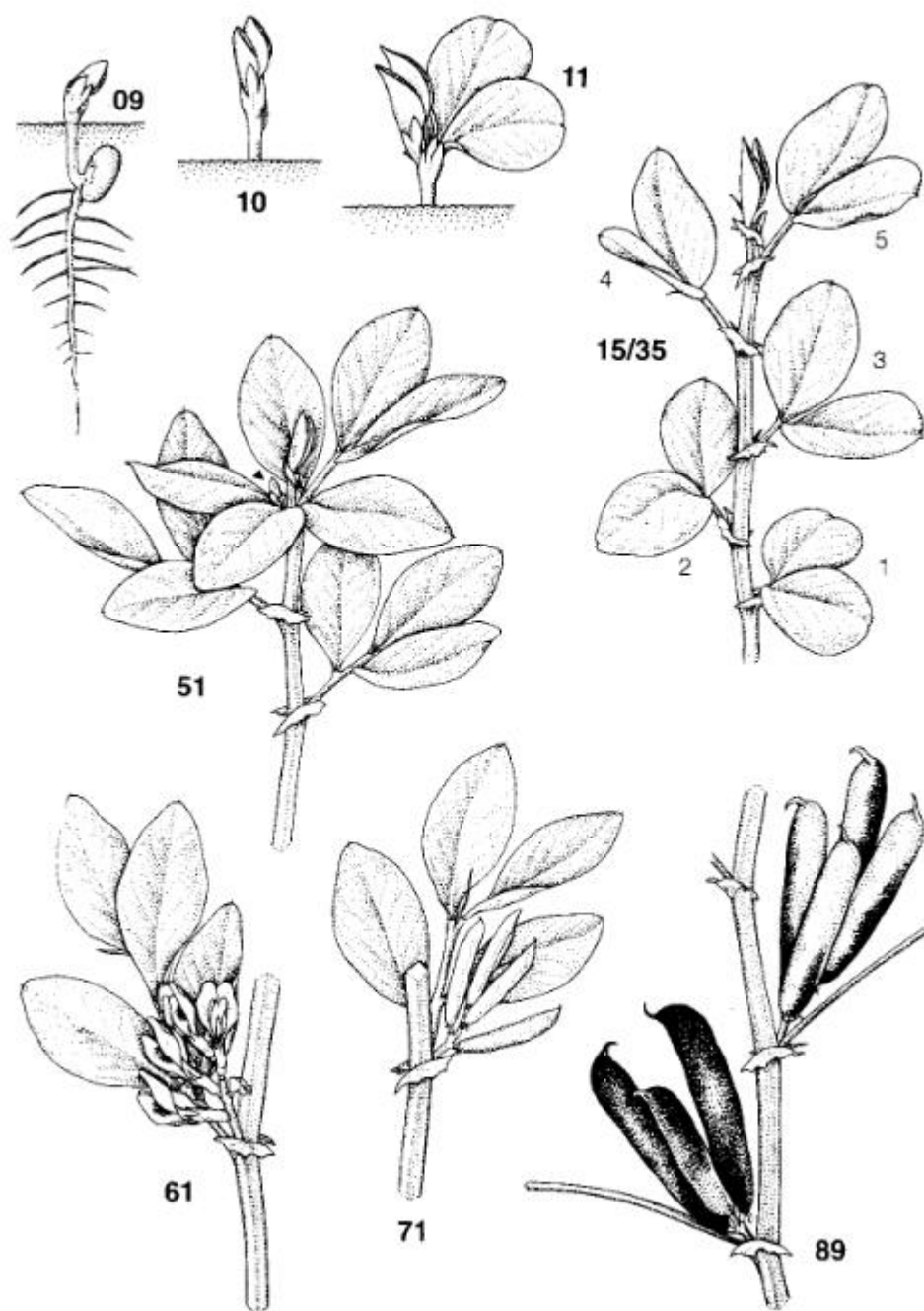
Code	Définition
<b>Stade principal 5: apparition de l'inflorescence</b>	
50	les boutons floraux sont formés mais toujours enveloppés par des feuilles
51	les premiers boutons floraux sont visibles et ne sont plus enveloppés par des feuilles
55	les premiers boutons floraux sont individuellement visibles, toujours fermés mais dégagés des feuilles
59	les premiers pétales et de nombreux boutons floraux individuels toujours fermés sont visibles
<b>Stade principal 6: la floraison</b>	
60	les premières fleurs sont ouvertes
61	les fleurs de la première grappe sont ouvertes
63	les fleurs sont ouvertes sur 3 grappes par plante
65	pleine floraison: les fleurs sont ouvertes sur 5 grappes par plante
67	la floraison s'achève
69	fin de la floraison
<b>Stade principal 7: développement du fruit</b>	
70	la première gousse a atteint sa longueur finale
71	10% des gousses ont atteint leur taille finale
72	20% des gousses ont atteint leur taille finale
73	30% des gousses ont atteint leur taille finale
74	40% des gousses ont atteint leur taille finale
75	50% des gousses ont atteint leur taille finale
76	60% des gousses ont atteint leur taille finale
77	70% des gousses ont atteint leur taille finale
78	80% des gousses ont atteint leur taille finale
79	presque toutes les gousses ont atteint leur taille finale

## Féverole Weber und Bleiholder et al., 1990; Lancashire et al., 1991

### Échelle BBCH des stades phénologiques de la féverole

Code	Définition
<b>Stade principal 8: maturation des fruits et graines</b>	
80	début de la maturation: les graines sont vertes et remplissent les gousses
81	10% des gousses sont à maturité, les graines sont sèches et dures
82	20% des gousses sont à maturité et de couleur foncée, les graines sont sèches et dures
83	30% des gousses sont à maturité et de couleur foncée, les graines sont sèches et dures
84	40% des gousses sont à maturité et de couleur foncée, les graines sont sèches et dures
85	50% des gousses sont à maturité et de couleur foncée, les graines sont sèches et dures
86	60% des gousses sont à maturité et de couleur foncée, les graines sont sèches et dures
87	70% des gousses sont à maturité et de couleur foncée, les graines sont sèches et dures
88	80% des gousses sont à maturité et de couleur foncée, les graines sont sèches et dures
89	maturation complète: presque toutes les gousses sont foncées, les graines sont sèches et dures
<b>Stade principal 9: sénescence</b>	
93	la tige devient plus foncée
95	50% de la tige est brune ou noire
97	plante desséchée et morte
99	produit après récolte

# Féverole



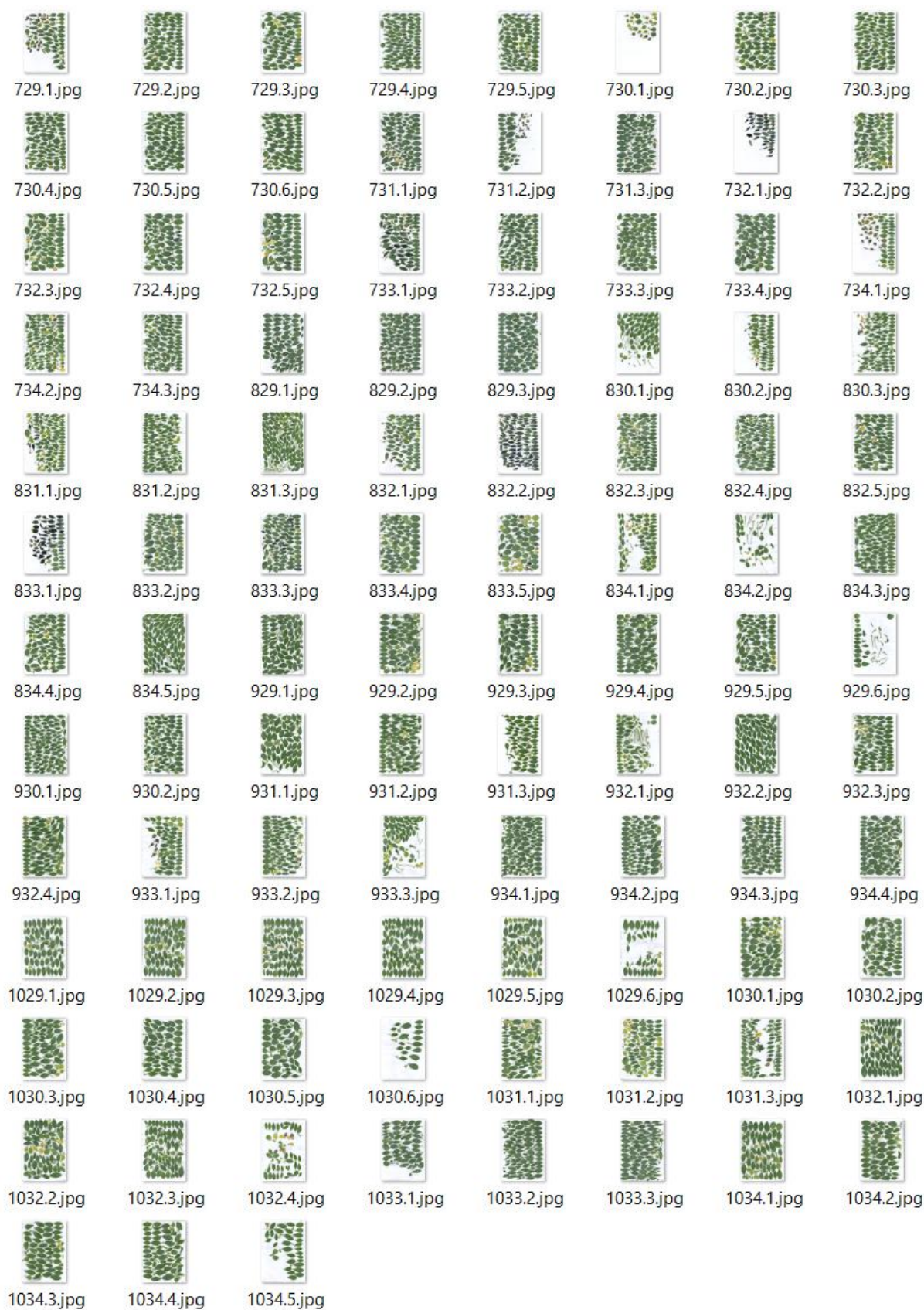
## Annexe 5: Scan LAI

Scan LAI BBCH 55 :





# Scan LAI BBCH 65 :



## Annexe 6: Boxplots de la biomasse des tiges et des feuilles au stade BBCH 55

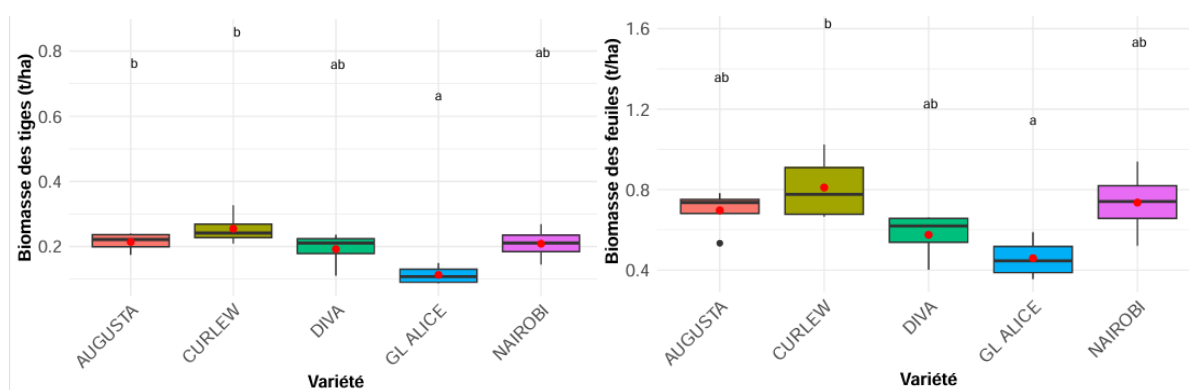


Figure annexe 5: Boxplot de la biomasse des tiges à gauche et de la biomasse des feuilles à droite pour le stade BBCH 55.

## Annexe 7: Résultats des tests de significativité des différentes variables mesurées pour le facteur variété

Le tableau reprend les p-valeur obtenues à l'issu des tests anova réalisés sur les modèles statistiques développés. Les niveaux de significativité sont représentés par les astérisques (\* : significatif, \*\* : hautement significatif, et \*\*\* : très hautement significatif)

Tableau annexe 1: Synthèse des p-valeurs.

Mesure	Stade					
	BBCH 12	BBCH 50	BBCH 55	BBCH 65	BBCH 75	BBCH 89
Biomasse des tiges			0,00763**	0,342 n.s.	0,325 n.s.	0,026*
Biomasse des feuilles			0,0211*	0,965 n.s.	0,399 n.s.	0,00016***
Biomasses des gousses					0,835 n.s.	0,0911 n.s.
Biomasse des grains					0,292 n.s.	0,804 n.s.
Biomasse aérienne totale			0,0161*	0,743 n.s.	0,945 n.s.	0,516 n.s.
Taux d'azote des tiges			0,961 n.s.	0,000527***	0,547 n.s.	
Taux d'azote des feuilles			0,0176*	0,0402*	0,0365*	
Taux d'azote des gousses					9,13e-06***	
Taux d'azote des grains					0,00039***	
Indice de surface foliaire-LAI			0,00465**	0,183 n.s.		
Indice de récolte						0,513 n.s.
Biomasse des racines			4,12e-07***	0,656 n.s.		0,116 n.s.
Nombre de nodules/plante			0,00578**			
Sol : Teneur en C organique				0,416 n.s.		
Sol : Teneur en N-NO <sub>3</sub>				0,615 n.s.		0,253 n.s.
Sol : Teneur en N-NH <sub>4</sub>				0,574 n.s.		0,446 n.s.
Sol : Teneur en N total				0,324 n.s.		
Nombre de plantes/m <sup>2</sup>				0,467 n.s.		
Nombre de tiges/m <sup>2</sup>					0,00273**	
Nombre de tiges/plante					0,0083**	
Nombre d'étages/tige				1,18e-07***	1,79e-24***	
Hauteur		0,000839***	0,00504**	0,0362*	0,0233*	0,00582**
Nombre de fleurs/m <sup>2</sup>				0,25 n.s.		
Nombre de fleurs/tige				3,44e-05***		
Nombre d'étages en fleur/tige				5,34e-05***		
Nombre de fleurs/étage portant des fleurs				2,06e-23***		
Nombre de gousses/m <sup>2</sup>					0,464 n.s.	0,0305*
Nombre de gousses/tige					0,0196*	
Nombre d'étages portant des gousses/tige					0,0169*	
Nombre de gousses par étage portant des gousses					0,1356 n.s.	
Nombre de grains /m <sup>2</sup>					0,295 n.s.	
Nombre de grains/gousse					0,2635 n.s.	
Taux de fécondation					0,41 n.s.	
Poids de 1000 grains					0,000126***	0,0247*
Rendement grain						0,0211*

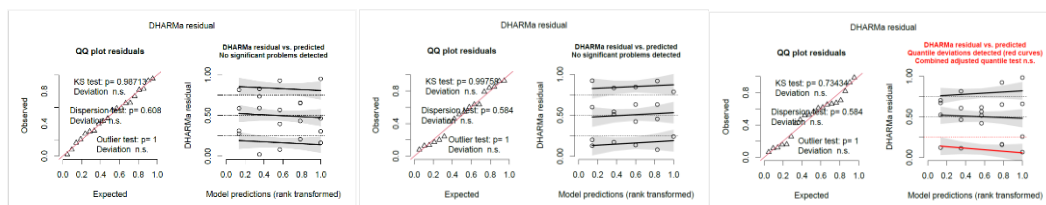
## Annexe 8: Résultats des tests de vérification des conditions de normalité et d'égalité des variances

Les graphiques fournis par DHARMA sont regroupés ci-dessous. Les QQplot situés à gauche permettent de vérifier la normalité des résidus qui est confirmée par la p-valeur non significative du KS test.

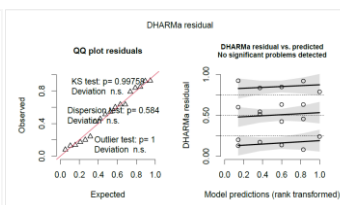
Les graphiques « residual vs predicted » sur la droite évaluent l'homogénéité des variances.

La normalité des résidus est toujours respectée, cependant, en raison du nombre d'observations parfois faible, des déviations par rapport aux quantiles ont été détectées pour la biomasse des tiges au stade BBCH 75, le nombre de tiges/plante aux stadex BBCH 75-89, le nombre de gousses/m<sup>2</sup> au stade BBCH 89, et le rendement grain au stade BBCH 89. Cependant, les

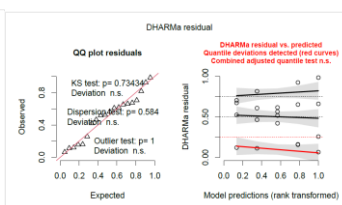
conditions d'application sont tout de même respectées avec des p-valeurs pour le test de Levene non significatives : respectivement : 0,13 ; 0,36 ; 0,99 ; 0,11.



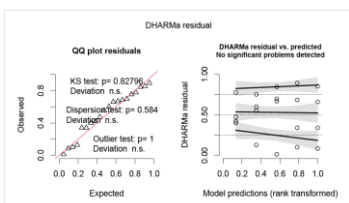
DHARMa Biomasse des tiges - BBCH 55



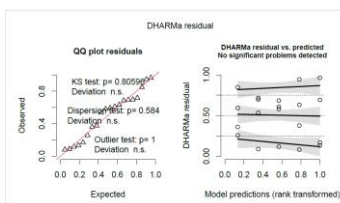
DHARMa Biomasse des tiges - BBCH 65



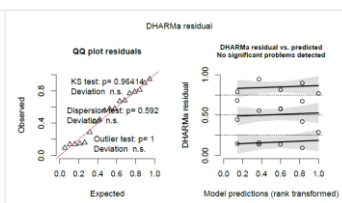
DHARMa Biomasse des tiges - BBCH 75



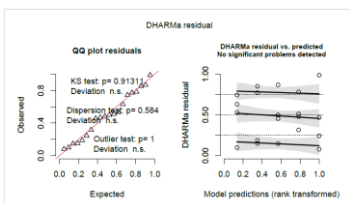
DHARMa Biomasse des tiges - BBCH 89



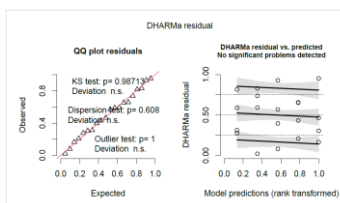
DHARMa Biomasse des feuilles - BBCH 55



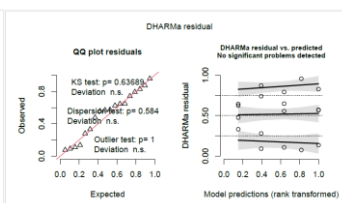
DHARMa Biomasse des feuilles - BBCH 65



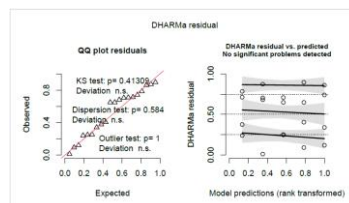
DHARMa Biomasse des feuilles - BBCH 75



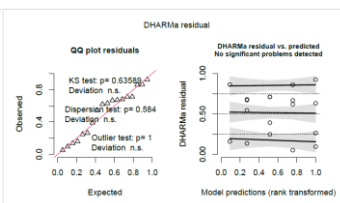
DHARMa Biomasse des feuilles - BBCH 89



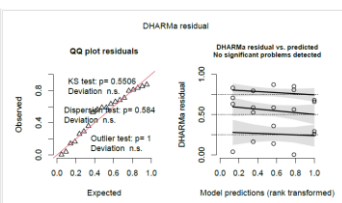
DHARMa Biomasse des gousses - BBCH 75



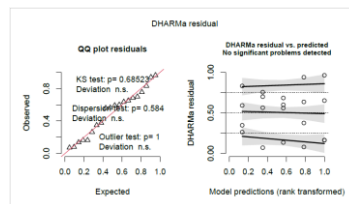
DHARMa Biomasse des gousses - BBCH 89



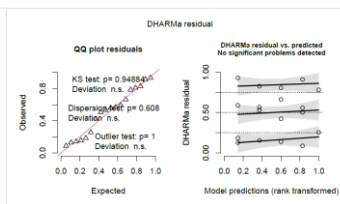
DHARMa Biomasse des grains - BBCH 75



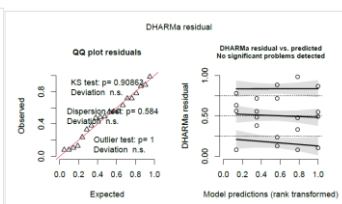
DHARMa Biomasse des grains - BBCH 89



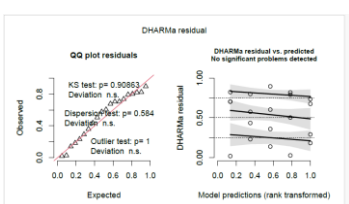
DHARMa Biomasse aérienne totale - BBCH 55



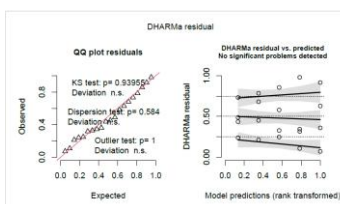
DHARMa Biomasse aérienne totale - BBCH 65



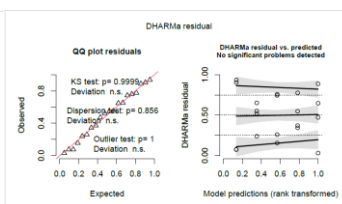
DHARMa Biomasse aérienne totale - BBCH 75



DHARMa Biomasse aérienne totale - BBCH 89

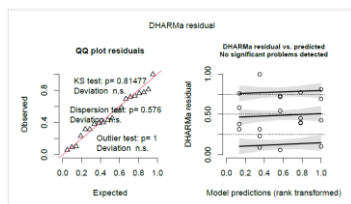


DHARMa Taux d'azote des tiges - BBCH 55

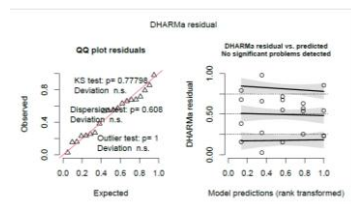


DHARMa Taux d'azote des tiges - BBCH 65

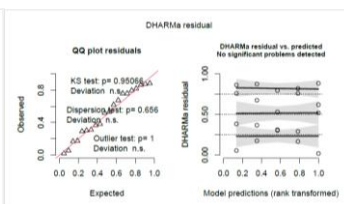




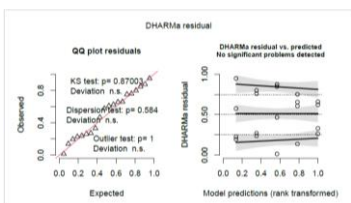
DHARMa Taux d'azote des tiges - BBCH 75



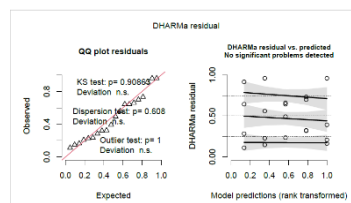
DHARMa Taux d'azote des feuilles - BBCH 55



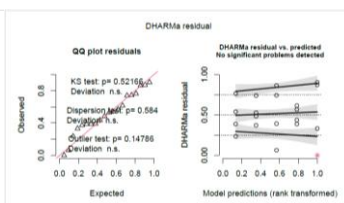
DHARMa Taux d'azote des feuilles - BBCH 65



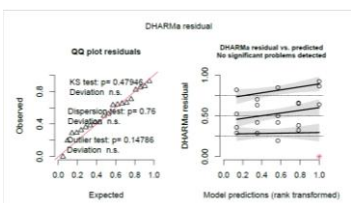
DHARMa Taux d'azote des feuilles - BBCH 75



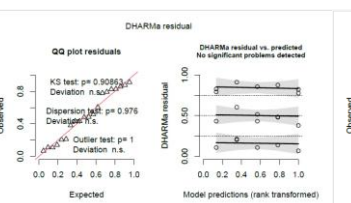
DHARMa Taux d'azote des gousses - BBCH 75



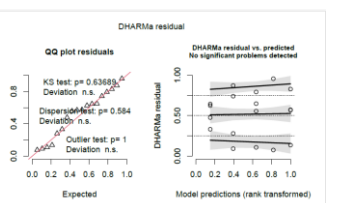
DHARMa Taux d'azote des grains - BBCH 75



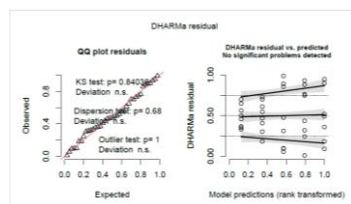
DHARMa Indice de surface foliaire-LAI - BBCH 55



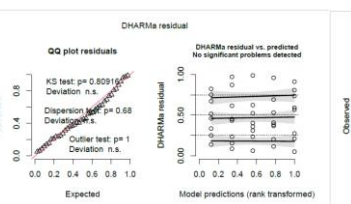
DHARMa Indice de surface foliaire-LAI - BBCH 65



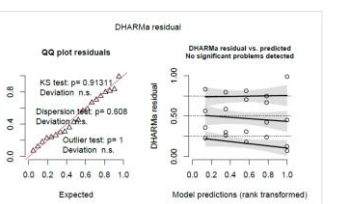
DHARMa Indice de récolte - BBCH 89



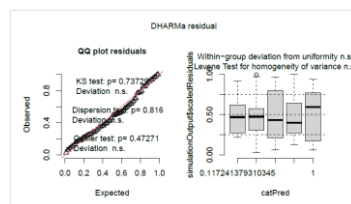
DHARMa Biomasse des racines - BBCH 55



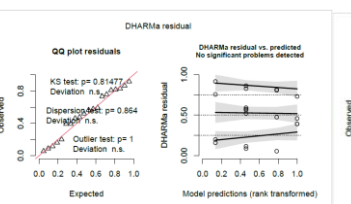
DHARMa Biomasse des racines - BBCH 65



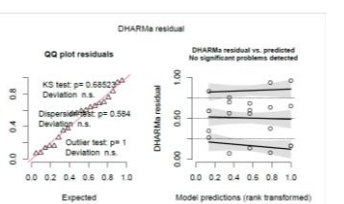
DHARMa Biomasse des racines - BBCH 89



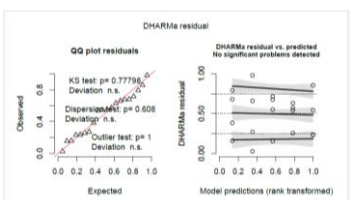
DHARMa Nombre de nodules/plante - BBCH 55-



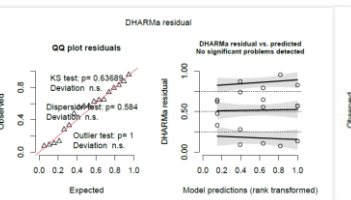
DHARMa Sol : Teneur en C organique - BBCH 65



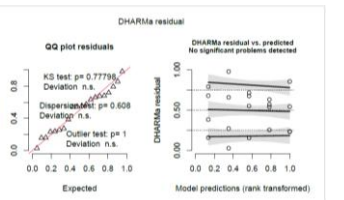
DHARMa Sol : Teneur en N-NO<sub>3</sub> - BBCH 65



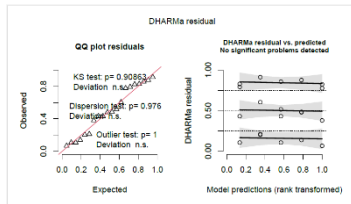
DHARMa Sol : Teneur en N-NO<sub>3</sub> - BBCH 89



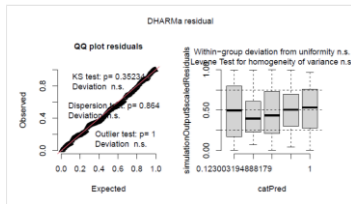
DHARMa Sol : Teneur en N-NH<sub>4</sub> - BBCH 65



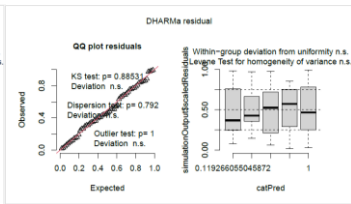
DHARMa Sol : Teneur en N-NH<sub>4</sub> - BBCH 89



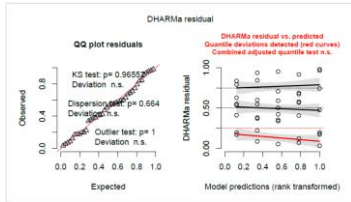
DHARMa Teneur en N total  
- BBCH 65



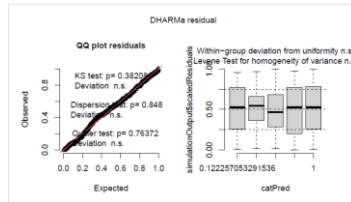
DHARMa Nombre de  
plantes/m<sup>2</sup> - BBCH 12-89



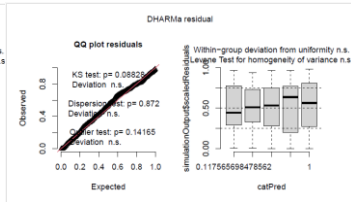
DHARMa Nombres de  
tiges/m<sup>2</sup> - BBCH 65-89



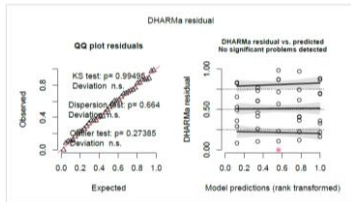
DHARMa Nombre de  
tiges/plante - BBCH 75-89



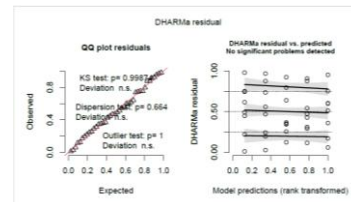
DHARMa Nombre  
d'étages/tige - BBCH 65



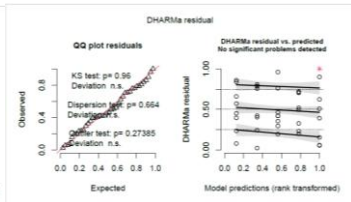
DHARMa Nombre  
d'étages/tige - BBCH 75



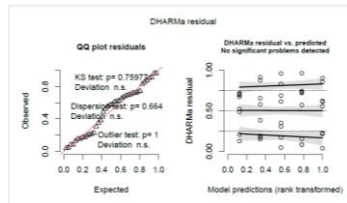
DHARMa Hauteur - BBCH  
50



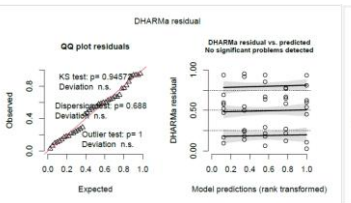
DHARMa Hauteur - BBCH  
55



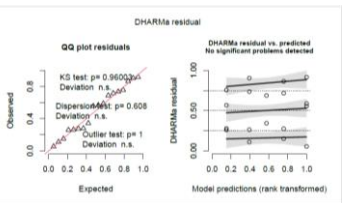
DHARMa Hauteur - BBCH  
65



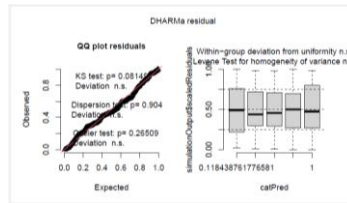
DHARMa Hauteur - BBCH  
75



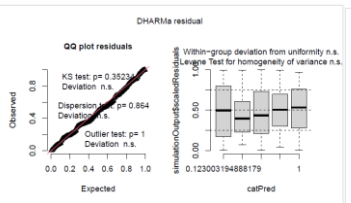
DHARMa Hauteur - BBCH  
89



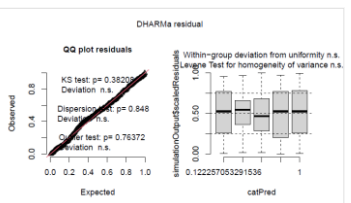
DHARMa Nombre de  
fleurs/m<sup>2</sup> - BBCH 65



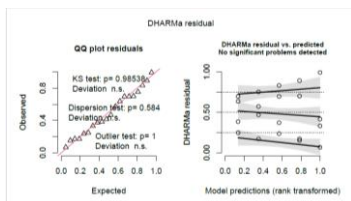
DHARMa Nombre de  
fleurs/tige - BBCH 65



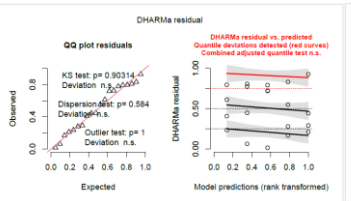
DHARMa Nombre d'étages  
en fleur/tige - BBCH 65



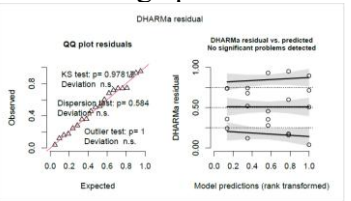
DHARMa Nombre de  
fleurs/étage portant des



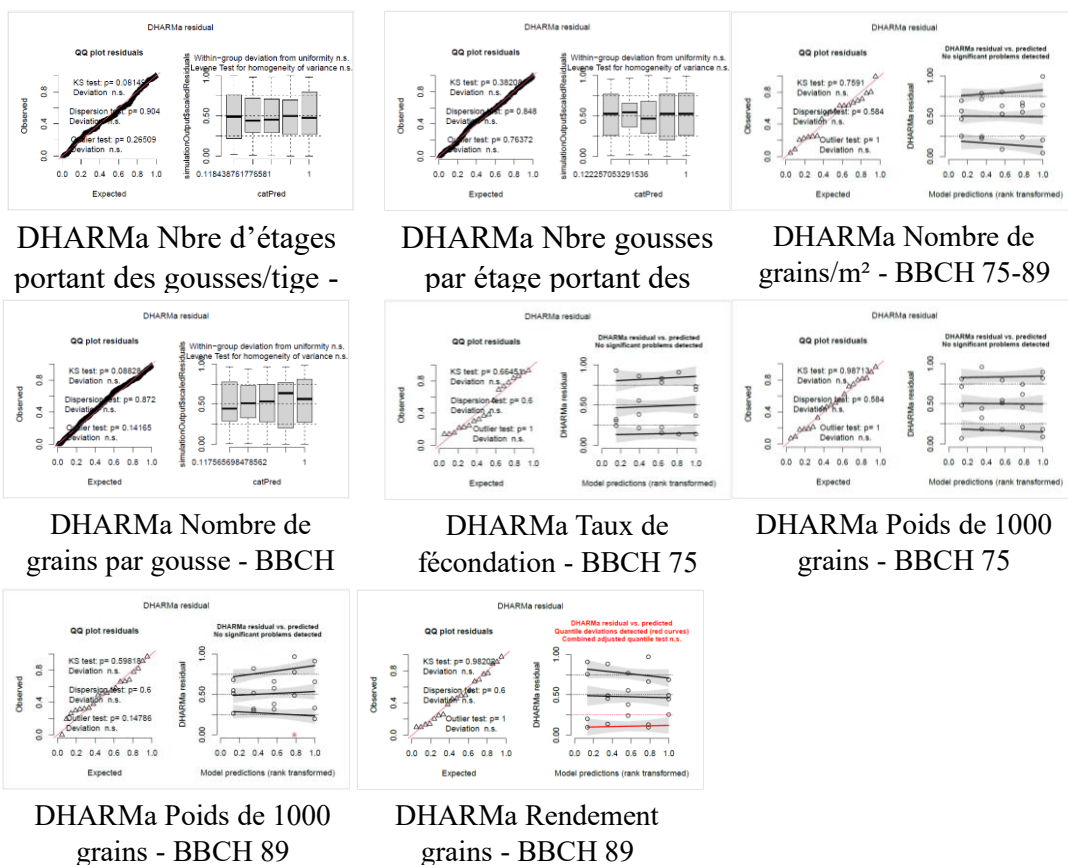
DHARMa Nombre de  
gousses/m<sup>2</sup> - BBCH 75



DHARMa Nombre de  
gousses/m<sup>2</sup> - BBCH 89



DHARMa Nombre de  
gousses/tige - BBCH 75



## Annexe 9: Résultats des analyses de sol réalisées à la sortie de l'hiver

Tableau annexe 2: Résultats des analyses de sol à la sortie de l'hiver.

Analyse	Unité	Sortie d'hiver	
		Horizon	Valeur
<b>Carbone organique</b>	g/kg de terre sèche	H1	11,5
<b>Humus</b>	% de terre sèche	H2	2,24
<b>Azote total</b>	g/100g de terre sèche	H3	0,11
<b>Azote nitrique</b>	kg N-NO <sub>3</sub> /ha	H1	9,75
		H2	11,38
		H3	12,75
<b>Azote ammoniacal</b>	kg N-NH <sub>4</sub> /ha	H1	1,08
<b>Phosphore</b>	mg/100g	H2	5,75
<b>Potassium</b>	mg/100g	H3	12,08

## Annexe 10: Boxplot du nombre de fleurs/tige

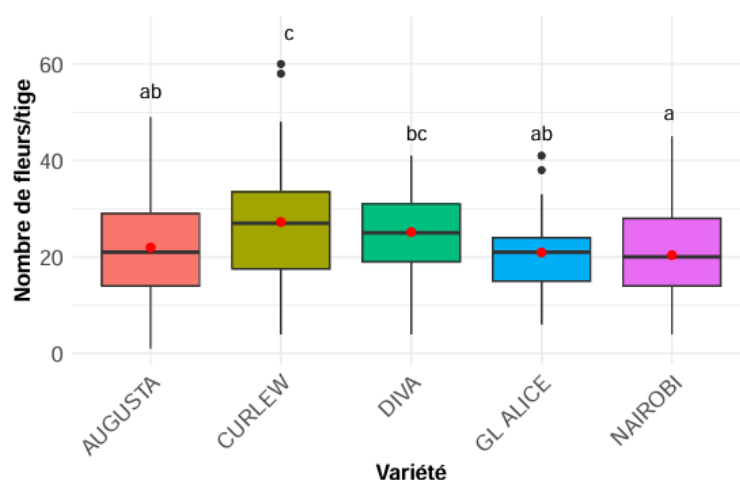


Figure annexe 6: Boxplot du nombre de fleurs/tige.

## Annexe 11: Hauteur

Des différences significatives de hauteur entre les variétés ont été observées dès le stade BBCH 50. Elles sont devenues plus marquées par la suite avec AUGUSTA atteignant 103,88 cm au stade BBCH 75 tandis qu'au même stade, NAIROBI mesurait 91,5 cm. La légère chute de hauteur entre les stades 75 et 89 peut s'expliquer par le bris de certaines tiges (principalement observé pour CURLEW) et la chute d'une partie des feuilles situées au sommet des plantes.

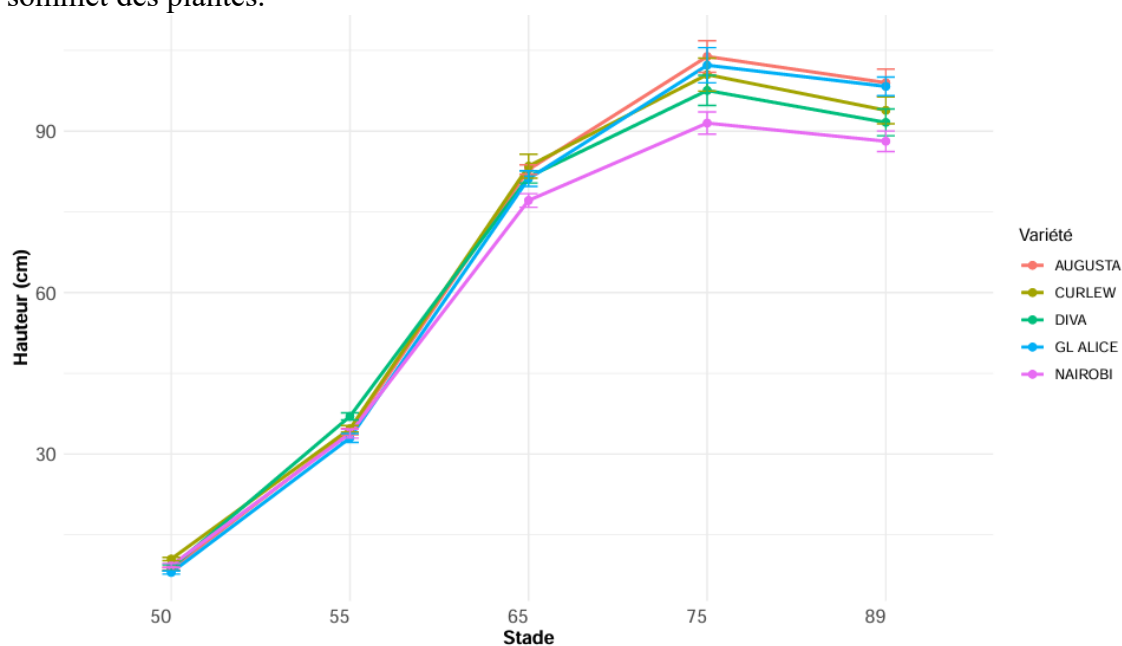


Figure annexe 7: Evolution de la hauteur par variété.

**Annexe 12: Matrice de corrélation des variables liées à l'approche par les composantes de rendement avec le détail des valeurs de corrélation r et les p-valeurs**

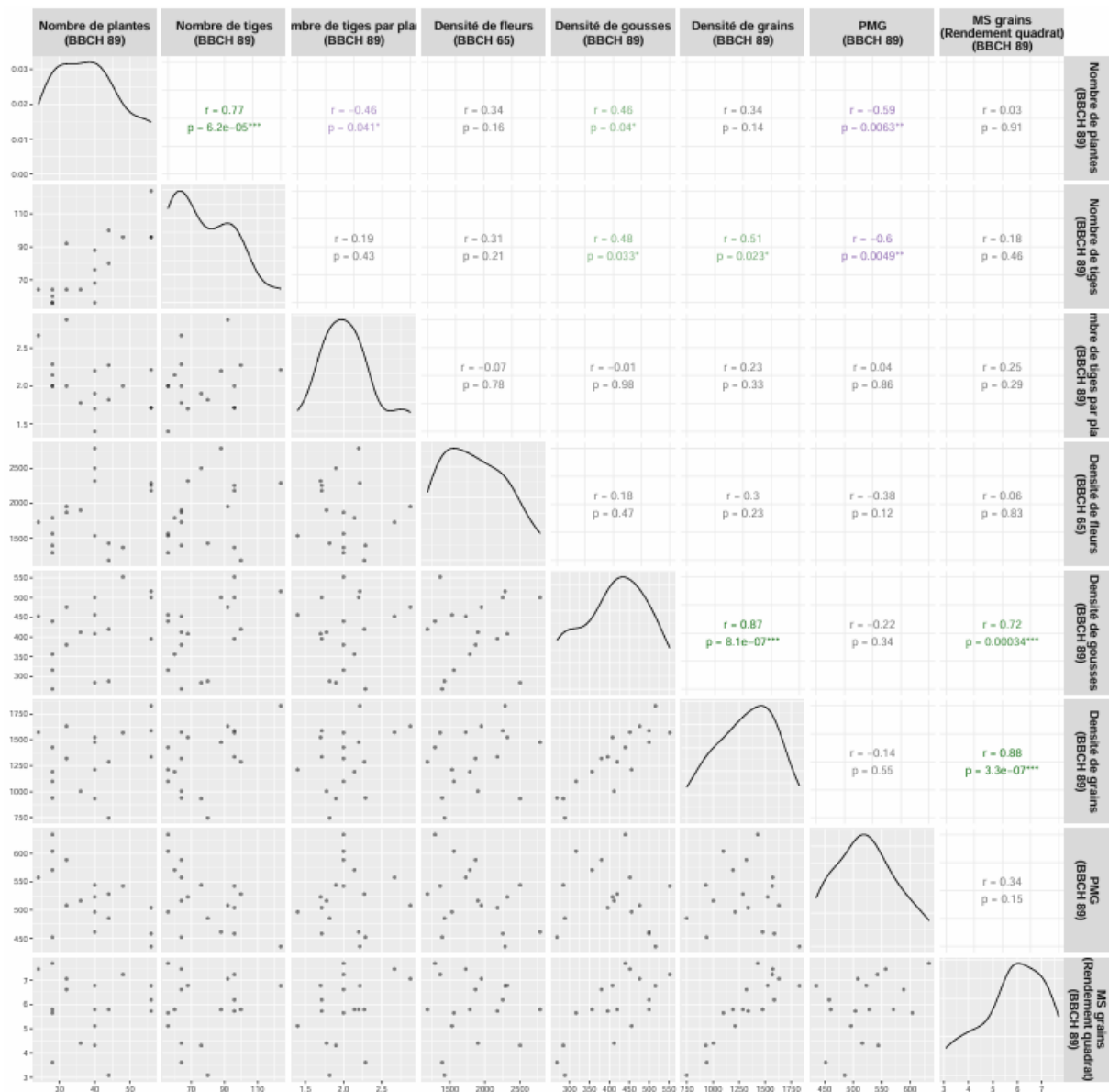


Figure annexe 8: Matrice de corrélation des variables liées à l'approche par les composantes de rendement GGPAIRS.



## Annexe 13: Matrice de corrélation des variables liées à l'approche par la matière sèche avec le détail des valeurs de corrélation r et les p-valeurs

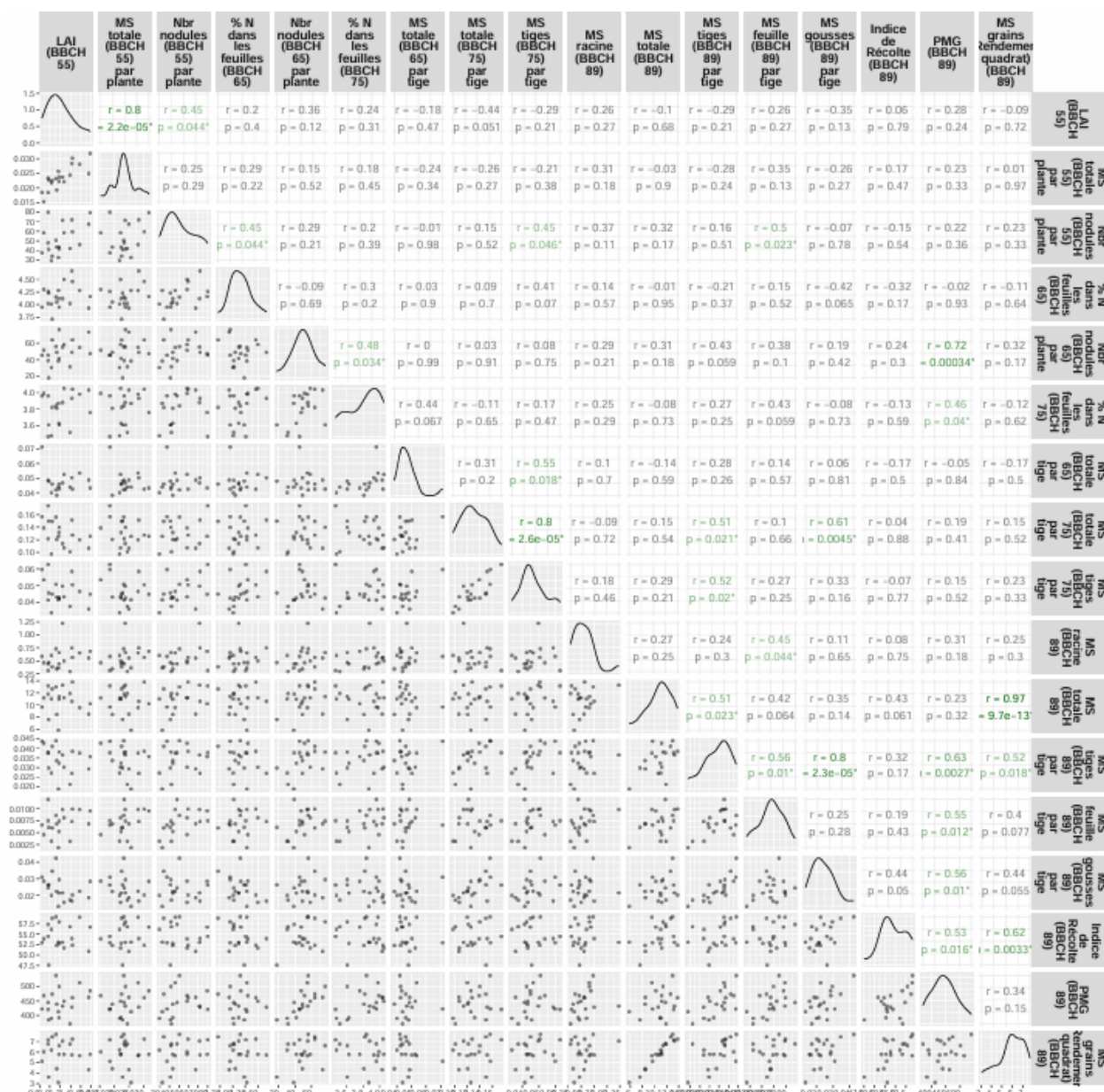


Figure annexe 9: Matrice de corrélation des variables liées à l'approche par la matière sèche GGPAIRS.