

Etude de l'effet de la densité de semis et du choix variétal sur le développement végétal et les composantes de rendement du froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.)

Auteur : Dejonckheere, Audrey

Promoteur(s) : Dumont, Benjamin

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

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

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/18039>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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

**ÉTUDE DE L'EFFET DE LA DENSITÉ DE SEMIS ET
DU CHOIX VARIÉTAL SUR LE DÉVELOPPEMENT
VÉGÉTAL ET LES COMPOSANTES DE RENDEMENT
DU FROMENT D'HIVER (*TRITICUM AESTIVUM* L.)**

AUDREY DEJONCKHEERE

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

ANNÉE ACADEMIQUE 2022-2023

PROMOTEUR : BENJAMIN DUMONT

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique¹ de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

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

**ÉTUDE DE L'EFFET DE LA DENSITÉ DE SEMIS ET
DU CHOIX VARIÉTAL SUR LE DÉVELOPPEMENT
VÉGÉTAL ET LES COMPOSANTES DE RENDEMENT
DU FROMENT D'HIVER (*TRITICUM AESTIVUM* L.)**

AUDREY DEJONCKHEERE

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

ANNÉE ACADEMIQUE 2022-2023

PROMOTEUR : BENJAMIN DUMONT

Remerciements :

Tout d'abord, je tiens à remercier mon promoteur, Benjamin Dumont, pour son encadrement, ses explications et ses conseils qui m'ont été précieux durant la réalisation de mon travail de fin d'études.

Je remercie l'entreprise Jorion Philip-Seeds pour les moyens déployés pour ces essais et pour son accueil. Plus particulièrement, je souhaite remercier Maxime Colinet de m'avoir donné l'opportunité de réaliser mon mémoire en entreprise ainsi que pour ses conseils pour la rédaction de cette étude.

Je tiens également à remercier Benjamin Van Der Verren pour la relecture de ce travail ainsi que ses suggestions avisées. Je souhaite également remercier Florine Lemahieu pour sa relecture et ses corrections orthographiques.

Enfin, je remercie ma famille de m'avoir donné les moyens de réaliser mes études à Gembloux Agro-Bio Tech.



Résumé :

Le blé tendre (*Triticum aestivum*) occupe une place primordiale dans la consommation mondiale. Le rendement est l'objectif principal en agronomie et en sélection, d'où l'intérêt d'étudier ses composantes.

L'étude a été menée à travers deux essais durant la saison culturale 2022-23 en Belgique. L'objectif était d'étudier l'effet de la densité de semis et du choix variétal sur le développement et les composantes de rendement du blé tendre. Quatre densités de semis (75, 150, 300, 400 gr/m²) sont étudiées dans l'élaboration du rendement sous l'effet de trois cultivars se démarquant par leurs caractéristiques variétales. L'étude met en évidence que l'accroissement de la densité de semis augmente significativement la densité de plantes, la densité de talles, la densité d'épis, la couverture foliaire, l'indice de surface foliaire, la hauteur, le poids spécifique et le rendement. À contrario, l'accroissement de la densité de semis a influencé significativement la diminution de la longueur de l'épi, du nombre d'étages de grains/épi, le nombre et le poids des grains/épi ainsi que l'humidité des grains. En outre, la densité de semis n'a eu aucun effet sur l'indice de récolte et des effets divergents pour le poids de mille grains et les taux de sénescence. L'étude souligne uniquement des interactions entre la densité de semis et le cultivar pour le rendement, le poids de mille grains et la couverture foliaire dans le deuxième essai. Par ailleurs, le rendement a augmenté de 20 à 31% avec l'accroissement de la densité de semis de 75 à 400 gr/m² selon l'essai. Le rendement agronomique optimale est obtenu à une densité de semis de 300 gr/m².

Enfin, l'étude a mis en évidence les relations entre les composantes de rendement et le développement végétal à travers de nombreuses corrélations. Les facteurs étudiés sont déterminants dans le rendement, mais les résultats obtenus sont les réponses de nombreux facteurs environnementaux, génotypiques, culturaux et leurs relations.

Mots-clés : blé tendre, froment d'hiver, composantes, rendement, densité de semis, choix variétal, développement végétal.

Abstract :

Soft wheat (*Triticum aestivum*) plays a key role in world consumption. Yield is the main objective in agronomy and breeding, hence the interest in studying its components.

The study was carried out in two trials during the 2022-23 growing season in Belgium. The aim was to study the effect of sowing density and varietal choice on the development and yield components of soft wheat. Four sowing densities (75, 150, 300, 400 gr/m²) were studied in the development of yield under the effect of three cultivars distinguished by their varietal characteristics. The study shows that increasing sowing density significantly increases plant density, tillers density, ear density, leaf cover, leaf area index, height, specific weight and yield. Conversely, increasing seeding density significantly influenced the decrease in ear length, number of grain stages/ear, number and weight of grains/ear, as well as grain moisture. In addition, sowing density had no effect on harvest index, and divergent effects for the weight of thousand grains and senescence rates. The study only highlighted interactions between sowing density and cultivar for yield, the weight of thousand grains and leaf cover in the second trial. On the other hand, yield increased by 20 to 31% when seeding density was increased from 75 to 400 gr/m², depending on the trial. The optimum agronomic yield is obtained at a sowing density of 300 gr/m².

Finally, the study highlighted the relationships between yield components and plant development through numerous correlations. The factors studied are determinants of yield, but the results obtained are the responses of numerous environmental, genotypic and cultural factors and their relationships.

Keywords: soft wheat, winter wheat, components, yield, sowing density, varietal choice, plant development.

Table des matières

1. Introduction	11
2. Contextualisation de l'étude	11
3. État de l'art	12
3.1 Le blé tendre	12
3.1.1 Origine et taxonomie	12
3.1.2 Biologie et physiologie	12
a. La graine	13
b. Appareil végétatif	13
c. Appareil reproducteur	13
3.1.4 Le blé tendre et ses débouchés en quelques chiffres	13
3.2 Influence des facteurs génotypiques, environnementaux et culturels sur le rendement et ses composantes	14
3.2.1 Le rendement et ses composantes	14
3.2.2 Facteurs génétiques	17
3.2.3 Facteurs environnementaux	18
a. Le sol	18
b. Le climat	18
c. Les facteurs environnementaux et les composantes de rendement	19
3.2.4 Facteurs culturels	19
a. La densité de semis	19
b. La densité de semis et les composantes de rendement	20
c. La densité de semis et le rendement	20
d. Autres effets de la densité de semis	21
4. Objectifs	22
5. Matériels et méthodes	23
5.1 Site expérimental	23
5.2 Analyses de sol	23
5.3 Conditions climatiques	24
5.4 Itinéraire technique et dégâts post semis	26
5.5 Facteurs étudiés	27
5.4.1 Facteur : Choix variétal	27
5.4.2 Facteur : Densité de semis	28
5.4.3 Dispositifs expérimentaux	28
5.6 Observations et paramètres mesurés	29
5.6.1 Stades phénologiques	30

5.6.2 Densité de plantes, de talles et d'épis.....	30
5.6.3 Hauteur du couvert.....	31
5.6.4 Port de la plante.....	32
5.6.5 Couverture foliaire.....	32
5.6.6 Indice de la surface foliaire (LAI).....	33
5.6.7 Taux de sénescence de la surface foliaire.....	34
5.6.8 Nombre d'étages de grains par épi et longueur de l'épi.....	34
5.6.9 Indice de récolte, nombre et poids des grains par épi.....	35
5.6.10 Rendement en grains et analyses post récolte.....	36
5.6.11 Le poids de mille grains.....	36
5.6.12 Observations secondaires.....	36
5.7 Manipulation des données.....	37
6. Analyse des données.....	38
7. Résultats et discussion.....	39
7.1 Résultats des tests de significativité des facteurs.....	39
7.2 Densité de plantes, de talles et d'épis.....	43
7.3 Couverture foliaire.....	49
7.4 L'indice de surface foliaire (LAI).....	49
7.5 Sénescence foliaire.....	50
7.6 Hauteur du couvert.....	50
7.7 Étages de grains par épi.....	51
7.8 Longueur de l'épi.....	51
7.9 Poids et nombre de grains par épi.....	52
7.10 Indice de récolte et biomasses.....	53
7.11 Mesures post récolte.....	54
7.12 Rendement.....	54
7.13 Relations entre les variables.....	58
8. Contribution personnelle.....	61
9. Conclusion et recommandations.....	62
10. Bibliographie.....	63
11. Annexes.....	68

Table des figures

Figure 1 : Récolte 2023 des essais à la ferme de Liessart (Colinet M., 2023).....	11
Figure 2 : Blé tendre (<i>Triticum aestivum</i> L. ; syn. <i>Triticum vulgare</i>) (Wiethold, 2023).	12
Figure 3 : Graphique de la phénologie du blé d'hiver indiquant les principaux stades de développement et illustrant l'évolution de l'apex/épi ainsi que le degré de la limitation de la force puit et source sur l'élaboration du rendement (Slafer et al., 2023).....	15
Figure 4 : Image aérienne de l'E1 et l'E2 (a) ; Carte Numérique des sols de Wallonie de l'E1 et l'E2 (b) (WalOnMap, 2023).....	23
Figure 5 : Graphique des températures et de la pluviométrie de la saison culturale des essais.	25
Figure 6 : Image aérienne de l'E1 (Colinet M., 2023) ; Dispositif expérimental E1.	28
Figure 7 : Image aérienne de l'E2 (Colinet M., 2023) ; Dispositif expérimental E2.	29
Figure 8 : Coupes longitudinales du maître brin des variétés.	30
Figure 9 : Comptages de densités au stade BBCH 14, 21, 30 et 65 respectivement de bas en haut et dans des parcelles de densité de semis 75, 150, 300 et 400 grains/m ² respectivement de gauche à droite.	31
Figure 10 : Mesure de la hauteur du couvert (a) (ITAB, 2000) et mise en œuvre dans cette étude (b) (Source : A. Dejonckheere).....	31
Figure 11 : Exemple de la détermination du port de la plante (ITAB, 2022).	32
Figure 12 : Interprétation de la couverture foliaire avec Canopeo®.	32
Figure 13 : Étapes du prélèvement et de l'étalement de la surface foliaire.....	33
Figure 14 : Image traitée en différents niveaux de gris (a) ; Histogramme de la fréquence des pixels (b).	33
Figure 15 : Echelle de notation de la sénescence des feuilles de 0 à 10 (Martre P., n.d.).	34
Figure 16 : Mesure de la longueur de l'épi.....	35
Figure 17 : Réalisation de la mesure de l'indice de récolte et du nombre de grains par épi.	35
Figure 18 : Récolte et analyses post récolte.	36
Figure 19 : Boxplots de la densité de plantes en fonction de la densité de semis selon les stades ainsi que les groupes des tests SNK.	44
Figure 20 : Boxplots de la densité de talles en fonction de la densité de semis selon les stades ainsi que les groupes des tests SNK.	46
Figure 21 : Boxplots de la densité d'épis selon la densité de semis en fonction des stades ainsi que les groupes des tests SNK.	48
Figure 22 : Boxplots de la couverture foliaire en fonction des stades selon la densité de semis.	49
Figure 23 : Graphes de régression du LAI selon la densité de talles.....	50
Figure 24 : Boxplot du nombre d'étages de grains par épi selon la densité de semis et des variétés ainsi que les groupes du test SNK.....	51
Figure 25 : Boxplots de la longueur de l'épi selon la densité de semis et/ou la variété ainsi que les groupes des tests SNK.....	52
Figure 26 : Graphes de régression du nombre d'étages de grains/épi en fonction de la longueur de l'épi selon la variété.	52
Figure 27 : Graphe de régression du poids des grains/épi en fonction du nombre de grains/épi selon l'essai.....	53
Figure 28 : Indice de récolte (de 0 à 1) et groupes du test SNK en fonction des variétés selon l'essai.....	54
Figure 29 : Boxplots du rendement selon la densité de semis et du choix variétal ainsi que les groupes des tests SNK.	55
Figure 30 : Synthèse des graphiques des composantes de rendement selon la densité de semis et l'essai.	57
Figure 31 : Corrélogrammes des variables étudiées selon les essais.	58
Figure 32 : Réalisation d'une cotation (a) et récolte de l'E1 (b) (Colinet M., 2023).	61

Table des tableaux

Tableau 1 : Taxonomie du blé tendre (Inventaire national du patrimoine naturel, 2023).	12
Tableau 2 : Matrice de corrélation entre le rendement et ses composantes issue d'une étude sur blé d'hiver (Dumont et al., 2020).....	16
Tableau 3 : Légende de la carte numérique des sols de Wallonie (ULg - GxABT et al., 2009).	23
Tableau 4 : Analyses de sol des parcelles.....	24
Tableau 5 : Itinéraire technique des essais.	26
Tableau 6 : Modalités pour les deux facteurs fixes étudiés sur les essais.	27
Tableau 7 : Caractéristiques agronomiques des trois variétés étudiées (Jorion Philip-Seeds, 2023).	27
Tableau 8 : Comportement face aux maladies des variétés étudiées.	28
Tableau 9 : Synthèse des mesures.	29
Tableau 10 : Indicateurs des mesures de densités.	30
Tableau 11 : Synthèse des variables étudiées à l'aide de tests de significativité.....	38
Tableau 12: Résultats de la significativité des facteurs stade BBCH, densité de semis et variété (ANOVA à trois facteurs).	39
Tableau 13 : Résultats de la significativité des facteurs densité de semis et variété (ANOVA à deux facteurs).	40
Tableau 14 : Moyennes et groupes des tests SNK pour les variables avant la récolte pour le facteur densité de semis.	41
Tableau 15 : Moyennes et groupes des tests SNK pour les variables avant la récolte pour le facteur variété.	42
Tableau 16 : Moyennes et groupes des tests SNK pour les variables en pré et en post récolte pour le facteur densité de semis et variété.	43
Tableau 17 : Moyennes des taux de levée et des pertes de plantes (%) ainsi que les groupes des tests SNK selon les facteurs étudiés (Equation 3).	44
Tableau 18 : Moyennes et groupes des tests SNK pour le nombre de talles par plante et la régression de talles (Equation 3).	46
Tableau 19 : Moyennes et groupes des tests SNK pour le pourcentage de talles fertiles, le nombre d'épis par plante ainsi que la perte d'épis (Equation 3).	48
Tableau 20 : Rendement et ses composantes selon les facteurs densités de semis et variété ainsi que leurs interactions.	55
Tableau 21 : Comparaison entre le rendement théorique et le rendement obtenu (Equation 3).....	56

Table des équations

Équation 1 : Formule de l'indice de surface foliaire.	34
Équation 2 : Formule du rendement standardisé (ITAB, 2022).	36
Équation 3 : Synthèse des équations de manipulation de données.	37

Table des annexes

Annexe 1 : Origine du blé tendre.	68
Annexe 2 : Stade de développement du blé d'hiver.	68
Annexe 3 : Le blé tendre et ses débouchés en quelques chiffres.	70
Annexe 4 : Les maladies du blé d'hiver.	72
Annexe 5 : Effet du précédent cultural.	72
Annexe 6 : Estimation de la couverture foliaire.	73
Annexe 7 : Dégâts post semis.	74
Annexe 8 : Qualités technologiques des trois variétés étudiées (Jorion Philip-Seeds, 2023).	74
Annexe 9 : Echelle BBCH améliorée (Livre Blanc Céréales, 2017).	75
Annexe 10 : Scannes de la surface foliaire pour le LAI.	77
Annexe 11 : Identification des maitres brins.	78
Annexe 12 : Cotations des maladies.	78
Annexe 13 : Relevé des adventices.	83
Annexe 14 : Relevés des ravageurs et insectes.	84
Annexe 15 : Tableaux des tests de normalité et d'égalité des variances des variables.	86
Annexe 16 : Tableau des résultats de la significativité des facteur étudiés issus des ANOVA pour les variables inférées des variables de base.	90
Annexe 17 : Tableaux des moyennes et écart-type des variables ainsi que les groupes des tests SNK pour les facteurs étudiés.	91
Annexe 18 : Port de plante.	94
Annexe 19 : Couverture foliaire.	94
Annexe 20 : Indice de surface foliaire.	95
Annexe 21 : Sénescence foliaire.	96
Annexe 22 : Hauteur du couvert.	98
Annexe 23 : Indice de récolte et biomasses.	99
Annexe 24 : Mesures post récolte.	99
Annexe 25 : Graphique des régressions, de courbes de densité ainsi que les corrélations pour les essais confondus et séparés entre les variables.	102

Liste des abréviations

DJ : degrés jour
E1 : Essai n°1
E2 : Essai n°2
gr : grains
IR : indice de récolte
LAI : leaf area index
PAR : la radiation photosynthétique active
PMG : le poids de mille grains
SNK : Student-Newman-Keuls

1. Introduction

À l'échelle mondiale, le blé d'hiver est la deuxième culture la plus produite après le maïs (Statista Research Department, 2022). Cette culture est essentielle pour les chaînes alimentaires humaines et animales. Ces cinquante dernières années, la production mondiale de blé n'a cessé de croître principalement grâce à l'augmentation des rendements, mais également grâce à l'augmentation mondiale de la superficie cultivée (Terrones Gavira et al., 2012).

L'augmentation du commerce de blé, encouragé par une demande croissante, stimule l'économie et incite à développer des variétés à haut rendement. La sélection variétale améliore les variétés d'intérêts en travaillant sur diverses caractéristiques influençant le rendement et ses composantes.

Afin d'améliorer le rendement en grains, de multiples études ont évalué et évaluent les effets de différents paramètres liés à la génétique, à l'environnement et à la conduite culturale tels que la densité de semis, les traitements fongicides, la date de semis, le choix variétal, les résistances aux stress environnementaux, etc.

L'objectif de ce travail de fin d'études est d'évaluer l'effet de la densité de semis et du choix variétal sur le rendement et ses composantes. L'étude vise également à exploiter les effets de ces facteurs sur le développement végétal du froment d'hiver.

2. Contextualisation de l'étude

L'étude a été mise en place par l'entreprise Jorion Philip-Seeds (JPS) située à Hacquegnies dans le Hainaut en Belgique. L'entreprise est issue d'une fusion, en 2013, de deux grands acteurs du marché de la semence : Jorion SA et Philip-Seeds NV. Actuellement, l'entreprise produit et commercialise des semences de céréales, oléagineux et de cultures fourragères. Cette société possède également une ferme expérimentale appelée "Ferme de Liessart" située à Béclers (Figure 1). Chaque année, plusieurs essais variétaux sont implantés sur ce site afin d'étudier et d'exposer les produits (Jorion Philip-Seeds, 2023).

L'intérêt de ce travail pour JPS réside dans l'optimisation de la densité de semis selon des variétés caractérisées par des potentiels de tallage différents et d'évaluer leurs performances à travers le rendement et d'autres caractéristiques telles que leur résistance face aux maladies, aux aléas climatiques, etc.



Figure 1 : Récolte 2023 des essais à la ferme de Liessart (Colinet M., 2023).

3. État de l’art

3.1 Le blé tendre

3.1.1 Origine et taxonomie

Le blé tendre (*Triticum aestivum*) ou froment d’hiver (appellation commune en Belgique) est une espèce hexaploïde apparue au Néolithique résultant d’hybridations spontanées entre des blés tétraploïdes cultivés et des espèces sauvages diploïdes (Arvalis, 2017; Bourak, 2018; Gouvernement du Canada, 2012) (Tableau 1 et Annexe 1).

Tableau 1 : Taxonomie du blé tendre (Inventaire national du patrimoine naturel, 2023).

Règne	<i>Plantae</i>
Sous-Règne	<i>Viridaeplantae</i>
Classe	<i>Equisetopsida</i>
Sous-Classe	<i>Magnoliidae</i>
Super-Ordre	<i>Lilianaes</i>
Ordre	<i>Poales</i>
Famille	<i>Poaceae</i>
Genre	<i>Triticum</i> L.
Espèce	<i>Triticum aestivum</i> L., 1753
Sous-Espèce	<i>Tritium aestivum</i> L., 1753 subsp. <i>aestivum</i>

3.1.2 Biologie et physiologie

Le froment d’hiver est une graminée annuelle hivernale principalement cultivée dans les climats tempérés. Cette espèce herbacée monocotylédone appartient à la famille des Poacées (Bourak, 2018; Willenborg et al., 2008) (Figure 2 et Annexe 2).



Figure 2 : Blé tendre (*Triticum aestivum* L. ; syn. *Triticum vulgare*) (Wiethold, 2023).

a. La graine

Le fruit et graine est un caryopse nu correspondant à un fruit sec indéhiscant. Cette graine est constituée du germe (1,4% du poids du grain), de l'albumen ou amande (83-85% du poids du grain) et d'enveloppes appelées péricarpe, tégument et assise protéique (14-15% du poids du grain) (Bourak, 2018; Université Mhohamed khider-Biskra, 2023; Soltner, 2005). Elle englobe l'embryon, qui deviendra la future plantule ainsi que l'albumen qui représente un tissu nourricier constitué principalement de réserves amylacées (Casnin et al., 2016).

b. Appareil végétatif

L'appareil végétatif de la plante comprend le système aérien et racinaire (Bourak, 2018). Ce dernier est dit fasciculé tandis que le système aérien est composé des tiges creuses et de feuilles engainantes (Soltner, 2005). À partir de la graine, les bourgeons axillaires se transforment en tiges feuillées depuis le plateau de tallage relatif à un empilement d'entre-nœuds proche de la surface du sol. Par définition chez les graminées, le tallage est la croissance des pousses latérales à partir de méristèmes axillaires à la base de la plante (Kondic et al., 2017). De plus, les tiges comprennent cinq à sept nœuds et trois ou quatre feuilles véritables (Gouvernement du Canada, 2012). Les nœuds servent de point d'attache pour les feuilles étant alternes et comprenant dans leur partie supérieure et inférieure respectivement le limbe et la gaine (Bourak, 2018). Le système racinaire est constitué de racines séminales secondées par des racines adventives afin d'assurer la nutrition de la plante. Cette céréale a pour caractéristique de nécessiter une exposition au froid pour fleurir et se reproduire appelée vernalisation (Arvalis, 2017; Soltner, 2005; Willenborg et al., 2008).

c. Appareil reproducteur

La dernière feuille, étant la plus haute de la tige, présente l'inflorescence en épi composée de 15 à 25 épillets (Gouvernement du Canada, 2012; Soltner, 2005). L'épillet est un axe reproducteur condensé constitué de deux à cinq fleurs enveloppées par deux bractées stériles appelées glumes. Chaque fleur possède trois étamines terminées par une grande anthère. Quant au pistil, il est formé d'un seul ovaire ayant un ovule unique et deux styles chacun terminé par un stigmate plumeux et ramifié (Gouvernement du Canada, 2012). En outre, le froment d'hiver est une plante autogame (Soltner, 2005). De plus, le phénomène de vernalisation permet à la plante de passer du stade végétatif au stade reproducteur (Casnin et al., 2016).

3.1.4 Le blé tendre et ses débouchés en quelques chiffres

Avec 770,8 millions de tonnes produites en 2022, le froment d'hiver est la céréale la plus cultivée après le maïs dans le monde (Statista Research Department, 2022). Les plus gros producteurs de blé sont par ordre décroissant : la Chine, l'Inde, la Russie et les États-Unis. Si l'on considère le niveau de production par hectare, la Belgique se classe parmi les meilleurs producteurs avec un rendement moyen de 8,5 t/ha (Yara France, 2018; Groupe de la Banque Mondiale, 2023).

Le blé tendre est principalement cultivé pour sa graine qui occupe une place centrale dans l'alimentation humaine et animale. La part destinée à l'alimentation humaine représente à elle seule 69% de la production mondiale. En effet, la consommation annuelle moyenne de blé est d'environ 66 kg par personne. Enfin, le reste de la production mondiale est utilisée pour d'autres applications telles qu'en alimentations animale (19 %) ou encore pour la production de biocarburants (Terrones Gavira et al., 2012) (Annexe 3).

3.2 Influence des facteurs génétiques, environnementaux et culturels sur le rendement et ses composantes

3.2.1 Le rendement et ses composantes

L'optimisation du rendement est influencée par divers facteurs. En effet, le phénotype du blé d'hiver résulte d'une triple interaction entre le génotype, l'environnement et les pratiques culturales (Carver, 2009; Slafer et al., 2022). Chacun de ces facteurs et leurs interactions vont influencer positivement ou négativement le rendement et ses composantes.

En général, l'approche utilisée afin de déterminer le rendement est sa décomposition en composantes (Slafer et al., 2022). Parmi les principales composantes de rendement trouvées dans la bibliographie, peuvent être citées (Figure 3) :

- Le nombre de plantes/m² correspondant à la densité de plantes. Celle-ci est liée à la densité de semis, à la faculté germinative des semences, au taux de levée et à la perte de plante.
- Le nombre d'épis par plante correspond à la capacité de tallage. Le nombre d'épis/pied est lié à la période de tallage et à la montaison des talles.
- Le nombre de grains/épi correspond à la fertilité de l'épi. La fertilité de l'épi dépend de plusieurs éléments dont le nombre d'épillets par épi, le nombre de fleurs par épillet et le pourcentage de fertilité.
- Le poids individuel du grain. Dans la littérature, le poids de mille grains (PMG) est souvent utilisé.

(Arvalis, 2022; Institut technique des céréales et des fourrages, 2003; Slafer et al., 2022; Slafer et al., 2014; Soltner, 2005; Valério et al., 2013).

Le rendement est le produit des quatre composantes décrites ci-dessus (Arvalis, 2022; Leterme et al., 1994; Slafer et al., 2014). Celles-ci se mettent en place durant les différentes phases du cycle de développement (Figure 3) et sont influencées par de nombreux facteurs pédoclimatiques et agronomiques.

La première phase correspond à la mise en place de l'appareil foliaire et du système racinaire. Le nombre de plantes/m² s'établit depuis le semis jusqu'au tallage. Le nombre d'épis/plante est formé durant la phase reproductive à partir de l'induction florale jusqu'à la floraison. Quant au nombre de grains/épi, il est mis en place depuis le tallage jusqu'à la floraison. Le nombre de grains/m² est le produit des trois composantes explicitées ci-dessus (Arvalis, 2022; Leterme et al., 1994; Slafer et al., 2014).

La dernière phase correspond à la période de remplissage des grains établissant le poids du grain (BASF, 2019a; Boiffin et al., 1981). Cette phase est fonction de la capacité photosynthétique à la floraison et à la maturité (Arvalis, 2017; Reynolds et al., 1999). En effet, le poids du grain est influencé par le fonctionnement photosynthétique, mais également par d'autres facteurs tels que le parasitisme, le stress hydrique et la nutrition azotée (Boiffin et al., 1981; Ma et al., 2018).

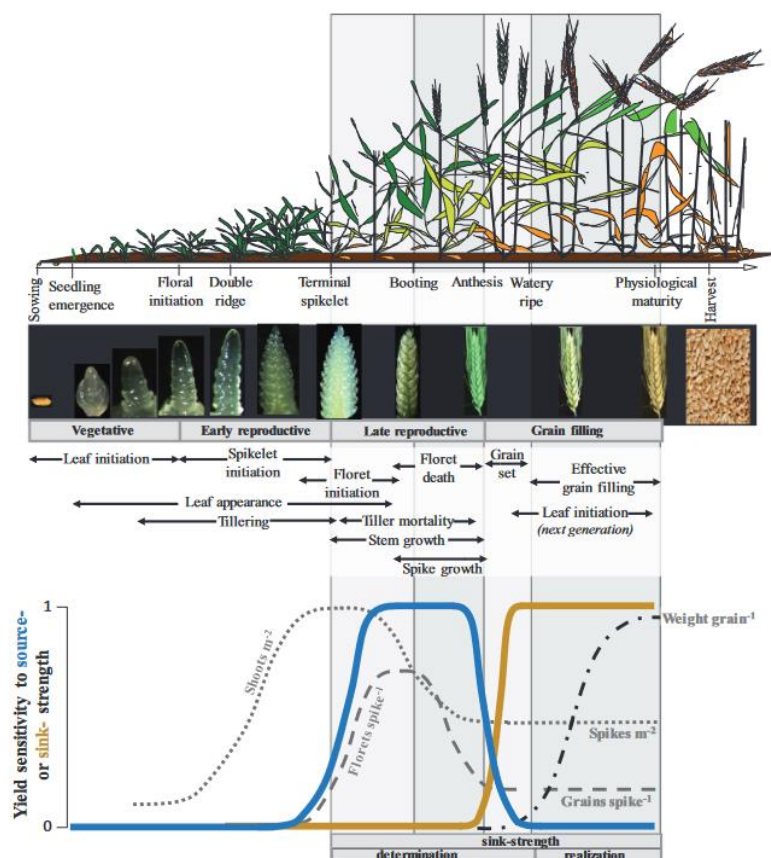


Figure 3 : Graphique de la phénologie du blé d'hiver indiquant les principaux stades de développement et illustrant l'évolution de l'apex/épi ainsi que le degré de la limitation de la force puit et source sur l'élaboration du rendement (Slafer et al., 2023).

Le rendement peut être estimé par le produit de deux grandes composantes ; le nombre de grains/m² et le poids du grain. Cependant, le rendement est principalement affecté et étroitement relié au nombre de grains (Sadras et al., 2012; Slafer et al., 2014). En effet, le nombre de grains/m² est un trait ayant une large plasticité, contrairement au poids du grain étant un trait conservatif ou très héritable (Sadras et al., 2012; Slafer et al., 2022). L'augmentation du rendement résulte de l'augmentation du nombre de grains/m². Cette augmentation découle de l'accroissement du nombre d'épis/m² et du nombre de grains/épi, notamment grâce à l'amélioration de la survie des fleurons distaux (Slafer et al., 2022; Slafer et al., 2014). De plus, le nombre de grains/m² est entre autres favorisé lors d'un fort tallage avec une fertilité d'épis élevée en l'absence de stress abiotique (Arvalis, 2022).

En outre, le nombre d'épis/m² est une principale composante influençant le rendement. Cette composante est directement liée à la capacité du génotype à taller et à former un nombre spécifique de talles productives par plante (Kondic et al., 2017). De plus, la densité d'épis est la composante sur laquelle il est le plus facile d'agir. En effet, au fil des années de sélection, l'évolution du PMG et du nombre de grains/épi est restée relativement stable contrairement au nombre d'épis/m². 87% des meilleurs rendements atteints étaient constitués de populations d'épis élevées (550 à 750 épis/m²). Le rendement optimum est obtenu à 450-550 épis/m² pour les variétés à gros épis et 600-700 épis/m² pour les variétés à petits épis (Soltner, 2005).

Cependant, diviser le rendement en composantes peut engendrer des contraintes puisque celles-ci sont dépendantes entre elles. Des contrôles par rétroaction sont notamment présents entre le nombre d'épis/m² et le nombre de grains/épi (Slafer et al., 2022). Des compensations entre les composantes sont le résultat de corrélations, positives ou négatives, élevées ou faibles, entre elles (Tableau 2).

	Rdt	Dens.Epis	P1G	Dens.grains	Fert.Epis
Rdt	1	0,67	0,39	0,75	0,18
Dens.Epis		1	0,13	0,6	-0,34
P1G			1	-0,31	-0,49
Dens.grains				1	0,53
Fert.Epis					1

Tableau 2 : Matrice de corrélation entre le rendement et ses composantes issue d'une étude sur blé d'hiver (Dumont et al., 2020). (*Légende : Rdt : rendement, Dens.Epis : densité d'épis, P1G : poids individuel du grain, Dens.grains : densité de grains, Fert.Epis : fertilité de l'épi*)

En effet, l'augmentation du nombre d'épis/m² entraîne une compensation partielle d'une diminution du nombre de grains/épis, pouvant être suffisante afin de montrer un changement de rendement. L'augmentation du nombre de grains/m² provoque également une compensation partielle, voire relativement faible d'une réduction du poids du grain. De ce fait, le poids du grain ayant une stabilité élevée, l'accroissement du nombre de grains/m² engendre l'augmentation du rendement (Slafer et al., 2014).

Le nombre de grains/m² est la seule composante affectée par le nombre d'épis/m², le nombre de grains/épi et en réponse au génotype et à l'environnement pouvant être responsable de régulations grossières sur le rendement. Les régulations sur le rendement du nombre d'épis/m² sont principalement induites par les facteurs environnementaux. Au contraire, les régulations sur le rendement du nombre de grains/épi sont généralement induites par les différences génotypiques (Slafer et al., 2014).

En somme, toutes les composantes de rendement ont une certaine plasticité élevée ou faible face aux sources de variations, mais suffisante pour être capable de s'adapter à des changements mineurs du rendement. Les changements entre le rendement, le nombre de grains/m² et leurs composantes sont fonction de la source de variation et de son ampleur induisant la réactivité du rendement. Une certaine hiérarchie des plasticités entre les composantes est donc présente. En effet, celle-ci correspond par ordre décroissant de plasticité ou par ordre croissant d'héritabilité (exprimé en pourcentage) ; le nombre de talles (31%), le nombre d'inflorescences (58%) \approx le nombre de grains par inflorescence (59%) et le poids du grain (79%). Par conséquent, le nombre de grains/m² est la composante avec la plasticité la plus élevée. Ce nombre se traduit comme le mécanisme de régulation le plus grossier sur le rendement, capable de s'adapter et de répondre à des changements considérables tels que l'azote et l'eau. À contrario, la stabilité du poids du grain provoque une faible régulation face aux changements environnementaux ou génotypiques. Cette relation entre ces deux grandes composantes est le résultat du paradoxe de la sélection selon lequel la plasticité du nombre de grains est la condition de la stabilité de la taille des grains (Sadras et al., 2012; Slafer et al., 2014).

3.2.2 Facteurs génétiques

L'étude des variétés de froment d'hiver à travers la sélection est primordiale afin d'accroître les rendements pour répondre à l'augmentation de la population (Cao et al., 2020). Auparavant, l'objectif était principalement d'obtenir une quantité et une qualité élevée de grains. Cependant, au fil des années et des faits divers, la prise de conscience de la population favorise la sélection vers des variétés respectueuses de l'environnement, notamment à travers des besoins faibles en traitements phytosanitaires (Bourak, 2018).

L'amélioration génétique a augmenté les rendements, notamment par de meilleures performances des composantes telles que la fertilité de l'épi et la capacité de remplissage des grains (Bodson et al., 1997). La sélection a pour objectif de perfectionner certains caractères fondamentaux tels que la résistance à la verse, la rusticité, la tolérance à la sécheresse, la résistance aux maladies et ravageurs, la qualité boulangère, le rendement, etc. (Doré et al., 2006; Gouvernement du Canada, 2012).

En outre, plus de 300 variétés en blé d'hiver sont inscrites au catalogue officiel, mais l'important réside dans le choix de la variété la plus adaptée à l'environnement de culture (Arvalis, 2017; BASF, 2019b). Le choix variétal a une influence significative sur les composantes de rendement. En effet, les caractéristiques des variétés influencent différemment la morphologie de la plante, le rendement et ses composantes (Pathania et al., 2018; Rahman et al., 2010; Shahwani et al., 2014). Les variétés ont un rôle essentiel sur le rendement, car elles répondent différemment aux caractères génotypes, aux besoins en intrants, au processus de croissance et à l'environnement durant la saison culturale (Pathania et al., 2018; Rahman et al., 2010).

Selon le contexte agro-pédo-climatique, la sélection recherche des variétés ayant des caractéristiques favorables à un meilleur contrôle des stress biotiques et abiotiques (Bourak, 2018). Parmi les critères variétaux, la potentiel de tallage est l'un des traits les plus étudiés pour améliorer le rendement (Malika et al., 2018; Peltonen-Sainio et al., 1995). Une meilleure compréhension des réponses génotypiques du tallage aux conditions environnementales facilite l'optimisation de la densité de semis (Valério et al., 2013). En effet, le choix de la densité de semis doit tenir compte du potentiel de tallage de la variété puisqu'il détermine le nombre potentiel d'inflorescences (Sadras et al., 2012; Valério et al., 2013). La plasticité du tallage génère des variations de rendement, positives ou négatives, influencées par les conditions environnementales telles que la disponibilité des ressources naturelles comme l'eau, la lumière et les nutriments (Kondic et al., 2017; Sadras et al., 2012).

De plus, la capacité de compenser la faible présence ou l'excès d'une composante de rendement par des changements d'autres composantes est essentielle et permet d'obtenir de meilleures performances. Des variétés avec un potentiel de tallage réduit ont souligné une augmentation de rendement avec un accroissement de la densité de semis, bien que le poids de l'épi ait diminué. En outre, la densité de semis optimale pour le rendement n'est pas forcément liée à une production de talles plus élevée, mais surtout à l'effet du génotype sur ce changement. En effet, les meilleurs rendements pour les génotypes à potentiel de tallage élevée, sont observés à de plus faibles densités de semis. Au contraire, pour les génotypes à faible potentiel de tallage, les meilleurs rendements sont obtenus à des densités de semis plus élevées (Valério et al., 2013).

Le génotype à plus faible tallage est plus dépendant de la densité de semis pour les performances de rendement. Les génotypes à potentiel de tallage plus élevé ont une meilleure performance à des densités réduites probablement dues à une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau et des nutriments dont l'azote. Ces génotypes ont une forte capacité d'absorption du rayonnement et de ce fait un rendement en grains élevé. En effet, pour les variétés à faible tallage, la densité de semis affecte plus fortement le rendement et ses composantes tels que le poids de l'épi et le nombre de grains/épi. Le génotype à faible tallage compense

le faible nombre d'épi/plante par un poids de l'épi élevé. Cependant, lorsque la densité de semis augmente, le poids de l'épi diminue d'où l'intérêt d'explorer le potentiel maximal de rendement en modulant la densité de semis pour ces génotypes (Valério et al., 2013).

En outre, pour les génotypes à potentiel de tallage élevé, des densités de semis élevées entraînent plus de compétition entre les plantes contrairement aux génotypes à tallage réduit. En effet, lorsque les densités sont élevées, cela génère une plus forte compétition des plantes pour l'eau qui ensuite affecte le stade de remplissage des grains et incite une réduction de rendement. La compétition des plantes provoque une diminution de l'absorption des nutriments par plante et des risques de verse et de maladies (Annexe 4) plus élevés (Valério et al., 2013).

De plus, la fertilité de l'épi est une composante variable selon les variétés (Deswarte et al., 2022). La fertilité de l'épi est également significativement influencée par la densité de semis. Elle augmente ou diminue respectivement à une densité faible ou excessive (Cornec, 2009; Deswarte et al., 2022; Matsuyama et al., 2020). L'adaptation de la densité de semis est une alternative en fonction de la fertilité d'épi de la variété afin d'obtenir l'optimum du nombre de grains/m² (Deswarte et al., 2022).

3.2.3 Facteurs environnementaux

a. Le sol

Afin qu'un sol soit idéal à la croissance du blé d'hiver, il doit présenter une texture fine (limoneuse-argileuse), une structure stable, une bonne profondeur et une richesse suffisante en argile et humus (Soltner, 2005). Le sol doit être sain et drainant, mais peu sujet au stress hydrique (Alaoui, 2005). Les sols très argileux, caillouteux, mal drainés ou trop sableux ne sont pas propices au développement de la culture (Soltner, 2005).

b. Le climat

La physiologie du blé d'hiver est conditionnée durant son cycle de développement par la température. Afin que les graines germent, la température doit être supérieure à la température de base de 0°C. En outre, les variétés de blé d'hiver ont besoin de températures vernalisantes inférieures à 8°C durant environ huit semaines (Doré et al., 2006). De plus, cette céréale est résistante au gel et peut supporter des températures allant jusqu'à -20°C. Cependant, selon la résistance variétale et le stade de développement, le gel peut entraîner des dégâts si les variations de température sont importantes sur de très courtes périodes (Dumont et al., 2021). Afin de passer d'un stade à l'autre, la plante nécessite également l'accumulation de certains degrés jour (DJ, DJ de base = 0) depuis le semis. Elle a un besoin de 180 à 200 DJ pour lever ou encore 2000 DJ pour atteindre le stade d'épiaison et 2200 DJ afin d'arriver à maturité. Cependant, cela dépend également du milieu de culture et de la variété (Arvalis, 2017; Spotifarm, 2020).

En outre, cette culture nécessite environ 580 mm d'eau par an (Soltner, 2005). La plante a un besoin de 500g d'eau par gramme de matière sèche produite (Dumont et al., 2021).

Quant à la lumière, le blé d'hiver répond à une certaine intensité lumineuse influençant son activité photosynthétique et à un photopériodisme afin d'induire sa transition florale et production grainière (Arvalis, 2017; Soltner, 2005). En général, pour les céréales, la photopériode est située entre 12 et 14 heures selon l'espèce et la variété (Dumont et al., 2021).

c. Les facteurs environnementaux et les composantes de rendement

Les facteurs environnementaux peuvent exercer une influence, positive ou négative, sur les composantes de rendement (Slafer et al., 2022). En effet, certains facteurs (excès d'eau, gel, etc.) influencent négativement le couvert végétal ainsi que le rendement. Même si des phénomènes de compensation tels que le développement de nouvelles talles ou encore un nombre de grains/épi plus important peuvent être mis en place par le froment, cela ne suffit pas toujours lorsque le couvert est fortement impacté (Goodwin et al., 2018).

L'influence des conditions environnementales sur la culture débute dès le semis. Par exemple, la perte de plantes est impactée par le climat et le sol. La résistance des plantes au froid s'accroît au fur et à mesure de leur développement. Cependant, avant le stade de tallage, les plantules sont plus fragiles aux chutes de température et aux excès d'eau, provoquant une perte de plantes. Ces risques climatiques sont d'autant plus élevés et impactants lorsque le semis est tardif. En outre, cette perte est également encouragée par une mauvaise préparation du sol, un semis réalisé dans des conditions humides et froides ou lorsque les sols sont argileux, pierreux ou battants (Arvalis, 2013; Livre Blanc Céréales, 2023b).

Au stade tallage, des automnes et hivers doux vont promouvoir la capacité de tallage (nombre de tiges par plante). Cependant, celle-ci peut être pénalisée lors de certains stress environnementaux tels que le gel, l'excès d'eau, un déficit azoté, la sécheresse ou encore un tassement de sol (Arvalis, 2017).

De plus, des températures sous optimales à certaines périodes de développement peuvent induire une diminution du rendement. L'efficacité de la fructification est réduite lorsque les températures sont sous-optimales juste avant l'anthèse. Des températures froides et élevées durant le développement floral entraînent une augmentation de la stérilité. Cette stérilité est engendrée notamment par l'avortement des fleurons et/ou une diminution du développement des tubes polliniques, ainsi que l'augmentation de la mortalité du pollen. En outre, une limitation de la disponibilité en azote favorise également l'augmentation de l'avortement des grains (Slafer et al., 2023).

La lumière, pour laquelle les talles sont en compétition, est une source influençant le rendement. En effet, la production de biomasse est en relation directe avec la radiation photosynthétique active (PAR). L'augmentation de l'interception lumineuse favorise la photosynthèse (corrélé à 85% au rendement en grains) jouant un rôle majeur dans le remplissage des grains (Reynolds et al., 1999; Zheng et al., 2022)

3.2.4 Facteurs culturaux

De nombreux facteurs liés à la conduite culturale influencent le phénotype du blé d'hiver tels que la fertilisation azotée, la densité de semis, la date de semis, les traitements phytosanitaires, le choix de la rotation, la préparation du sol, etc. Dans le cadre de ce travail de fin d'études, la densité de semis est le facteur cultural étudié et sur lequel l'attention est principalement portée.

a. La densité de semis

La densité de semis est un facteur influençant le nombre de plantes émergentes (Baloch et al., 2010; Schaafsma et al., 2005). En Belgique, l'objectif est d'atteindre pour un semis précoce et tardif respectivement 150-200 plantes/m² et 200-250 plantes/m² en sortie d'hiver. La densité de semis du blé d'hiver varie entre 200 et 450 grains/m² selon la date de semis (Livre Blanc Céréales, 2023b). De plus, les

densités préconisées sont de 250-300 grains/m² pour un semis moyennement dense afin de favoriser les variétés à potentiel de tallage élevé et de 400-500 grains/m² pour les semis denses afin de limiter le tallage et favoriser le maître-brin constitué de l'épi le plus prolifique (Soltner, 2005).

b. La densité de semis et les composantes de rendement

La densité de semis influence significativement les composantes de rendement (Baloch et al., 2010; Matsuyama et al., 2020; Schaafsma et al., 2005; Soomro et al., 2009). La densité de semis augmente significativement : le nombre de plantes émergentes, le nombre de talles/m², le nombre d'épis/m² et le rendement (Baloch et al., 2010; Holman et al., 2021; Ma et al., 2018; Schaafsma et al., 2005). Cependant, cette augmentation incite une diminution du nombre de grains/épi (Holman et al., 2021; Ma et al., 2018; Spaner et al., 2000).

À contrario, de faibles densités de semis entraînent l'accroissement : du nombre d'épillets/épi, du pourcentage d'épillets fertiles, du nombre de grains/épi, de la production et de la survie des talles. Cependant, à de faibles densités de semis, une diminution du nombre maximal de talles/m² et du nombre d'épis/m² est observée (Matsuyama et al., 2020; Valério et al., 2013). Quant au PMG, la densité de semis n'affecte pas le poids du grain ou faiblement (Holman et al., 2021; Slafer et al., 2014; Spaner et al., 2000).

Ces augmentations et diminutions entre les composantes mettent en évidence le phénomène de compensation. Cependant, la capacité de compensation des composantes est limitée. En effet, à des densités de semis trop faibles, des réductions de rendements sont observées. Bien que la variation de la densité de semis puisse ne pas influencer le rendement, l'ajustement des composantes est restreint. Le nombre de talles, le nombre de grains et le poids du grain sont comptés par plante. Une variation importante de la densité de semis, dont la capacité de compensation est insuffisante, engendre une variation du rendement et ses composantes (Holman et al., 2021).

c. La densité de semis et le rendement

La densité de semis influence significativement le rendement (Allard, 2017; Baloch et al., 2010; Holman et al., 2021; Kassaye et al., 2022; Soomro et al., 2009). En effet, le rendement augmente avec l'accroissement de la densité de semis et suit une exponentielle jusqu'à atteindre un plateau équivalent à la densité de semis agronomique optimale (Holman et al., 2021). Spaner et al. (2000) énoncent lors d'une étude le lien significatif entre le rendement et le nombre d'épis/m² en fonction des variations de la densité de semis. Cette étude illustre que l'augmentation de la densité de semis de 255 à 450 grains/m² a augmenté le rendement de 10 à 25%. Cette augmentation significative de rendement est notamment observée par des hausses du pourcentage de la couverture végétale au printemps et des accroissements du nombre d'épis/m². Cependant, lors d'une des années d'études, l'augmentation de la densité de semis a entraîné une diminution significative du nombre de grains/épi, bien que le PMG restât relativement stable (Spaner et al., 2000). Allard (2017) souligne également une augmentation de 7% et 11% du rendement avec une augmentation de la densité de semis de 250 à 550 grains/m². Afin d'optimiser le rendement, une densité de 400 à 500 épis/m² est requise (Livre Blanc Céréales, 2023b; Spaner et al., 2000).

Cependant, d'autres expériences ont prouvé également que la densité de semis n'influence pas le rendement en grains ou seulement selon certaines années. En effet, la densité de semis affecte les composantes de rendement, mais pas forcément le rendement. Les compensations réalisées entre ces composantes peuvent entraîner une différence non significative entre le rendement et la densité de semis (Holman et al., 2021; Matsuyama et al., 2020; Valério et al., 2013; Wood et al., 2003). Ma et al. (2018) et Morgan et al. (2011) énoncent que la densité de semis influence le rendement uniquement lorsque la date de semis est tardive. En

outre, des densités de semis supérieures à la densité optimale engendrent une réduction du rendement provoqué par une concurrence élevée entre les plantes (Holman et al., 2021). L'expression du potentiel de rendement passe avant tout à travers l'optimisation des ressources disponibles telles que les éléments nutritifs, la lumière et l'eau (Livre Blanc Céréales, 2023b).

d. Autres effets de la densité de semis

D'autres caractéristiques morphologiques et physiologiques du blé d'hiver sont modifiées par des variations de densité de semis. En effet, l'accroissement de la densité de semis génère l'augmentation significative de la hauteur des plantes, du nombre de tiges inefficaces, de la biomasse racinaire et provoque une diminution significative de la surface foliaire par plante (Ma et al., 2018). En outre, Schaafsma et al. (2005) déclarent que l'augmentation de densité de semis diminue la durée de la période de floraison de 1 à 2 jours.

De plus, Matsuyama et al. (2020) précisent que les phénomènes de verse peuvent être favorisés par une densité de semis inappropriée. En effet, l'augmentation de la densité de semis entraîne la diminution de la force et de la résistance des tiges à la verse. La densité de semis a une influence sur les composants de la paroi cellulaire modifiant ainsi la morphologie des tiges. En outre, bien qu'elle augmente le rendement, une forte fertilisation azotée combinée à une densité de semis élevée augmente le risque de verse (Allard, 2017 ; Matsuyama et al., 2020). La gestion de la fertilisation azotée occupe une place primordiale dans l'élaboration du rendement optimal. Le schéma d'application le plus courant en Belgique est l'application de 180 kgN/ha en trois fractions de 60 kgN/ha (stade tallage, redressement et dernière feuille). Les applications de fertilisant azoté effectuées aux stades BBCH 23/25 et 30 ont le plus grand impact sur le nombre de grains/m² (corrélation de 62%). En outre, la densité d'épis est également fortement corrélée à 53% avec les deux premières fractions azotées. Des carences azotées vont impacter négativement le rendement, notamment à travers la réduction de la fertilité des épis et l'augmentation de la stérilité des fleurs (Dumont et al., 2020).

La densité de semis provoque des variations du nombre de talles fertiles et du rendement en grains dépendant du cultivar et de la région (Kondic et al., 2017; Matsuyama et al., 2020; Valério et al., 2013). En effet, une triple interaction entre l'environnement, le génotype et la densité de semis influence le nombre de talles fertiles et le rendement (Valério et al., 2013). D'après Kondic et al. (2017), le nombre de talles fertiles était maximum avec une densité de 384 grains/m² et minimum avec une densité de semis de 588 grains/m². Par conséquent, au plus la densité s'accroît, au plus le nombre de talles fertiles diminue.

Concernant la qualité du grain, l'influence de la densité de semis est faible et irrégulière sur le poids spécifique des grains et le PMG. L'indice de Hagberg augmente linéairement avec une densité de semis croissant traduisant une maturation plus rapide de la culture. Le taux protéique semble diminuer avec l'accroissement de la densité de semis (Gooding et al., 2002).

De plus, la perte de plante est un paramètre influençant la régulation de la densité de semis. En effet, dès la levée, même lorsque les conditions climatiques sont bonnes, les pertes sont estimées de 5 à 10%. Cependant, dans de mauvaises conditions, elles peuvent atteindre 50%. L'augmentation de la densité de semis est une alternative pour réduire ces pertes et d'autant plus en semis tardif où les risques climatiques sont plus impactant (Cornec, 2009).

En effet, la date de semis joue un rôle dans la perte de plantes et peut influencer significativement ou non l'accroissement de la densité de semis sur le rendement. La date de semis dépend notamment de la récolte du précédent cultural (Annexe 5) et des conditions climatiques. À une date de semis précoce, la densité de semis peut ne pas influencer le rendement en grains dû aux compensations mutuelles entre les composantes de

rendement. Au contraire, lorsque le semis est tardif, l'accroissement de la densité de semis augmente le nombre d'épis et le rendement (Allard, 2017; Darwinkel et al., 1977).

En outre, la date de semis affecte le tallage qui est fonction de son âge. Le semis précoce encourage l'émergence de talles durant l'automne et l'hiver. L'âge du tallage influence le nombre de grains/épi. Des talles produites précocement produisent des épis plus nombreux et plus lourds (Allard, 2017; Darwinkel et al., 1977). À contrario, le semis tardif présente une période de tallage plus courte, généralement printanière. Par conséquent, il favorise la réduction de la production de talles au stade de redressement (Arvalis, 2013; Darwinkel et al., 1977; Spink et al., 2000). D'autres raisons peuvent expliquer l'augmentation de la densité de semis telles que le type de sol, des qualités d'implantations défavorables pouvant réduire le taux de levée, etc. (Arvalis, 2013).

Enfin, la densité de semis influence l'efficacité d'utilisation du rayonnement. En effet, l'augmentation de la densité de semis entraîne une hausse asymptotique de l'interception du PAR (Gooding et al., 2002). Cependant, l'efficacité du tallage est réduite avec l'accroissement de la densité de semis, car le taux de mortalité des talles augmente. La variation du taux de semis engendre la variation de la densité de plantes. La densité de plantes ou encore la compensation des plantes à faible densité de semis est observable à travers l'estimation de la couverture foliaire (Wood et al., 2003) (Annexe 6).

4. Objectifs

L'objectif principal de ce travail de fin d'études est d'étudier les effets de la densité de semis et du choix variétal sur le rendement du froment d'hiver et ses composantes. Chaque composante de rendement est déterminée et évaluée à travers deux essais assignés à la détermination du rendement. Les composantes de rendement ainsi que d'autres variables sont évaluées à l'aide de diverses mesures. De plus, l'objectif est de déterminer la densité de semis agronomique optimale selon la densité de semis en fonction des rendements obtenus. En outre, l'étude va également porter sur l'influence de la densité de semis et du choix variétal sur le développement végétal à travers des mesures telles que la couverture foliaire, le LAI, la sénescence, etc.

5. Matériels et méthodes

5.1 Site expérimental

L'étude se base sur deux essais, constitués de modalités similaires, localisés sur deux parcelles voisines de la ferme de Liessart située à Béciers dans le Hainaut (Figure 4). Les deux essais se différencient par leur précédent cultural, leur date de semis, la disposition et la superficie des parcelles. L'essai n°1 (E1) (50°38'44.6"N 3°32'39.2"E) a été semé le 19 octobre 2022 par Jorion Philip-Seeds après un précédent maïs grains. L'essai n°2 (E2) (50°38'27.8"N 3°32'48.4"E) a été mis en place par Redebel S.A. le 26 octobre 2022 après un lin textile.

Le sol de ces parcelles est limoneux à drainage modéré ou imparfait (WalOnMap, 2023). L'E1 est caractérisé par des sols de type Ada0, Ada1 et ADp(c) et l'E2 par des sols de type Ada1 et ADp(c) (Figure 4 et Tableau 3).

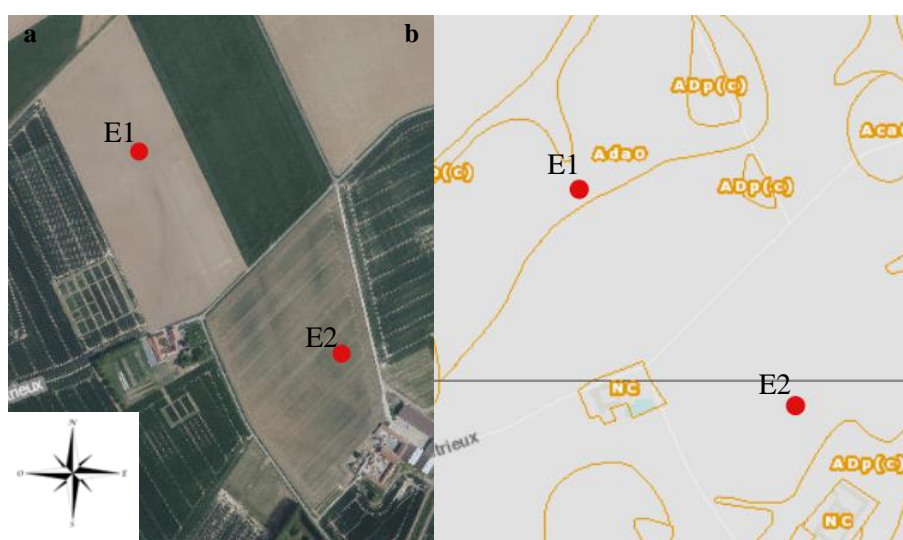


Figure 4 : Image aérienne de l'E1 et l'E2 (a) ; Carte Numérique des sols de Wallonie de l'E1 et l'E2 (b) (WalOnMap, 2023).

Tableau 3 : Légende de la carte numérique des sols de Wallonie (ULg - GxABT et al., 2009).

Type de sol	Définition
Ada0	Sols limoneux à drainage imparfait (sols modérément gleyifiés), à horizon B textural et à horizon A épais (> 40 cm).
Ada1	Sols limoneux à drainage imparfait (sols modérément gleyifiés), à horizon B textural et à horizon A mince (< 40 cm).
ADp(c)	Sols limoneux à drainage modéré ou imparfait (sols faiblement ou modérément gleyifiés), avec une absence de développement de profil et un horizon B situé entre 40 et 80 cm.

5.2 Analyses de sol

Des analyses de sol ont été réalisées sur les parcelles en 2021 pour l'E1 et en 2023 pour l'E2 par le laboratoire du CARAH (Centre pour l'Agronomie et Agro-industrie de la province du Hainaut), membre du réseau REQUASUD (Tableau 4). D'après ces analyses, certains éléments mesurés sont soit légèrement en

excès, modéré ou faible. Il convient de surveiller certains macroéléments tels que le soufre (E1 et E2) et le sodium (E2). Le conseil de fertilisation préconisait un apport de 23 kg/ha de potasse et de 66 kg/ha de soufre pour l'E2.

Tableau 4 : Analyses de sol des parcelles.

Eléments	Valeur		Intervalle optimum
	Essai 1	Essai 2	
pH KCl	7	6,7	5,9 à 6,4
pH H ₂ O	7,3	7,2	
Teneur du sol			
Carbone (% C)	1,2	1	1,1 à 1,2
Humus (%)	2,4	2	2,2 à 2,5
Azote organique (‰ N)	1,2	1	1,2 à 1,6
Rapport C/N	10	10	8 à 12
Macro-éléments			
Phosphore (mg P/100g)	7,9	10,4	4,9 à 6,4
Potassium (mg K/100g)	19,2	20,7	11,7 à 15,6
Magnésium (mg Mg/100g)	10,2	15,3	7,3 à 9,7
Calcium (mg Ca/100g)	266	221	136 à 204
Sodium (mg Na/100g)	2,3	1,4	2,5 à 3,5
Soufre (mg S/100g)	0,9	0,7	1,6 à 2,1

5.3 Conditions climatiques

La Belgique a un climat tempéré océanique assez variable, mais ne donnant, en général, pas de conditions climatiques extrêmes. La moyenne des précipitations annuelle varie entre 700 à 850 mm et la moyenne de température annuelle est de 11,4°C. La vitesse moyenne du vent varie de 2 à 7 m/s selon la région et la moyenne du rayonnement solaire global journalier s'élève à 2880 Wh/m² (IRM, 2023). Pour cette saison culturale, la quantité d'eau était de 534 mm et 515 mm respectivement pour l'E1 et l'E2. Cette différence est liée à la date de semis et à l'orage qui s'est abattu sur l'E1 une semaine auparavant la mise en place de l'E2. En outre, la moyenne des températures s'élevait à 10,2°C. La Figure 5 illustre l'évolution de la température et des précipitations durant la saison culturale à partir des données enregistrées depuis la station météorologique de JPS située non loin des essais.

Les bilans climatiques soulignent que l'automne 2022 est caractérisé par un climat bien plus chaud qu'une année moyenne. En effet, en Belgique, les écarts des températures par rapport à la moyenne varient de 1,4 à 1,6°C supplémentaire. Dans la région limoneuse où se situent les essais, l'automne 2022 est présenté comme chaud et sec. Les précipitations sont comparables à une année moyenne (léger manque de 20 mm). Les conditions climatiques des semis d'octobre ont été favorables à une levée rapide et homogène.

L'hiver est décrit comme doux et humide (IRM, 2023). Le début de l'hiver 2023 était légèrement froid et sec avec un écart de température estimé de -0,5°C par rapport à une année moyenne. À partir de la mi-décembre, l'hiver a été plutôt doux (IRM, 2023; Livre Blanc Céréales, 2023).

Le printemps a été humide (Figure 5). En effet, les mois de mars et avril sont considérés comme sombres et humides. En mars, le rayonnement solaire était moindre comparé à une année normale. En avril, les températures sont légèrement plus froides avec un climat humide caractérisé par une pluviométrie de 126 mm comparé à 59 mm pour une année normale. Le mois de mai était ensoleillé et légèrement plus sec. Le mois de juin est le mois le plus chaud de la saison culturale avec une température moyenne de 20°C comparé à 16,7°C pour une année normale. À partir du mois de juin, les conditions climatiques ont été favorables à une maturation plus rapide de la culture d'environ 6 jours comparé à une année normale (CRA-W, 2023). La fin de printemps a été plutôt sèche avec aucune précipitation observée entre mi-mai et mi-juin. Quant au mois de juillet, celui-ci est proche de la normale saisonnière au niveau des températures et des précipitations (IRM, 2023).

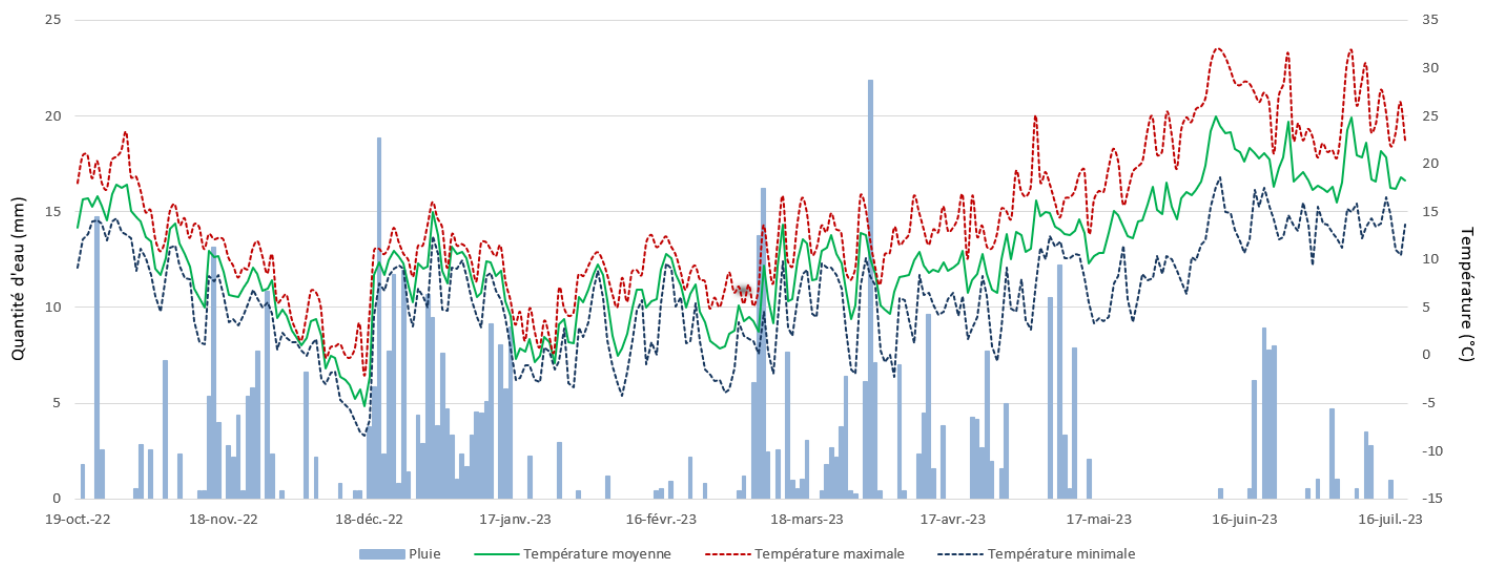


Figure 5 : Graphique des températures et de la pluviométrie de la saison culturale des essais.

5.4 Itinéraire technique et dégâts post semis

Le tableau 5 résume l'ensemble des interventions culturales sur les deux essais menés en conduite conventionnelle. En outre, des dégâts post semis sont visibles pour l'E1 à la suite d'un orage qui a touché l'essai peu de temps après son semis. Cependant, ces dégâts restaient très faibles à l'échelle parcellaire (Annexe 7).

Tableau 5 : Itinéraire technique des essais.

Date	Stade BBCH	Interventions	
		E1	E2
19-oct.-22		Semis	
26-oct.-22			Semis
28-oct.-22	BBCH 13	Désherbage/insecticide : Mateno Duo 0,5 l/ha, Liberator 0,5 l/ha et Karis 100CS 50 ml/ha	
13-nov.-22			Désherbage/insecticide : Mateno Duo 0,5 l/ha, Liberator 0,5 l/ha et Karis 100CS 50 ml/ha
20-févr.-23	BBCH 26	Fertilisation : Phosphate de diammonium 100 kg/ha (18% N - 46% P ₂ O ₅) et KCl 100 kg/ha	
21-févr.-23		Fertilisation : Kiesérite 100 kg/ha (50% SO ₃ - 25% MgO)	Fertilisation : 60 uK ₂ O, 48 uP ₂ O ₅ et 40 uSO ₃ 1ère fraction azotée : 80 uN
23-mars-23		1ère fraction azotée : 60 uN	
29-mars-23	BBCH 26-30	1er régulateur/fongicide : Cycocel 1 l/ha, Prodax 0,35 kg/ha, Tebucur 250 0,7 l/ha et fertilisant : sulfate de magnésium 5 kg/ha	1er régulateur/fongicide : Cycocel 1 l/ha, Primus 0,1 l/ha, Prodax 0,35 kg/ha, Tebucur 250 0,7 l/ha et fertilisant : sulfate de magnésium 5 kg/ha
05-avr.-23	BBCH 30-31		2ème fraction azotée : 60 uN
07-avr.-23		2ème fraction azotée : 60 uN	
30-avr.-23	BBCH 31-32	2ème régulateur/fongicide : Finy 0,025 kg/ha, Medax Top 1 l/ha, Protendo 300EC 0,4 l/ha, Aquino 1 l/ha, Stavento 1,5 l/ha et fertilisant : sulfate de magnésium 5 kg/ha	
10-mai-23	BBCH 37-39	3ème fraction azotée : 60 uN	
15-mai-23			3ème fraction azotée : 50 uN
23-mai-23	BBCH 55-59		3ème fongicide : Revystar Gold 1 l/ha, Comet New 0,5 l/ha et fertilisant : sulfate de magnésium 5 kg/ha
28-mai-23		3ème fongicide : Revystar Gold 1 l/ha, Comet New 0,5 l/ha et fertilisant : sulfate de magnésium 5 kg/ha	
19-juil-23	BBCH 89	Récolte	

5.5 Facteurs étudiés

Ces deux essais permettent d'étudier deux facteurs fixes : la densité de semis et le choix variétal. Le premier facteur reprend quatre densités de semis différentes. Le second comprend trois variétés caractérisées par des potentiels de tallage différents. Douze objets sont étudiés et répétés trois fois dans chacun des essais (Tableau 6).

Tableau 6 : Modalités pour les deux facteurs fixes étudiés sur les essais.

Essai	Facteur : Choix variétal	Facteur : Densité de semis	Modalité
E1 et E2	KWS Extase	75 grains/m ²	1
	KWS Extase	150 grains/m ²	2
	KWS Extase	300 grains/m ²	3
	KWS Extase	400 grains/m ²	4
	Gedser	75 grains/m ²	5
	Gedser	150 grains/m ²	6
	Gedser	300 grains/m ²	7
	Gedser	400 grains/m ²	8
	Moschus	75 grains/m ²	9
	Moschus	150 grains/m ²	10
	Moschus	300 grains/m ²	11
	Moschus	400 grains/m ²	12

5.4.1 Facteur : Choix variétal

Les variétés étudiées sont : **KWS Extase** (de KWS Momont), **Gedser** (de Nordic Seeds) et **Moschus** (de Strube Research). Chaque variété possède des caractéristiques agronomiques, des qualités technologiques et des comportements face aux maladies différentes (Tableaux 7, 8 et Annexe 8).

Tableau 7 : Caractéristiques agronomiques des trois variétés étudiées (Jorion Philip-Seeds, 2023).

	Moschus	Gedser	KWS Extase
Alternativité	Hiver	1/2 Hiver	Hiver
Précocité montaison	1/2 tardif	1/2 tardif	1/2 précoce
Précocité épiaison	1/2 tardif	1/2 tardif	1/2 précoce
Résistance au froid	Bonne à très bonne	Bonne à très bonne	Bonne
Faculté de tallage	Moyenne à bonne	Moyenne	Très bonne
Hauteur de plante	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Résistance à la verse	Bonne	Bonne	Très bonne
Résistance au piétin verse	Bonne	Bonne	Moyenne

Tableau 8 : Comportement face aux maladies des variétés étudiées. Les cotations des maladies sont exprimées sur une échelle de 1 à 9 (9 étant la cote la plus favorable ; absence de symptômes). (*Légende : note maximale observée en vert et note minimale observée en rouge*)

	Moschus		Gedser		KWS Extase	
	(Jorion Philip-Seeds, 2023)	(Faux et al., 2020)	(Jorion Philip-Seeds, 2023)	(Livre Blanc Céréales, 2020)	(Jorion Philip-Seeds, 2023)	(Livre Blanc Céréales, 2021)
Oïdium	9	8,3	6	7,1	8	8,7
Rouille jaune	8,5	8,1	6,5	7,7	8,5	8,9
Rouille brune	7	5,7	5	4,5	7,5	7
Septoriose	7,5	7,2	6	6,3	7,5	6,7
Maladies des épis	7,5	7,6	6	4,7	7	6,3

5.4.2 Facteur : Densité de semis

Ce facteur comprend quatre modalités : 75, 150, 300 et 400 grains/m² (gr/m²) et est croisé avec le facteur choix variétal.

5.4.3 Dispositifs expérimentaux

Les essais ont été implantés selon des dispositifs expérimentaux complètement aléatoires. Chaque essai comporte 36 parcelles (12 objets et 3 répétitions). De plus, les essais sont délimités de part et d'autre par des bordures et sont entourés de zones tampons. La superficie d'une parcelle est respectivement 8,75 m² et 10 m² pour l'E1 et l'E2 et avec un interligne de semis de 12,5 cm (Figure 6 et 7).

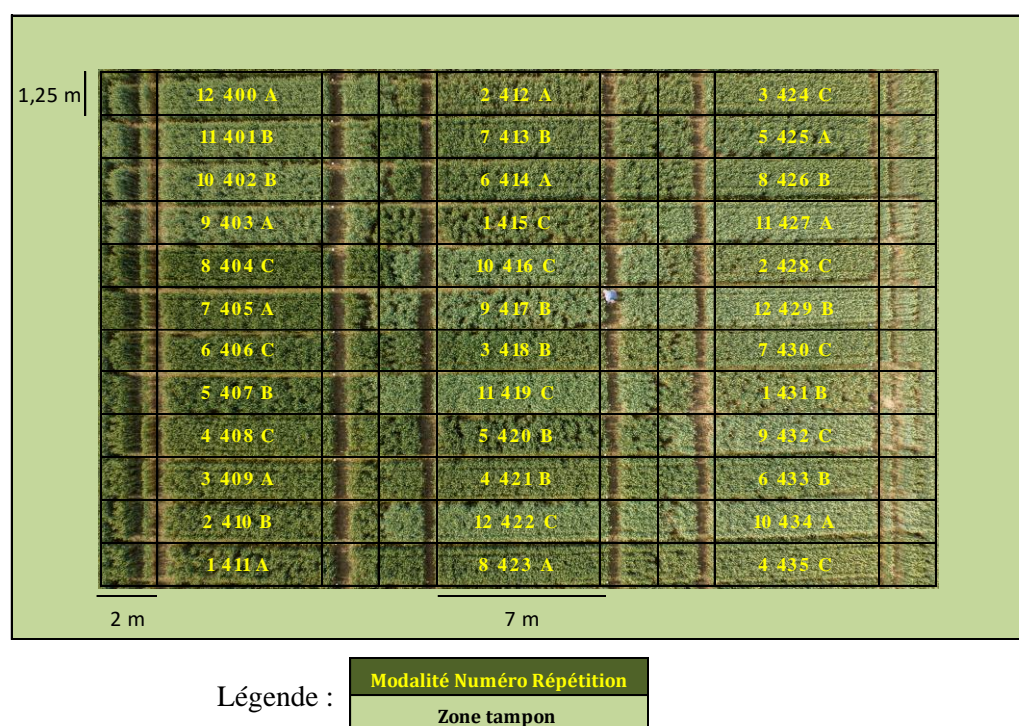
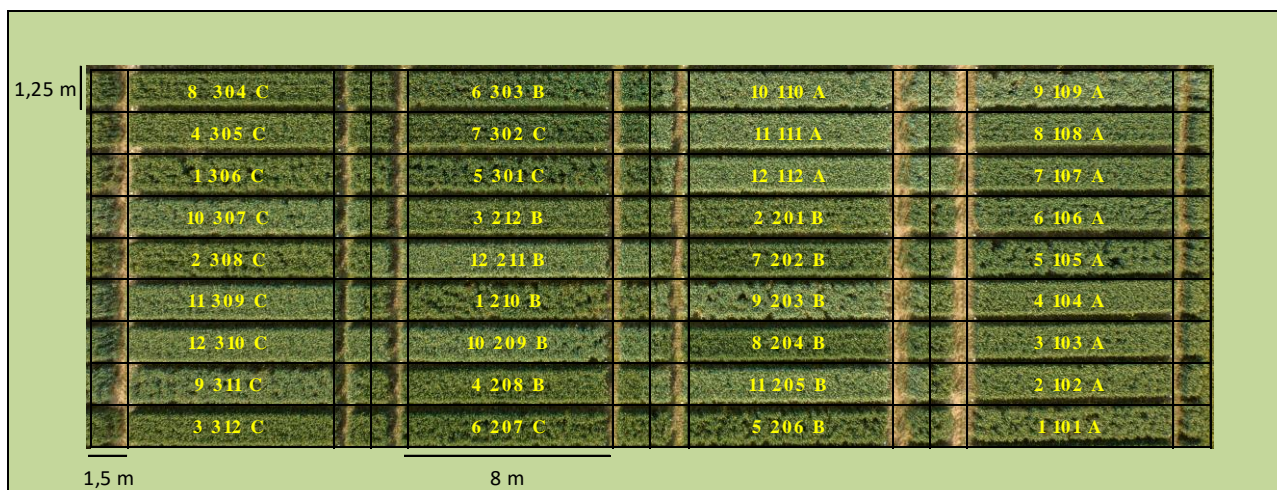


Figure 6 : Image aérienne de l'E1 (Colinet M., 2023) ; Dispositif expérimental E1.



Légende :

Modalité Numéro Répétition
Zone tampon

Figure 7 : Image aérienne de l'E2 (Colinet M., 2023) ; Dispositif expérimental E2.

5.6 Observations et paramètres mesurés

Différentes observations et mesures ont été réalisées durant le cycle de développement du blé. Le Tableau 9 synthétise l'ensemble des observations et paramètres mesurés selon les stades phénologiques. Les sections suivantes détaillent les protocoles de mesures.

Tableau 9 : Synthèse des mesures.

Mesure	Stade BBCH													Nombre de
	14	21	26*	30	31	32	39	55	65	71	75	87	89	mesures/parcelle
Stades phénologiques	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	12/essai
Densité de plantes	x	x	x	x										2
Densité des talles			x	x		x	x							2
Densité d'épis									x	x			x	2
Hauteur du couvert				x		x	x	x	x	x			x	1
Couverture foliaire		x	x	x		x	x							2
Indice de surface foliaire				x										1
Taux de sénescence										x	x	x	x	5
Port de plante		x	x	x		x	x							1
Etages de grains par épi										x				5
Longueur de l'épi										x				5
Indice de récolte													x	5
Poids des grains par épi													x	5
Nombre de grains par épi													x	5
Rendement													x	1
Humidité des grains													x	1
Poids spécifique des grains													x	1
PMG													x	1
Maladies						x	x	x	x	x				1
Adventices						x		x						1
Ravageurs et insectes						x	x	x	x	x				1

*Stade uniquement observé pour les densités de semis 75 et 150 gr/m².

5.6.1 Stades phénologiques

L'observation des stades phénologiques du blé d'hiver a été réalisée tout au long de son développement selon l'échelle BBCH améliorée (Annexe 9) et selon la méthode suivante :

- Aperçu du stade à l'aide de l'outil d'aide à la décision « Phénoblé² ».
- Confirmation sur site à l'aide d'observations sur pieds et dissections de maître brins sur des plantes prélevées en zones de bordure (Figure 8).
- Si confirmation du stade : collecte des données.



Figure 8 : Coupes longitudinales du maître brins des variétés KWS Extase (E), Gedser (G) et Moschus (M) à différents stades.

5.6.2 Densité de plantes, de talles et d'épis

Les densités de plantes, de talles et d'épis sont des composantes déterminant le rendement. Ces différentes mesures sont effectuées par des comptages réalisés à différents stades phénologiques clés (Tableaux 9 et 10).

Tableau 10 : Indicateurs des mesures de densités.

Mesure	Interprétation
Densité de plantes	Indicateur du nombre de plantes, du taux de levée et des pertes de plantes.
Densité de talles	Indicateur du nombre total de talles et du taux de régression de talles.
Densité d'épis	Indicateur du nombre de talles fertiles.

² <https://www.cra.wallonie.be/fr/outils-aide-a-la-decision>

Un quadra de 50 cm de côté est placé aléatoirement et répété deux fois dans chaque parcelle. Ensuite, le nombre de plantes/talles/épis au sein du quadra est compté manuellement. Il s'en est suivi une normalisation par la surface du quadra afin d'estimer le nombre de plantes/talles/épis au mètre carré (Figure 9).

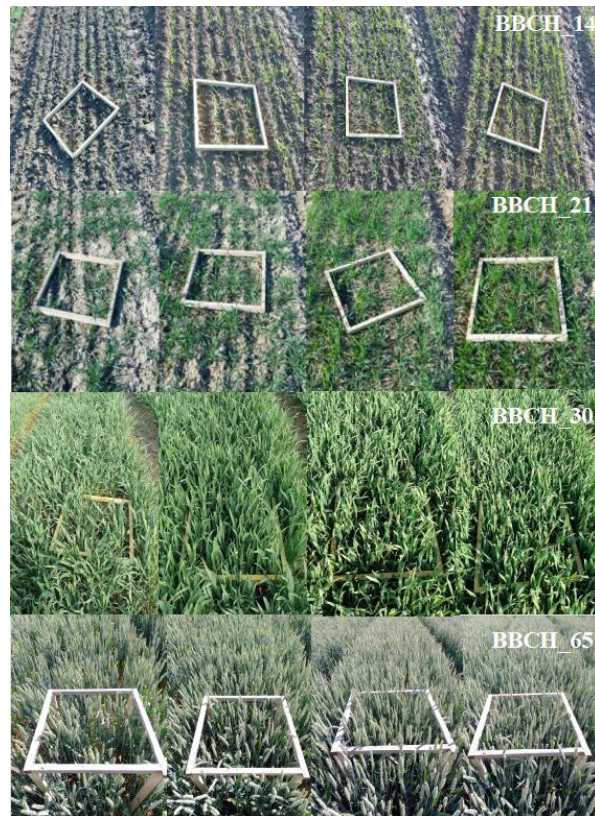


Figure 9 : Comptages de densités au stade BBCH 14, 21, 30 et 65 respectivement de bas en haut et dans des parcelles de densité de semis 75, 150, 300 et 400 grains/m² respectivement de gauche à droite.

5.6.3 Hauteur du couvert

La hauteur du couvert a été réalisée à l'aide d'une échelle graduée et d'un plateau comparable à un herbomètre. La mesure de la hauteur est réalisée à partir de la base de la plante, le plateau descend doucement jusqu'au sommet de la couverture végétale (sans étirement des plantes) permettant ainsi une lecture directe sur l'axe gradué (Figure 10).

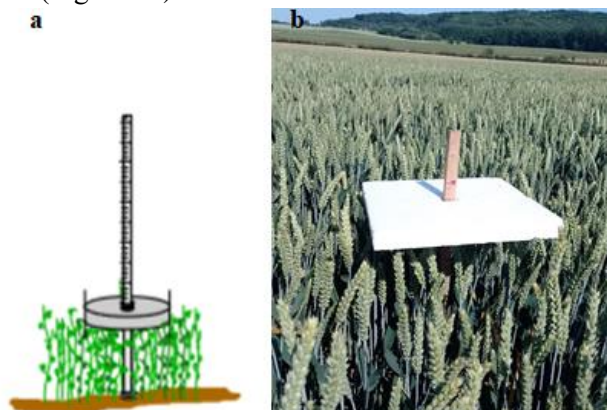


Figure 10 : Mesure de la hauteur du couvert (a) (ITAB, 2000) et mise en œuvre dans cette étude (b) (Source : A. Dejonckheere).

5.6.4 Port de la plante

Le port des feuilles permet de relier la variété à sa capacité à couvrir le sol. Cette mesure peut également mettre en avant des différences entre les variétés dues à leur précocité à certains stades phénologiques. Le port est déterminé visuellement à partir du port des talles et des feuilles. Une cotation de 1 à 9 du port est donnée en utilisant l'angle formé par les feuilles externes et les talles avec un axe vertical imaginaire (Figure 11).

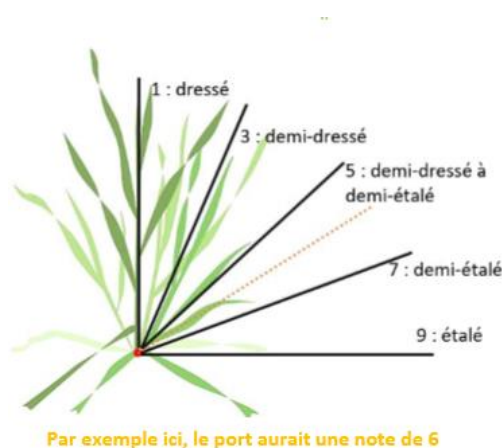


Figure 11 : Exemple de la détermination du port de la plante (ITAB, 2022).

5.6.5 Couverture foliaire

Canopeo® est une application mobile simple, précise et rapide pour analyser la couverture foliaire. Cette application présente une classification automatique des pixels par seuil de couleur. L'analyse des images correspond à une image binaire où les pixels blancs correspondent aux pixels qui ont satisfait aux critères de sélection c'est-à-dire la canopée verte variant de 0 à 100% (Patrignani et al., 2015) (Figure 12).

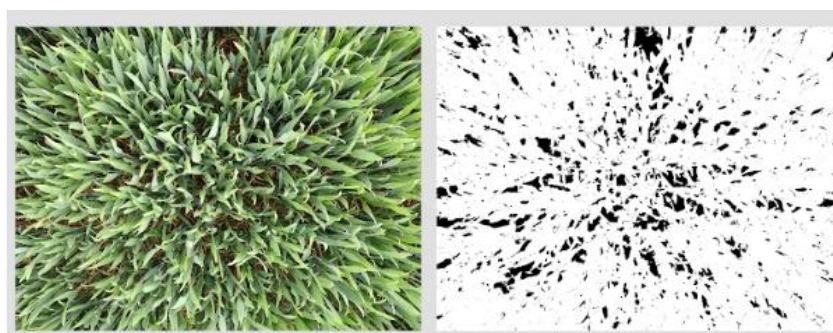


Figure 12 : Interprétation de la couverture foliaire avec Canopeo®. Dans cet exemple, la couverture foliaire est de 87,92%.

Afin de prendre des images le plus précisément possible, la méthode est de tendre son bras vers le côté du corps, à une distance d'un mètre depuis le sommet de la canopée et d'orienter la caméra parallèlement au sol. Il convient de remarquer que les conditions climatiques peuvent affecter la qualité des images prises, notamment lorsque celles-ci sont prises en plein soleil. Cette mesure a donc été réalisée en l'absence de soleil.

5.6.6 Indice de la surface foliaire (LAI)³

Afin d'estimer le LAI, un prélèvement foliaire est nécessaire. Étant donné que les essais sont destinés à la détermination du rendement, le prélèvement de la surface foliaire a été réalisé dans les zones de bordures délimitant les parcelles. La surface foliaire a été prélevée sur 50 cm dans une ligne de semis centrale pour chaque répétition. Une fois collectées, les plantes sont décortiquées afin de détacher les feuilles des tiges. Les feuilles ont été ensuite étalées et collées sur des pages A4 blanches (Figure 13). Par la suite, les pages A4 ont été scannées à l'aide d'une imprimante de type Brother (MFC-9140CDN) à une résolution de 300 dpi (Annexe 10).



Figure 13 : Étapes du prélèvement et de l'étalement de la surface foliaire.

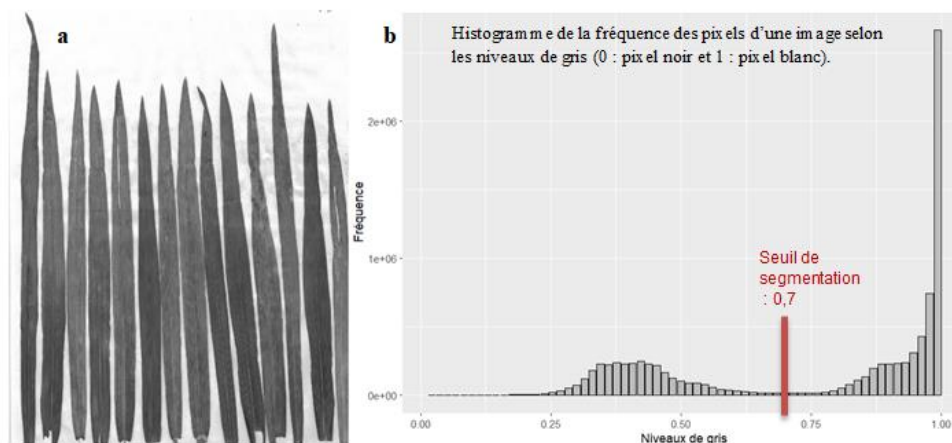


Figure 14 : Image traitée en différents niveaux de gris (a) ; Histogramme de la fréquence des pixels (b).

Le traitement des images a été effectué à l'aide du logiciel RStudio. La méthode réalisée est une transformation des images en différents niveaux de gris à partir du package EBImage et de la fonction `channel()`. Les différents niveaux de gris permettent d'obtenir des pixels gris correspondant à la surface foliaire et des pixels blancs correspondant à l'arrière-plan (Figure 14a). En outre, un seuil de segmentation a été fixé pour chaque image à 0,7 afin de séparer les pixels gris et blancs (Figure 14b). Enfin, afin de

³ Le LAI a été réalisé uniquement sur l'E1 au BBCH 30 pour cause de la formation des chemins dans les essais (Figure 6 et 7).

déterminer l'indice de surface foliaire, la formule ci-dessous a été appliquée à partir de la somme des pixels gris par image (Equation 1).

$$LAI = \frac{(\text{Somme des pixels gris} \times \text{Surface d'un pixel})}{\text{Surface de référence}}$$

Avec : Un pouce : 2,54 cm

Résolution de l'image : 300 dpi

Surface d'un pixel : pouce²/résolution²

Surface de référence : surface récoltée

Equation 1 : Formule de l'indice de surface foliaire.

5.6.7 Taux de sénescence de la surface foliaire

Le maintien de la surface verte des dernières feuilles déployées durant la phase de remplissage des grains est un facteur influençant le rendement et pouvant souligner des différences selon la densité de semis et le choix variétal. À chaque mesure, une notation du taux de sénescence a été attribuée aux quatre étages foliaires sous-jacents à l'épi. Cinq maitres brins sont sélectionnés et identifiés à l'aide d'une étiquette pour réaliser la mesure dans chaque parcelle (Annexe 11). Un taux de sénescence est estimé à chaque étage foliaire à l'aide d'une échelle visuelle (note de 0 à 10) (Figure 15). En outre, une note globale par parcelle a été réalisée afin de confirmer les notes des cinq maitres brins.



Figure 15 : Echelle de notation de la sénescence des feuilles de 0 à 10 (Martre P., n.d.).

5.6.8 Nombre d'étages de grains par épi et longueur de l'épi

Au stade mi-remplissage des grains, cinq épis sont sélectionnés dans chaque parcelle, soit 15 épis par modalité. Afin de sélectionner les épis, une poignée d'épis, laissée sur pied, est prise aléatoirement dans la parcelle. Ensuite, cinq épis sont choisis parmi cette poignée afin de réaliser les mesures. Le nombre d'étages de grains/épi est ensuite compté manuellement. La longueur de chaque épi est mesurée à l'aide d'un mètre gradué (Figure 16).



Figure 16 : Mesure de la longueur de l'épi.

5.6.9 Indice de récolte, nombre et poids des grains par épi

L'indice de récolte (IR) est le rapport entre le rendement en grains et la matière sèche totale produite. Dans les jours qui précèdent la récolte, les biomasses aériennes de cinq talles (épi-tige-feuilles) sont coupées à partir d'une poignée de tiges sélectionnée aléatoirement dans chaque parcelle. Les échantillons sont ensuite placés dans une étuve portée à 60°C pendant 72 heures. Ensuite, les biomasses sèches des échantillons sont pesées à l'aide d'une balance de précision. En outre, à la suite d'un décorticage des épis à l'aide d'une machine à batteuses d'épis (HEGE 16), le poids et le nombre de grains par épi sont respectivement déterminés par une pesée et un compteur à grains (Numigral : cereal tester) (Figure 17). Ensuite, l'IR est calculé pour chaque échantillon.



Figure 17 : Réalisation de la mesure de l'indice de récolte et du nombre de grains par épi.

5.6.10 Rendement en grains et analyses post récolte⁴

Le rendement est une mesure indispensable à réaliser pour chaque parcelle. Les grains sont récoltés à l'aide de la moissonneuse-batteuse et mis en sac pour chaque parcelle. Ensuite, un pesage est effectué, suivi d'une normalisation en fonction de la superficie de la parcelle. Celui-ci permettra d'obtenir le rendement en grains à l'hectare. Pour chaque répétition, un échantillon de grains est analysé à l'aide d'un humidimètre (DICKY-john) afin d'obtenir l'humidité et le poids spécifique (Figure 18). En effet, afin de pouvoir comparer les rendements en grains de chaque parcelle, une rectification du poids frais des grains à l'aide d'une formule est effectuée afin d'obtenir un rendement à une humidité standard de 15% du poids frais (Equation 2).



Figure 18 : Récolte et analyses post récolte.

$$\text{Rendement à 15 \%} = \frac{P}{S} \times \left(\frac{100 - H}{85} \times 100 \right) ; \text{ en qx/ha}$$

P : poids de grain récolté de la microparcelle, en kg

H : humidité à la récolte, en %

S : surface de la microparcelle, en m²

Équation 2 : Formule du rendement standardisé (ITAB, 2022).

5.6.11 Le poids de mille grains⁴

Le PMG est déterminé à l'aide d'un compteur à grains semblable à celui utilisé dans la mesure 5.6.9. Celui-ci dénombre 2 fois 500 grains qui sont ensuite pesés à l'aide d'une balance de précision.

5.6.12 Observations secondaires

Diverses observations secondaires telles que les maladies, les adventices, les ravageurs et insectes ont été réalisées durant l'étude, celles-ci n'ont pas été approfondies étant donné leurs effets mineurs (Annexe 12, 13 et 14).

⁴ Les mesures 5.6.10 et 5.6.11 ont été réalisées pour l'E1 telles qu'énoncées. Les mesures de l'E2 ont été réalisées par Redebel S.A. et ont ensuite été transmises pour ce travail de fin d'études par des méthodes similaires.

5.7 Manipulation des données

La manipulations des données de base ont permis d'obtenir des informations supplémentaires pertinentes à l'étude de l'effet de la densité de semis et du choix variétal sur le rendement et ses composantes tels que le taux de levées, les pertes de plantes, le nombre de talles par plante, etc. L'obtention des données inférées depuis les données de base est détaillée ci-dessous.

Taux de levée (%)	=	$\frac{\text{Plantes levées (BBCH 14)}}{\text{Densité de semis}} \times 100$
Perte de plantes hivernales (%)	=	$\frac{\text{Densité de plantes (BBCH 14)} - \text{Densité de plantes (BBCH 21)}}{\text{Densité de plantes (BBCH 14)}} \times 100$
Perte de plantes printanières (%)	=	$\frac{\text{Densité de plantes (BBCH 21)} - \text{Densité de plantes (BBCH 30)}}{\text{Densité de plantes (BBCH 21)}} \times 100$
Total des pertes de plantes (%)	=	$\frac{\text{Densité de plantes (BBCH 14)} - \text{Densité de plantes (BBCH 30)}}{\text{Densité de plantes (BBCH 14)}} \times 100$
Talles par plante	=	$\frac{\text{Densité de talles (BBCH X)}}{\text{Densité de plantes (BBCH X)}}$
Régression de talles (%)	=	$\frac{\text{Densité de talles (BBCH 26)} - \text{Densité de talles (BBCH 39)}}{\text{Densité de talles (BBCH 26)}} \times 100$
Talles fertiles (%)	=	$\frac{\text{Densité d'épis (BBCH 65)}}{\text{Densité de talles (BBCH 39)}} \times 100$
Épis par plante	=	$\frac{\text{Densité d'épis (BBCH 89)}}{\text{Densité de plantes (BBCH 89)}}$
Perte d'épis (%)	=	$\frac{\text{Densité d'épis (BBCH 65)} - \text{Densité d'épis (BBCH 89)}}{\text{Densité d'épis (BBCH 65)}} \times 100$
Densité de grains	=	Rendement/PMG
Grains/épi	=	Nombre de grains par épi / Nombre d'étages de grains par épi
Rendement_{théorique}	=	Densité d'épis (BBCH 89) X Nombre de grains/épi X PMG

Équation 3 : Synthèse des équations de manipulation de données.

6. Analyse des données

Les données, reprises dans le Tableau 11, ont été traitées à l'aide du logiciel statistique RStudio (Version 4.3.1). Des analyses de la variance multivariées (ANOVA) ont été réalisées pour toutes les mesures. Les conditions d'existence ont été appliquées sur les résidus de l'ANOVA. Les ANOVA ont été réalisées avec la fonction `aov()`. La normalité et l'égalité des variances sont vérifiées graphiquement sur base des résidus de l'ANOVA avec les fonctions `ggqqplot()` (package `ggplot2`) et `plot()` en raison du faible nombre d'observations par population (Annexe 15).

Pour toutes les hypothèses, le niveau de significativité est fixé avec une p-valeur inférieure à 0,05. Lorsqu'une triple interaction se présente, l'étude est poursuivie en réalisant une décomposition de plusieurs ANOVA à deux facteurs selon la pertinence des facteurs étudiés. En effet, la première décomposition de l'ANOVA à trois facteurs est réalisée selon le facteur stade. La physiologie de la plante évolue naturellement entre les stades. Si une nouvelle interaction se présente, une nouvelle décomposition en plusieurs ANOVA est réalisée selon le facteur densité de semis, facteur sur lequel l'étude porte principalement son attention. En outre, pour chaque ANOVA, un test complémentaire de type Student-Newman-Keuls (SNK) a été réalisé.

Tableau 11 : Synthèse des variables étudiées à l'aide de tests de significativité.

Mesures	Facteurs	Analyse et test complémentaire
Densité de plantes		
Densité des talles	Stade BBCH	
Densité d'épis	Choix variétal	
Hauteur du couvert	Densité de semis	
Couverture foliaire		
Taux de sénescence		
Indice de surface foliaire		
Etages de grains par épi		
Longueur de l'épi		
Poids de l'épi		ANOVA et Student-Newman-Keuls
Indice de récolte	Choix variétal	
Poids des grains par épi	Densité de semis	
Nombre de grains par épi		
Rendement		
Humidité des grains		
Poids spécifique des grains		
PMG		

7. Résultats et discussion

7.1 Résultats des tests de significativité des facteurs

Les données de l'étude présentaient pour la majorité des variables étudiées des différences significatives entre les deux essais. L'étude des variables a donc été scindée entre les deux essais. Les Tableaux 12 et 13 synthétisent les effets des facteurs et de leurs interactions pour les variables mesurées. L'Annexe 16 présente les résultats pour les variables inférées depuis les données de base. Les Tableaux 14 et 15 reprennent les valeurs moyennes et les groupes des tests SNK respectivement selon le facteur densité de semis et choix variétal pour les variables durant le développement végétal. Le Tableau 16 reprend les valeurs moyennes et les groupes des tests SNK selon chaque facteur pour les variables en pré et en post récolte. L'Annexe 17 reprend les mêmes tableaux des moyennes, mais avec les écart-type.

Tableau 12: Résultats de la significativité des facteurs stade BBCH, densité de semis et variété (ANOVA à trois facteurs).

(Légende : *** : p-valeur très hautement significative ; ** : p-valeur hautement significative ; * : p-valeur significative)

Variable	E1				E2			
	Interaction Stade Variété Densité	Interaction Stade Variété	Interaction Stade Densité	Facteur Stade	Interaction Stade Variété Densité	Interaction Stade Variété	Interaction Stade Densité	Facteur Stade
Densité de plantes		***	***	***			***	***
Densité de talles		***	**	***		*	***	***
Densité d'épis				***				***
Couverture foliaire		***	***	***	***	***	***	***
Hauteur du couvert		***	***	***		***	***	***
Variable	Interaction Etage foliaire Variété Densité	Interaction Etage foliaire Variété	Interaction Etage foliaire Densité	Facteur Etage foliaire	Interaction Etage foliaire Variété Densité	Interaction Etage foliaire Variété	Interaction Etage foliaire Densité	Facteur Etage foliaire
Sénescence _{BBCH71}	***	***	***	***		***		***
Sénescence _{BBCH75}		***	***	***	***	***	***	***
Sénescence _{BBCH87}	***	***	***	***	***	***	***	***
Sénescence _{BBCH89}								

Tableau 13 : Résultats de la significativité des facteurs densité de semis et variété (ANOVA à deux facteurs).

(Légende : *** : p-valeur très hautement significative ; ** : p-valeur hautement significative ; * : p-valeur significative)

Variable	Stade BBCH	E1			E2		
		Interaction Variété Densité	Facteur Variété	Facteur Densité semis	Interaction Variété Densité	Facteur Variété	Facteur Densité semis
Densité de plantes	14		*	***		*	***
	21		***	***		*	***
	26		***	***		*	***
	30		*	***		*	***
Densité de talles	26		***	***		***	***
	30		**	***		**	***
	32		**	***		***	***
	39		**	***		**	***
Densité d'épis	65		***	***		***	***
	71		***	***		***	***
	89		***	***		***	***
Hauteur	30		***	***		***	***
	32		**			***	**
	39		***			***	
	55		***			***	
	65		***			***	**
	71		***			***	*
	89		***			***	**
Couverture foliaire	21		***	***		***	***
	26			***		***	***
	30			***			***
	32			***	***	***	***
	39		*	***	***	***	***
LAI	30		***	***	/	/	/
Sénescence _{F1}	71						
Sénescence _{F2}	71		**	**		*	
Sénescence _{F3}	71		***	***		***	
Sénescence _{F4}	71		**	*			
Sénescence _{F1}	75		***	*		***	***
Sénescence _{F2}	75		*	*		***	*
Sénescence _{F3 et F4}	75						
Sénescence _{F1}	87		**	***		***	***
Sénescence _{F2}	87		**	***		**	***
Sénescence _{F3 et F4}	87						
Sénescence _{F1 à F4}	89						
Etages _{grains/épi}	71		*	***			
Longueur _{épi}	71		***	***		***	
IR	89		*			***	
Poids _{grains/épi}	89		*	***			
Nombre _{grains/épi}	89			***		*	**
Rendement	89		**	***	***	***	***
Humidité	89		***	*		***	**
Poids spécifique	89		***	***		***	***
PMG	89			*	*		*

Tableau 14 : Moyennes et groupes des tests SNK pour les variables avant la récolte pour le facteur densité de semis.

(Légende : *valeur moyenne maximale* observée en vert et *valeur moyenne minimale* observée en rouge selon la variable)

Variable	Densité				Essai 1																	
	de semis	BBCH 14		BBCH 21		BBCH 26		BBCH 30		BBCH 32		BBCH 39		BBCH 55		BBCH 65		BBCH 71		BBCH 89		
Densité de plantes (/m²)	400	313	a	248	a	210	a	227	a													
	300	246	b	206	b	189	b	182	b													
	150	123	c	116	c	118	c	99	c													
	75	56	d	62	d	59	d	56	d													
Densité de talles (/m²)	400					1028	a	860	a	639	a	627	a									
	300					901	b	790	b	624	a	620	a									
	150					600	c	528	c	494	b	451	b									
	75					354	d	416	d	380	c	335	c									
Densité d'épis (/m²)	400															522	a	526	a	496	a	
	300															502	a	486	b	457	b	
	150															426	b	412	c	391	c	
	75															338	c	346	d	326	d	
Hauteur (cm)	400							31	a	48		65		85		96		94		94		
	300							31	a	47		65		84		95		94		94		
	150							27	b	47	a	65	a	84	a	94	a	93	a	92	a	
	75							21	c	46		64		83		92		92		92		
Couverture foliaire (%)	400			54	a	71	a	83	a	82	a	85	a									
	300			48	b	56	b	82	a	81	a	83	a									
	150			33	c	50	c	77	b	75	b	79	b									
	75			24	d	40	d	63	c	53	c	58	c									
LAI	400							4,32	a													
	300							4,08	a													
	150							3,12	b													
	75							2,42	c													
Variable	Densité				Essai 2																	
	de semis	BBCH 14		BBCH 21		BBCH 26		BBCH 30		BBCH 32		BBCH 39		BBCH 55		BBCH 65		BBCH 71		BBCH 89		
Densité de plantes (/m²)	400	307	a	227	a	176	a	189	a													
	300	229	b	177	b	154	b	155	b													
	150	119	c	108	c	95	c	88	c													
	75	57	d	57	d	49	d	54	d													
Densité de talles (/m²)	400					958	a	789	a	623	a	582	a									
	300					820	b	651	b	576	b	545	b									
	150					636	c	557	c	452	c	415	c									
	75					437	d	506	d	395	d	369	d									
Densité d'épis (/m²)	400															492	a	464	a	455	a	
	300															462	b	461	a	445	a	
	150															416	c	397	b	377	b	
	75															361	d	361	c	350	c	
Hauteur (cm)	400							38	a	53	a	67		88	a	97	a	94	a	96	a	
	300							36	a	53	a	67		88	a	96	a	95	a	95	ab	
	150							32	b	50	ab	67		84	b	96	a	94	a	92	b	
	75							26	c	50	b	66		84	b	92	b	92	b	92	b	
Couverture foliaire (%)	400			59	a	74	a	81	a	Tableau 15												
	300			51	b	67	b	81	a													
	150			36	c	52	c	80	a													
	75			22	d	36	d	70	b													

Tableau 15

Tableau 15 : Moyennes et groupes des tests SNK pour les variables avant la récolte pour le facteur variété.

(Légende : *valeur moyenne maximale* observée en vert et *valeur moyenne minimale* observée en rouge selon la variable)

Variable	Choix	Essai 1																			
	variétal	BBCH 14		BBCH 21		BBCH 26		BBCH 30		BBCH 32		BBCH 39		BBCH 55		BBCH 65		BBCH 71		BBCH 89	
Densité de plantes (/m²)	KWS Extase	174	b	150	b	134	b	132	b												
	Gedser	197	a	179	a	158	a	151	a												
	Moschus	182	ab	144	b	139	b	139	ab												
Densité de talles (/m²)	KWS Extase					701	b	671	a	567	a	518	a								
	Gedser					786	a	657	ab	536	ab	529	a								
	Moschus					675	b	617	b	499	b	477	b								
Densité d'épis (/m²)	KWS Extase													461	a	452	a	420	a		
	Gedser													462	a	461	a	443	a		
	Moschus													418	b	415	b	326	b		
Hauteur (cm)	KWS Extase							29	a	48	a	64	b	84	b	91	b	91	b	88	c
	Gedser							28	a	45	b	61	c	79	c	93	b	93	b	93	b
	Moschus							25	b	49	a	69	a	89	a	98	a	98	a	97	a
Couverture foliaire (%)	KWS Extase	42			a	58	a	76		76		77	b								
	Gedser	43			a	58	a	77	a	74	a	81	a								
	Moschus	34			b	54	b	76		75		78	ab								
LAI	KWS Extase							3,86	a												
	Gedser							3,68	a												
	Moschus							2,92	b												
Variable	Choix	Essai 2																			
	variétal	BBCH 14		BBCH 21		BBCH 26		BBCH 30		BBCH 32		BBCH 39		BBCH 55		BBCH 65		BBCH 71		BBCH 89	
Densité de plantes (/m²)	KWS Extase	183	a	144	ab	116		127	a												
	Gedser	184	a	150	a	127	a	124	a												
	Moschus	167	b	133	b	111		112	b												
Densité de talles (/m²)	KWS Extase					760	a	672	a	549	a	496	a								
	Gedser					732	a	610	b	509	b	488	a								
	Moschus					645	b	596	b	478	c	451	b								
Densité d'épis (/m²)	KWS Extase													457	a	442	a	426	a		
	Gedser													441	a	434	a	411	a		
	Moschus													401	b	385	b	383	b		
Hauteur (cm)	KWS Extase							35	a	52	b	66	b	85	b	91	c	90	c	89	c
	Gedser							33	ab	49	c	65	b	79	c	94	b	93	b	94	b
	Moschus							31	b	54	a	71	a	91	a	100	a	100	a	98	a
Couverture foliaire (%)	KWS Extase	49			a	62	a	78	ab												
	Gedser	48			a	60	a	79	a												
	Moschus	30			b	49	b	76	b												
	KWS Extase									91	a	84	a								
	Gedser 400									83	c	86	a								
	Moschus									87	b	78	b								
	KWS Extase									89	a	83	a								
	Gedser 300									83	b	85	a								
	Moschus									83	b	77	b								
	KWS Extase									86	a	82	a								
	Gedser 150									79	b	83	a								
	Moschus									76	c	69	b								
	KWS Extase									76	a	80	a								
	Gedser 75									74	a	81	a								
	Moschus									47	b	59	b								

Tableau 16 : Moyennes et groupes des tests SNK pour les variables en pré et en post récolte pour le facteur densité de semis et variété.

(Légende : *valeur moyenne maximale* observée en vert et *valeur moyenne minimale* observée en rouge selon la variable)

Essai	Densité de semis	Etages		Longueur		Nombre		Poids _(g)		IR _(%)		Humidité		Poids _(kg/ha)		PMG _(g)		Rendement	
		grains/épi		épi _(cm)		grains/épi		grains/épi				(%)		spécifique				(t/ha)	
E1	400	18	b	10,1	bc	51	c	2,0	c	45	a	15,3	b	78,5	b	45,9	ab	11,4	a
	300	18	b	9,8	c	49	c	2,0	c	45	a	14,9	b	79,1	a	47,4	ab	11,1	a
	150	19	a	10,4	ab	57	b	2,4	b	46	a	15,1	b	78,0	b	48,6	a	10,2	b
	75	19	a	10,8	a	66	a	2,9	a	48	a	16,2	a	75,8	c	48,7	a	8,7	c
E2	400	19		10,6		51	c	2,0		45		16,4	b	80,0	a	E2*			
	300	19		10,8		53	bc	2,1		45		16,5	b	79,4	a				
	150	20	a	10,9	a	57	ab	2,1	a	43	a	17,3	ab	77,9	b				
	75	20		11,0		60	a	2,2		43		17,7	a	76,1	c				
Essai	Choix variétal	Etages		Longueur		Nombre		Poids _(g)		IR _(%)		Humidité		Poids _(kg/ha)		PMG _(g)		Rendement	
		grains/épi		épi _(cm)		grains/épi		grains/épi				(%)		spécifique				(t/ha)	
E1	KWS Extase	19	ab	10,3	b	56		2,5	a	48	a	14,0	c	78,3	b	48,3		10,6	a
	Gedser	18	b	9,5	c	55	a	2,3	b	47	a	17,0	a	75,4	c	47,4	a	9,7	b
	Moschus	19	a	10,9	a	57		2,3	b	44	b	15,2	b	79,8	a	47,2		10,7	a
E2	KWS Extase	20		11,1	a	54	b	2,2		48	a	14,5	c	79,6	b				
	Gedser	19	a	10,1	b	58	a	2,2	a	44	b	19,5	a	74,9	c				
	Moschus	20		11,4	a	54	b	2,0		40	c	16,9	b	80,5	a				
E2*	KWS Extase															48,3		14,4	a
	400 Gedser															46,9	a	13,7	b
	Moschus															47,3		13,4	b
	KWS Extase															47,4		14,3	a
	300 Gedser															47,6	a	13,7	b
	Moschus															46,9		12,9	c
	KWS Extase															45,4		13,1	a
	150 Gedser															48,8	a	13,2	a
	Moschus															46,5		11,5	b
	KWS Extase															43,5	b	11,1	b
	75 Gedser															48,2	a	11,0	a
	Moschus															45,0	b	10,2	b

7.2 Densité de plantes, de talles et d'épis

Les densités de plantes, de talles et d'épis sont significativement différentes selon les stades phénologiques (Tableau 12). Aucune interaction n'est présente pour la densité de plantes, de talles et d'épis entre les facteurs densité de semis et variété. Des différences très hautement significatives des moyennes sont constatées selon la densité de semis. Quant au facteur variété, des différences de moyennes sont toujours significatives pour les deux essais, cependant, le degré de significativité varie selon les stades (Tableau 13).

a. Densité de plantes

La densité de plantes augmente avec la densité de semis. Au stade de développement des feuilles, les moyennes pour la densité de plante varient selon l'essai de 307 à 313 plantes/m² et de 56 à 57 plantes/m² respectivement pour une densité de semis de 400 grains/m² et de 75 grains/m² (Tableau 14). En sortie d'hiver, aux densités de semis 300 et 400 gr/m², les densités de plantes atteignent l'objectif de 150 à 200 plantes/m² voir le dépassent (Livre Blanc Céréales, 2023b) (Figure 19). Concernant le choix variétal, au stade redressement, Gedser est la variété avec la densité de plantes la plus élevée dans l'E1 et également dans l'E2 avec KWS Extase (Tableau 15).

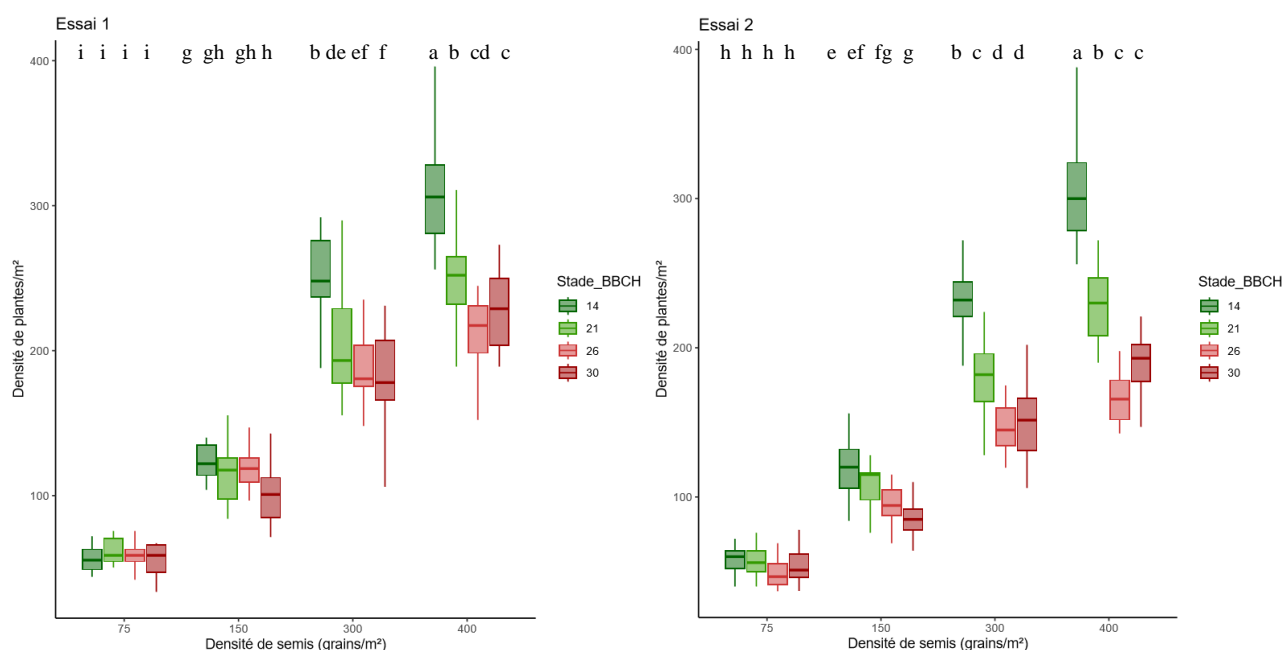


Figure 19 : Boxplots de la densité de plantes en fonction de la densité de semis selon les stades ainsi que les groupes des tests SNK.

Tableau 17 : Moyennes des taux de levée et des pertes de plantes (%) ainsi que les groupes des tests SNK selon les facteurs étudiés (Equation 3).

Essai	Source de variation	Taux de levée	Perte hivernale	Perte printanière	Perte total ₂₁₄₋₃₀
E1	400	78	20 a	7	27 a
	300	82 a	15 ab	10 a	25 a
	150	82	5 b	12	19 b
	75	75	0 c	9	0,2 c
	KWS Extase	73 b	6	12	19
	Gedser	84 a	2 a	13 a	16 a
	Moschus	80 a	13	3	19
E2	400	77	25 a	16	37 a
	300	77 a	22 a	11 a	32 a
	150	80	7 b	19	25 a
	75	76	0 b	4	5 b
	KWS Extase	78 a	13	8	21
	Gedser	82 a	14 a	16 a	28 a
	Moschus	72 b	12	14	26

Le Tableau 17 ne présente aucune interaction entre la densité de semis et les variétés pour les variables (Annexe 16). Les taux de levée moyens sont similaires pour toutes les densités de semis (Tableau 17). En effet, à ce stade de développement, les phénomènes de concurrence de graines ou de microclimats sont trop faiblement prononcés pour affecter différemment les graines selon leur densité de semis. Une autre étude souligne également la différence non significative de la densité de semis sur les taux de levée, confirmant ainsi la proportionnalité du nombre de plantes/m² levées avec la densité de semis (Chambres d'agriculture, 2017).

Concernant les variétés, Gedser se démarque par des taux de levées supérieurs (Tableau 14 et Annexe 16). Cela est certainement dû à une faculté germinative plus élevée des graines de la variété. En outre, la faculté germinative minimale autorisée pour les semences certifiées en blé est de 85%, mais les semences commercialisées germent en général entre 90-95% (Arvalis, 2022; Gate, 1995 ; SPW, 2006). En plus des pertes dues à la faculté germinative s'ajoutent d'autres pertes provoquées par de nombreux facteurs agropédoclimatiques. En bonnes conditions de semis, l'ensemble des pertes varie de 10 à 30% (Chambres d'Agriculture, 2017; Gate, 1995 ; Perspectives agricoles, 2013b).

Par ailleurs, les pertes hivernales augmentent avec l'accroissement de la densité de semis jusqu'à 20-25% pour une densité de semis de 400 gr/m² (Tableau 17 et Annexe 16). En effet, à des densités de semis élevées, la concurrence entre les plantes est plus forte, notamment pour la lumière. Cette concurrence est également encouragée lorsque les conditions climatiques sont favorables à la croissance telles qu'observées cet automne et cet hiver durant la saison culturale (partie 5.3) (Perspectives agricoles, 2013b). De plus, à de faibles densités de semis, le nombre de plantes est réduit, laissant parfois des vides dans le peuplement. Par conséquent, ces faibles densités peuvent également créer un environnement plus sensible aux variations de température, notamment par une capacité de rétention de chaleur plus faible. L'hiver étant relativement doux, les différences de pertes hivernales sont majoritairement la conséquence de la concurrence des plantes plus importantes aux densités de semis élevées. Finalement, l'ensemble des pertes varie de 0 à 37% selon la densité de semis.

Enfin, des différences entre les essais sur les pertes de plantes sont marquées. L'E2 a des moyennes de pertes légèrement supérieures à l'E1 (Tableau 17). Ce constat est probablement dû aux différences entre les deux essais, comme la date de semis légèrement plus tardive pour l'E2. En effet, au plus la date de semis est tardive, au plus la perte de plantes est favorisée (Allard, 2017 ; Arvalis, 2013; Livre Blanc Céréales, 2023b).

b. Densité de talles

Le nombre de talles augmente significativement avec l'augmentation de la densité de semis (Tableau 14 et Figure 20). Au stade dernière feuille, le nombre de talles moyen varie selon l'essai de 582 à 627 talles/m² et de 335 à 369 talles/m² respectivement pour une densité de semis de 400 et 75 gr/m².

Concernant les variétés, au stade dernière feuille, KWS Extase et Gedser présentent les moyennes les plus élevées variant de 488 à 529 talles/m² et Moschus montre des moyennes plus faibles variant de 451 à 477 talles/m² (Tableau 15).

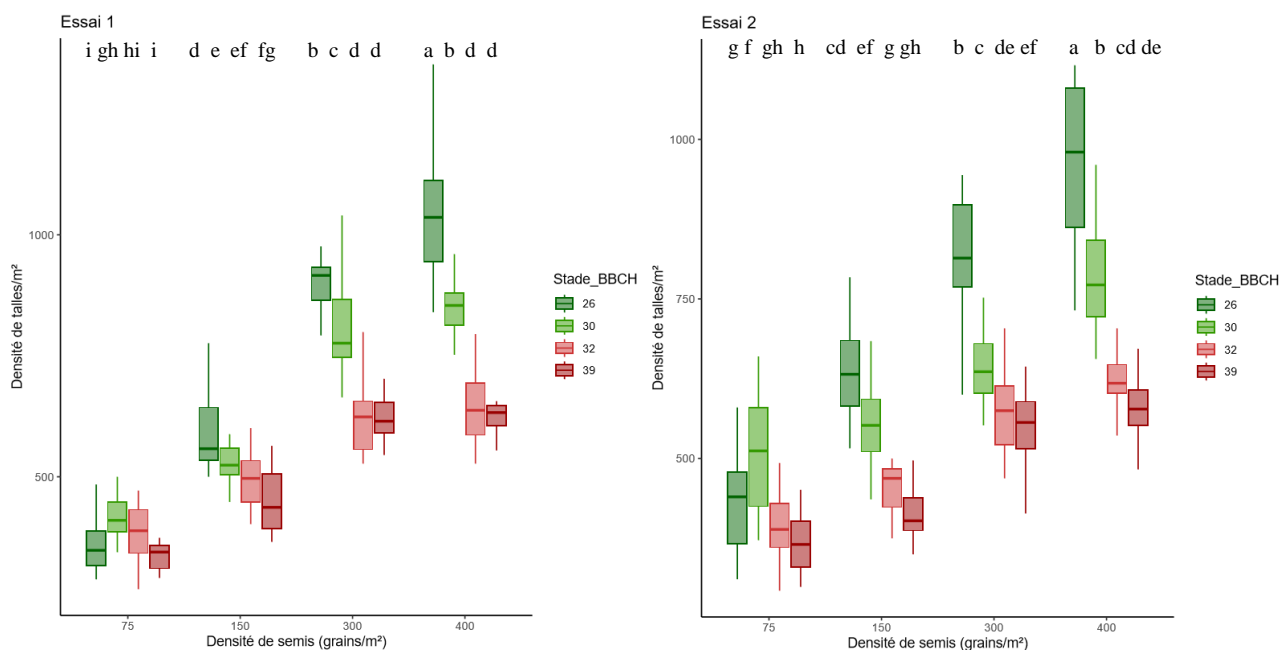


Figure 20 : Boxplots de la densité de talles en fonction de la densité de semis selon les stades ainsi que les groupes des tests SNK.

Tableau 18 : Moyennes et groupes des tests SNK pour le nombre de talles par plante et la régression de talles (Equation 3).

Essai	Source de variation	Talles _{Z30} /plante _{Z30}		Talles _{Z39} /plante _{Z30}		Régression de talles (%)	
E1	400	3	c	2	d	38	a
	300	4	c	3	c	30	b
	150	5	b	4	b	24	b
	75	7	a	6	a	4	c
	KWS Extase	6	a	5	a	20	
	Gedser	5	b	4	b	28	a
	Moschus	5	b	4	b	25	
E2	400	4	c	3	c	39	a
	300	4	c	3	c	34	a
	150	6	b	4	b	33	a
	75	9	a	7	a	14	b
	KWS Extase	6		4		32	
	Gedser	5	a	4	a	31	a
	Moschus	6		4		27	

De plus, la régression de talles augmente significativement avec l'augmentation de la densité de semis variant de 4 à 39% (Tableau 18 et Annexe 16). Wood et al. (2003) soulignent également cet effet de l'accroissement du taux de mortalité des talles avec l'augmentation de la densité de semis. En effet, la densité de talles élevée entraîne la concurrence entre celles-ci et notamment pour les plus jeunes talles en développement ne disposant plus assez de lumière. Les températures élevées favorisent le développement des talles plus âgées au détriment des plus jeunes. Ces facteurs entraînent la régression de talles qui est un phénomène rapide d'à peine quelques jours. Le taux de régression augmente proportionnellement avec l'augmentation de la température. Il est de l'ordre de 20% lorsque les températures moyennes sont d'environ 11-12°C trois semaines après le stade épi 1 cm. A chaque degré supplémentaire à ce seuil, le taux de régression augmente de 10% (Gate, 1995). Lors de cette étude, la température moyenne observée, pour les

semaines suivant le stade montaison, était de l'ordre de 13°C. Il peut être déduit que le taux de régression est autour de 30%, confirmé dans l'étude aux densités de semis élevées.

En outre, des différences significatives des moyennes du nombre de talles/plante sont constatées selon la densité de semis (Tableau 18 et Annexe 16). L'expression du potentiel de tallage, soit la capacité de tallage, mesuré par le nombre de talles/plante, diminue avec l'augmentation de la densité de semis. Au stade dernière feuille, le nombre de talles/plantes est de 6 à 7 et de 2 à 3 talles/plante respectivement pour une densité de semis de 75 et 400 gr/m² selon l'essai. En effet, à de faibles densités de semis, les plantes compensent leur faible densité par un tallage plus fort (Bastos et al., 2020 ; Chambres d'agriculture, 2017 ; Valério et al., 2013). La plante est capable d'évaluer la concurrence autour d'elle grâce à la perception du signal lumineux rouge et par conséquent, de moduler son tallage. Les variations des taux de régression ainsi que le nombre de talles/plante observé lors de l'étude sont les conséquences de cette modulation de tallage. La régression est donc plus forte lorsque les densités de semis sont élevées (Arvalis, 2022; Baccar, 2011).

Pour le facteur variété, aucune différence significative n'est observée dans l'E2. Au contraire, dans l'E1, KWS Extase, caractérisée par un potentiel de tallage plus élevé, présente un nombre de talles/plante plus important de 5, contrairement à Gedser et Moschus avec 4 talles/plantes (Tableau 18 et Annexe 16).

Enfin, des différences entre les deux essais sont observables. À de faibles densités de semis au stade 30, le nombre de talles/plante est plus élevé pour l'E2 que l'E1. En effet, cette différence est due à un tallage plus fort à de faibles densités de semis dans l'E2, étant donné les plus faibles densités de plantes dans l'E2 que dans l'E1 comme expliqué précédemment. Les taux de régressions de talles légèrement plus élevés dans l'E2 comparé à l'E1 peuvent être justifiés par cette production de talles/plante plus excessive que l'E2 mais également par l'âge du tallage (Allard, 2017; Darwinkel et al., 1977).

c. Densité d'épis

La densité d'épis augmente significativement avec la densité de semis (Tableau 14 et Figure 21). Au stade 89, selon les essais, les moyennes varient de 455 à 496 épis/m² et de 326 à 350 épis/m² respectivement à une densité de semis de 400 et 75 gr/m². L'E2 présente des densités d'épis de même ordre à une densité de semis de 300 et 400 gr/m² (Tableau 14). Par ailleurs, l'E1 présente des densités d'épis supérieures à l'E2.

En effet, l'accroissement de la densité de semis augmente le nombre d'épis/m² (Baloch et al., 2010; Holman et al., 2021; Ma et al., 2018; Schaafsma et al., 2005). La densité d'épis recherchée doit être modérée et située entre 400-500 épis/m² afin que la culture développe pleinement son potentiel de rendement et également afin d'éviter les phénomènes de concurrence entre les plantes pour les ressources (Livre Blanc Céréales, 2023). Lors de cette étude, les densités d'épis observées pour les densités de semis 150, 300 et 400 gr/m² permettent d'atteindre cet intervalle.

Concernant les variétés, KWS Extase et Gedser présentent tous deux des densités similaires variant de 411 à 443 épis/m² selon l'essai au stade 89. A contrario, la variété Moschus présente toujours une densité d'épis plus faible variant de 326 à 385 épis/m² selon l'essai (Tableau 15). En effet, dans cette étude, les différences de densité d'épis entre les variétés sont principalement les conséquences de différences initiales de densités de talles.

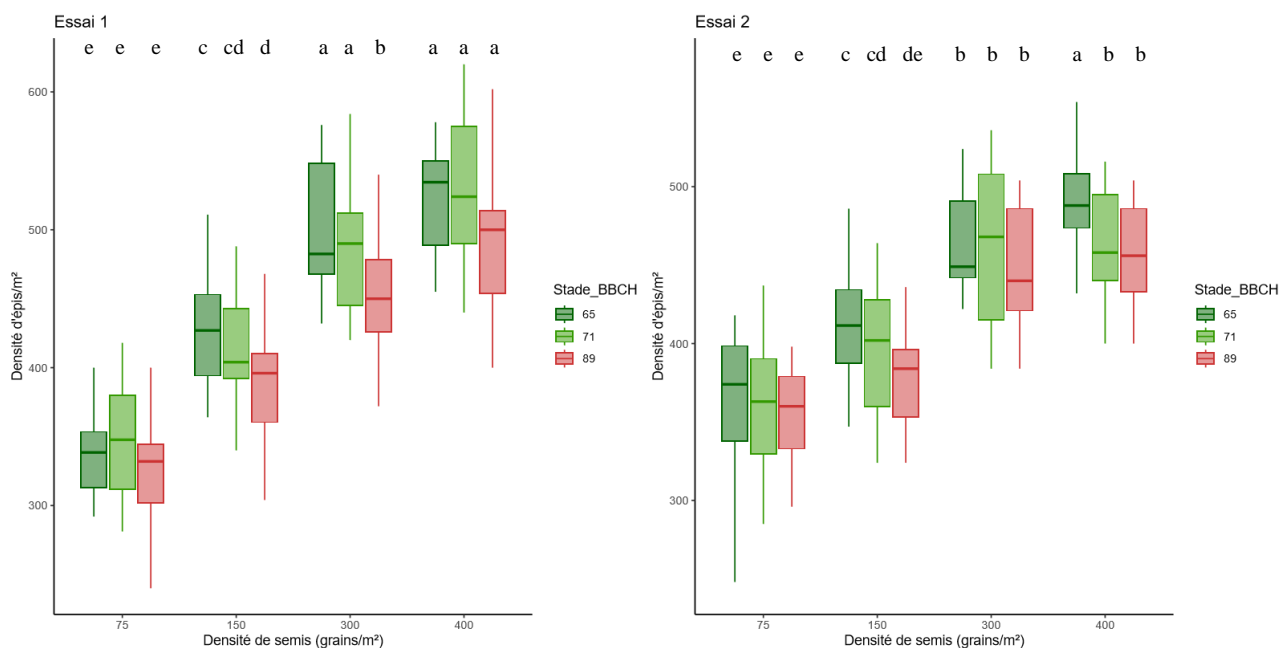


Figure 21 : Boxplots de la densité d'épis selon la densité de semis en fonction des stades ainsi que les groupes des tests SNK.

Tableau 19 : Moyennes et groupes des tests SNK pour le pourcentage de talles fertiles, le nombre d'épis par plante ainsi que la perte d'épis (Equation 3).

Essai	Source de variation	% Talles fertiles _{Z65/39}		Epis _{Z89} /plante _{Z30}		% Perte d'épis _{Z65-89}
E1	400	80	c	2	c	5
	300	74	c	2	c	9
	150	88	b	4	b	8
	75	98	a	6	a	3
	KWS Extase	84		4	a	8
	Gedser	86	a	3	ab	3
	Moschus	85		3	b	7
E2	400	80	b	2	c	7
	300	84	b	2	c	3
	150	92	a	4	b	9
	75	96	a	6	a	2
	KWS Extase	89		4		6
	Gedser	87	a	4	a	6
	Moschus	88		4		3

Le pourcentage de talles fertiles est significativement différent selon la densité de semis (Annexe 16 et Tableau 19). En effet, Kondic et al. (2017) illustrent également la chute du nombre de talles fertiles avec l'accroissement de la densité de semis. Le nombre de talles qui n'aboutissent pas en épis est dû à la compétition entre les plantes pour les ressources telles que la lumière, l'eau, les nutriments, l'effet de densité, etc. Ces talles peuvent également avoir régressé entre le stade dernière feuille et l'épiaison, provoquée par la concurrence des talles ou divers stress environnementaux, plus marqués à des densités de semis élevées. De plus, le nombre d'épis/plante est également influencé par la densité de semis et tend à être plus élevé à de faible densité de semis pour les mêmes raisons que le nombre de talles/plante est influencé par la densité de semis. Tout comme les nombres de talles/plante, KWS Extase présente un nombre d'épis/plante plus élevé que Gedser et Moschus dans l'E1 (Tableau 17). Une faible perte d'épis significative est présente entre les

stades 65 et 89, cependant non significative entre les facteurs (Tableau 12). Cette perte est peut-être causée par divers facteurs tels que la sécheresse du mois de juin.

7.3 Couverture foliaire

La couverture foliaire est influencée par plusieurs paramètres, mais principalement par le LAI ainsi que l'architecture de la plante, le port foliaire, la densité de talles et l'inclinaison des axes foliaires (Baccar, 2011; Nielsen et al., 2012 ; Vidal, 2017) (Annexe 18). Bien qu'il y ait une forte homogénéisation de la diversité des blés cultivés, une variété caractérisée par un potentiel de tallage élevé, un port plus étalé et une hauteur de plantes plus élevée contribue à un taux de couverture élevé (Vidal, 2017).

L'étude a souligné l'augmentation de la couverture foliaire avec l'accroissement de la densité de semis en conséquence de l'augmentation de la densité de talles (Baccar, 2011) (Tableau 13, 14 et Figure 22). Des différences variétales sont également marquées. En général, la densité de talles était plus élevée pour les variétés KWS Extase et Gedser tout comme leur couverture foliaire. L'Annexe 19 décrit plus amplement les résultats de la couverture foliaire.

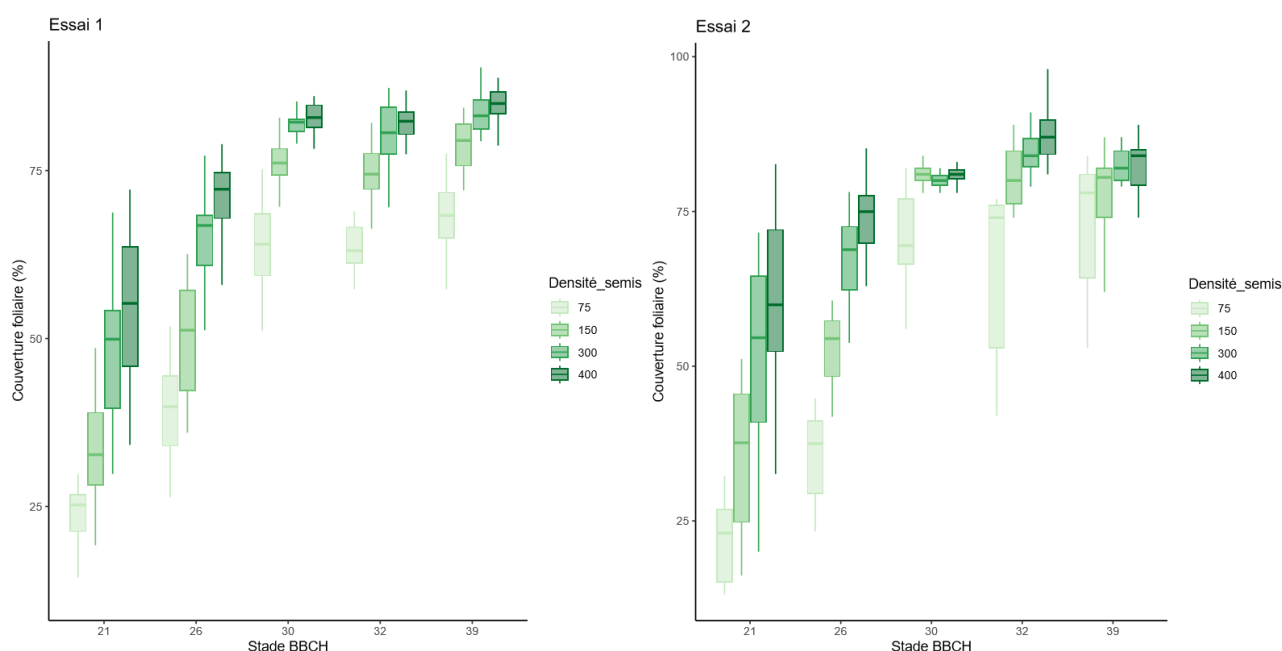


Figure 22 : Boxplots de la couverture foliaire en fonction des stades selon la densité de semis.

7.4 L'indice de surface foliaire (LAI)

Dans l'essai E1, le LAI augmente avec l'accroissement de la densité de semis, ce qui est également souligné par Zhang et al (2023) (Tableau 13 et 14). En effet, la surface foliaire par unité de sol augmente avec l'accroissement de la densité de semis en raison de la densité de plantes et de talles plus élevée (Baccar, 2011) (Figure 23). Concernant les variétés, KWS Extase et Gedser ont une moyenne de LAI similaire de 3,73 tandis que la variété Moschus a une moyenne de LAI plus faible de 2,92 (Tableau 15). La variation du LAI dans ce travail peut s'expliquer par une densité de plantes et de talles différentes pour chaque variété. L'Annexe 20 présente les détails des résultats du LAI.

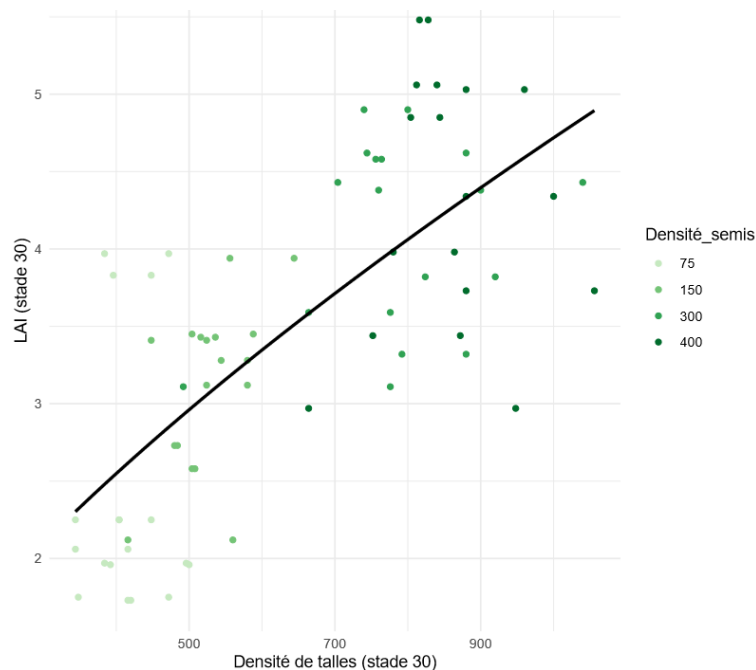


Figure 23 : Graphe de régression du LAI selon la densité de talles.

7.5 Sénescence foliaire

La dynamique de la sénescence des feuilles à travers les stades est synthétisée dans le tableau de l'Annexe 21. La sénescence des feuilles diffère fortement selon l'étage des feuilles (Tableau 12). Au plus la feuille est éloignée de l'épi, au plus sa sénescence est avancée. Ces différences entre les étages foliaires peuvent être expliquées par leur position sur la plante, leur âge et les conditions environnementales (Kouadio, 2012). En effet, l'intensité lumineuse est réduite dans les étages inférieurs puisque les feuilles des étages supérieurs captent la majorité du rayonnement. Elles ne sont plus photosynthétiquement fonctionnelles et sont également plus âgées. Elles tendent donc naturellement à disparaître puisque leur période de vie est limitée. Les facteurs environnementaux tels que le stress hydrique, la température ainsi que les maladies influencent également le taux de sénescence.

Les effets de la densité de semis sur le taux de sénescence sont divergents d'un stade à l'autre. Au stade 71, la sénescence des feuilles augmente avec l'accroissement de la densité de semis. Au contraire, à partir du stade 75 jusqu'à la récolte, celle-ci diminue avec l'augmentation de la densité de semis. La variété Gedser souligne des taux de sénescence inférieurs en raison de sa précocité tardive à la maturité. Les détails des résultats sont présentés dans l'Annexe 21.

7.6 Hauteur du couvert

La hauteur du couvert s'accroît au fur et à mesure des stades de développement (Tableau 12). Le facteur densité de semis n'a pas d'influence sur la hauteur après la montaison pour l'E1. Au contraire, l'E2 souligne l'augmentation de la hauteur avec l'accroissement de la densité de semis (Tableau 13 et 14). La concurrence entre les talles à des densités de semis élevées favorise l'élongation des entre-nœuds (Bourak, 2018; Ma et al., 2018).

Quant aux différences entre les variétés, les moyennes varient selon les stades et les tendances divergent, notamment en raison des caractéristiques variétales et leurs réponses aux régulateurs de croissance. Moschus

présente des hauteurs plus élevées en fin de cycle comparé à KWS Extase et Gedser (Tableau 15). L'Annexe 22 développe plus amplement cette partie.

7.7 Étages de grains par épi

Des différences significatives pour le nombre d'étages de grains/épi sont uniquement présentes dans l'E1 pour les deux facteurs étudiés (Tableau 13). En effet, à de faibles densités de semis, les moyennes du nombre d'étages de grains/épi sont de 19 étages contrairement aux densités de semis plus élevées où les moyennes sont de 18 étages (Tableau 16 et Figure 24). Moschus et Gedser ont respectivement en moyenne le nombre d'étages le plus élevé et le plus faible.

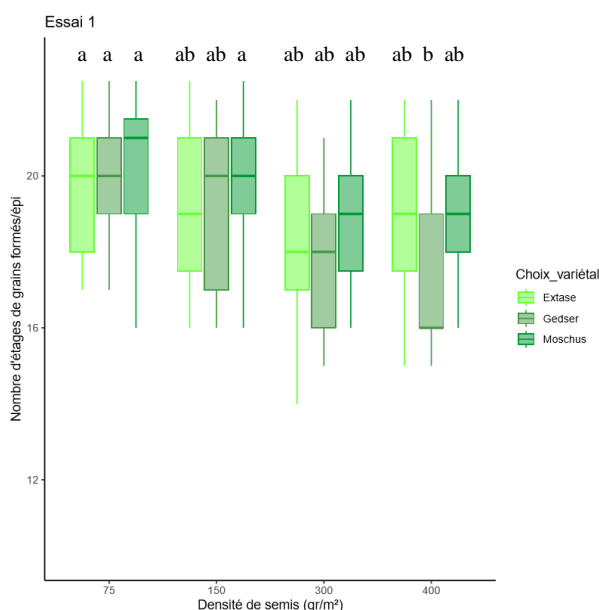


Figure 24 : Boxplot du nombre d'étages de grains par épi selon la densité de semis et des variétés ainsi que les groupes du test SNK.

7.8 Longueur de l'épi

Dans l'E1, la moyenne de la longueur de l'épi augmente avec la diminution de la densité de semis, contrairement à l'E2 où la densité de semis n'a pas d'effet (Tableau 13 et 16). En effet, des diminutions de la longueur d'épi sont remarquées avec l'augmentation de la densité de semis, mais des différences non significatives sont également constatées (Baloch et al., 2010; Naveed et al., 2014; Farooq et al., 2016). Des différences de moyennes sont observables selon les variétés (Figure 25). En effet, Moschus et Gedser présentent des longueurs d'épis respectivement supérieures (10,9-11,4 cm) et inférieures (9,5-10,1 cm). En outre, la Figure 26 met en évidence le lien entre le nombre d'étages de grains/épi et la longueur de l'épi.

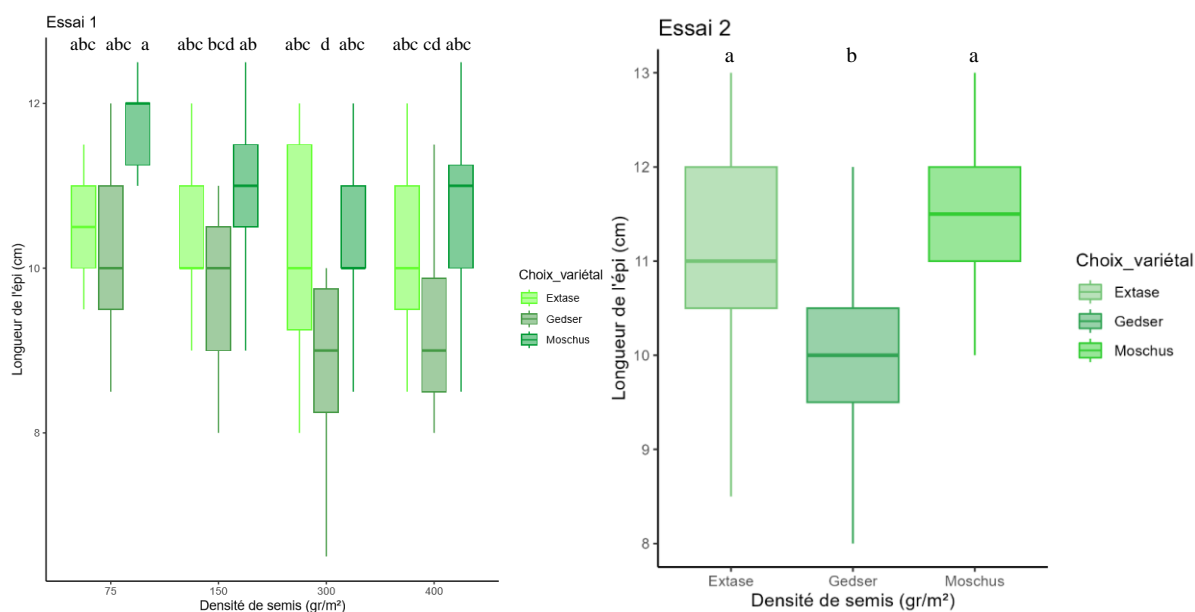


Figure 25 : Boxplots de la longueur de l'épi selon la densité de semis et/ou la variété ainsi que les groupes des tests SNK.

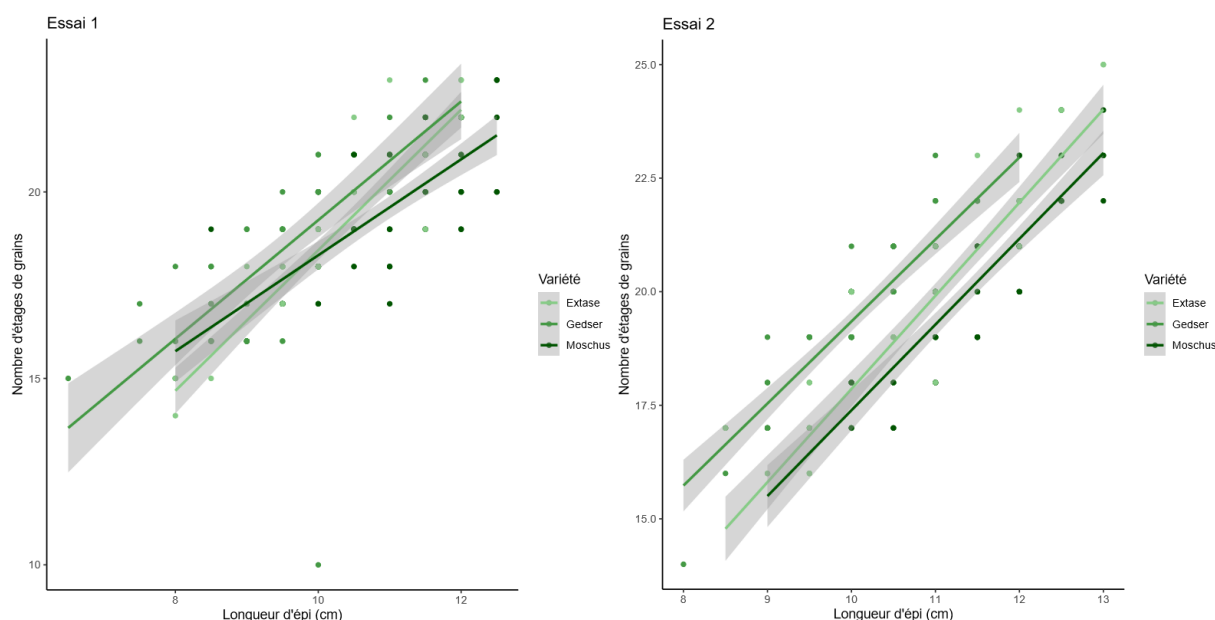


Figure 26 : Graphes de régression du nombre d'étages de grains/épi en fonction de la longueur de l'épi selon la variété.

7.9 Poids et nombre de grains par épi

Le poids et le nombre de grains/épi sont significativement différents selon le facteur densité de semis dans l'E1. En outre, le poids des grains/épi est différent pour les variétés dans l'E1. L'E2 présente uniquement des différences significatives pour le nombre de grains/épi pour les deux facteurs étudiés (Tableau 13).

En effet, le nombre de grains/épi ou encore la fertilité de l'épi diminuent avec l'augmentation de la densité de semis, également souligné par Matsuyama et al. (2020) (Tableau 16). Cette diminution du nombre de grains/épi est liée aux interactions entre les composantes, notamment avec l'accroissement de la densité

d'épis (Slafer et al., 2014). En outre, étant donné le faible effet de la densité de semis sur le PMG (développé ultérieurement), les poids de grains/épi suivent majoritairement la même tendance que le nombre de grains/épi (Figure 27). Concernant les variétés, KWS Extase possède des grains plus lourds que les autres variétés dans l'E1. Quant à l'E2, le nombre de grains/épi est plus important pour Gedser. Cependant, ils sont plus légers que les autres variétés.

De plus, en connaissant le nombre d'étages de grains/épi et le nombre de grains/épi, il est possible d'obtenir le nombre moyen de grains/épillet. Celui-ci est significativement différent selon la densité de semis (Annexe 16). En effet, à une densité de semis de 75 gr/m², le nombre moyen de grains/épillet est de 3 contrairement à 2 pour les densités 150, 300 et 400 gr/m². L'augmentation du nombre moyen de grains/épillet est due à la diminution de la densité d'épis, également soulignée par Matsuyama et al. (2020). Dans l'E2, une différence entre les variétés est constatée. Moschus est la variété présentant en moyenne 3 grains/épillet contrairement à 2 pour KWS Extase et Gedser.

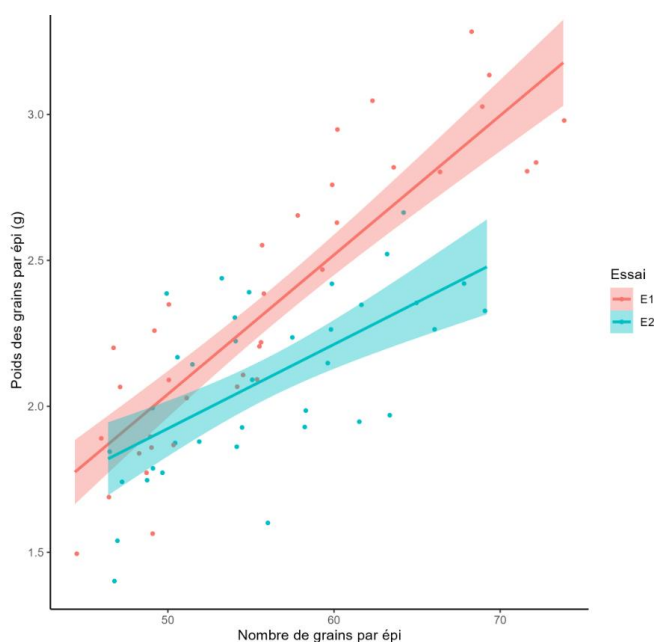


Figure 27 : Graphe de régression du poids des grains/épi en fonction du nombre de grains/épi selon l'essai.

7.10 Indice de récolte et biomasses

Des différences significatives de l'IR sont uniquement observées pour le facteur variété dans les deux essais (Tableau 13). KWS Extase et Moschus présentent respectivement l'indice le plus élevé (48 %) et le plus faible (40%) résultants et coïncidents aux différences de hauteur de paille entre les variétés (Miralles et al., 2007) (Tableau 16 et Figure 28).

À contrario, la biomasse de la paille est significativement différente selon la densité de semis dans l'E1 (Annexe 16). Une biomasse de paille supérieure est constatée à faible densité de semis. Cette biomasse supérieure influence le remplissage des grains par un transfert d'assimilats stockés plus élevé et traduisant l'augmentation du PMG dans l'E1 (Bahlouli et al., 2008). L'Annexe 23 explique plus amplement les résultats.

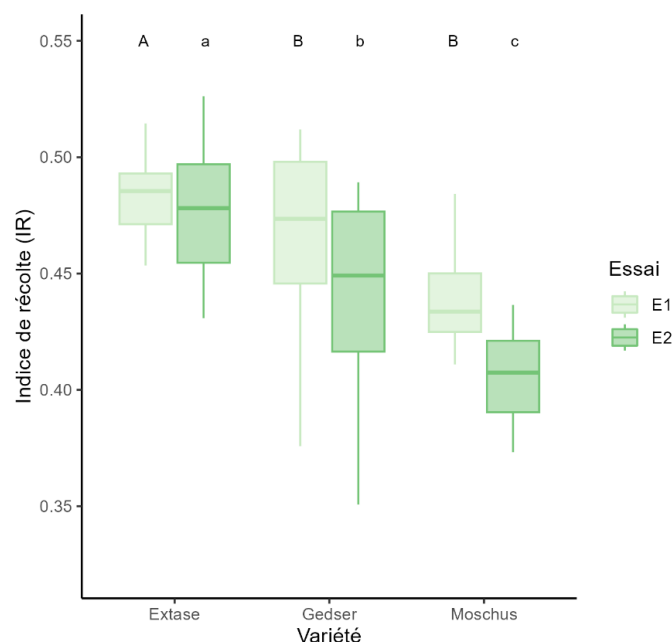


Figure 28 : Indice de récolte (de 0 à 1) et groupes du test SNK en fonction des variétés selon l'essai.

7.11 Mesures post récolte

L'Annexe 24 présente en détail les mesures post récolte pour le PMG, l'humidité et le poids spécifique. En résumé, le poids spécifique augmente avec l'accroissement de la densité de semis contrairement à l'humidité qui diminue (Tableau 16). En effet, Gooding et al. (2002) illustrent que la maturité, liée également à la relation inversement proportionnelle entre le poids spécifique et l'humidité, est atteinte plus rapidement avec l'augmentation de la densité de semis.

Quant au PMG, les résultats diffèrent d'un essai à l'autre. Dans l'E1, celui-ci augmente avec la diminution de la densité de semis, soulignant une remobilisation des ressources plus élevée à faibles densités de semis (Slafer et al., 2014). Dans l'E2, le PMG présente une interaction entre le facteur densité de semis et variété. Il tend à augmenter avec l'accroissement de la densité de semis, excepté pour Gedser. Quant aux variétés, elles présentent toutes des valeurs similaires mis à part dans l'E2 où la variété Gedser a le PMG le plus élevé à une densité de semis de 75 gr/m² (Tableau 16).

7.12 Rendement

Aucune interaction n'est présente entre la densité de semis et les variétés pour le rendement dans l'E1, contrairement à l'E2 (Tableau 13). Pour les deux essais, le rendement augmente avec l'accroissement de la densité de semis de 75 gr/m² à 400 gr/m² respectivement de 31% et 20% dans l'E1 et l'E2. KWS Extase est la variété qui a généré les plus gros rendements dans les deux essais (Tableau 16 et Figure 29).

En outre, l'E2 présente une interaction entre les deux facteurs (Tableau 13). Aux densités de semis élevées, KWS Extase présente des rendements supérieurs aux autres variétés. Au contraire, à de faibles densités de semis, Gedser a les meilleurs rendements. Etant donné les densités d'épis similaires entre ces deux variétés, cette interaction est fortement en lien à l'interaction du PMG (Tableau 20). Les rendements supérieurs de Gedser à faibles densités de semis sont la conséquence de son PMG supérieur à ces densités.

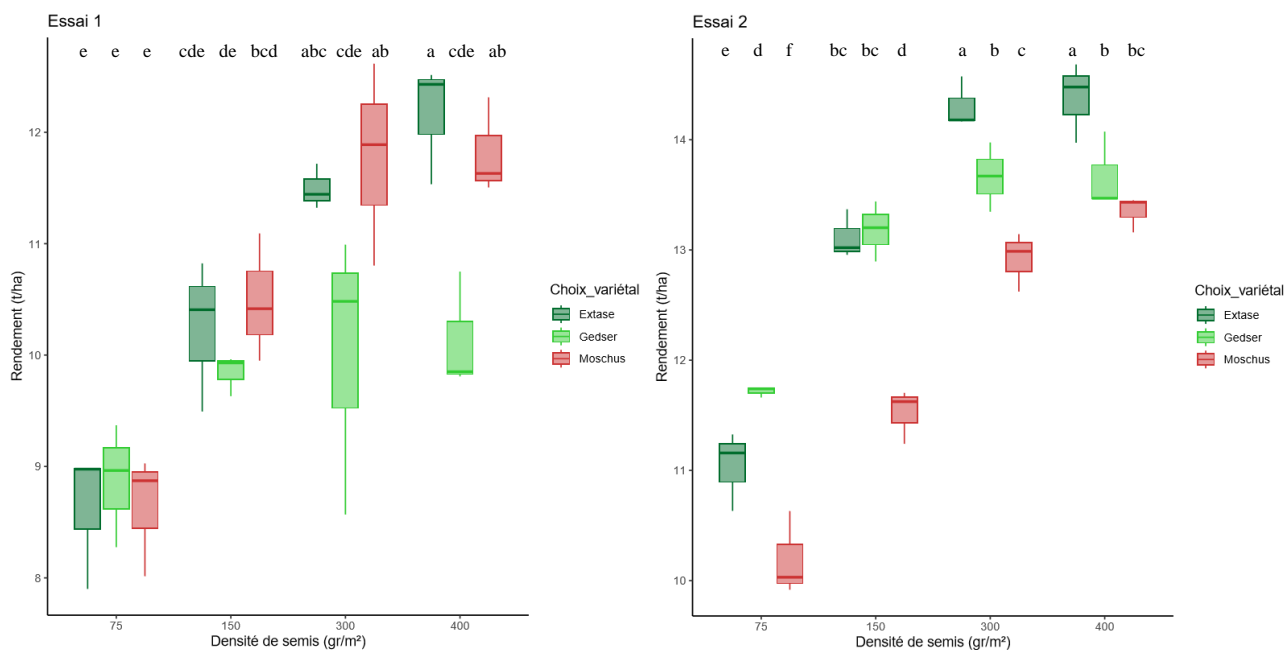


Figure 29 : Boxplots du rendement selon la densité de semis et du choix variétal ainsi que les groupes des tests SNK.

Tableau 20 : Rendement et ses composantes selon les facteurs densités de semis et variété ainsi que leurs interactions (*Légende : Nb = nombre*).

Essai	Source de variation	Rendement _{t/ha}	Nb grains/m²	Nb épis/m²	Nb grains/épi	PMG _(g)
E1	400	11,4 a	21750 a	496 a	51 c	45,94 ab
	300	11,1 a	20430 b	457 b	49 c	47,41 ab
	150	10,2 b	18412 c	391 c	57 b	48,57 a
	75	8,7 c	15889 d	326 d	66 a	48,68 a
	KWS Extase	10,6 a	19044	420 a	56	48,34
	Gedser	9,7 b	18490 a	443 a	55 a	47,38 a
	Moschus	10,7 a	19827	326 b	57	47,23
Essai	Source de variation	Rendement _{t/ha}	Nb grains/m²	Nb épis/m²	Nb grains/épi	PMG _(g)
E2	400		29032 a	455 a	51 c	
	300		28817 a	445 a	53 bc	
	150		26932 b	377 b	57 ab	
	75		24098 c	350 c	60 a	
	KWS Extase		28573 a	426 a	54 b	
	Gedser		27292 b	411 a	58 a	
	Moschus		25793 c	383 b	54 b	
	400	14,4 a				48,30
	Gedser	13,7 b				46,87 a
	Moschus	13,4 b				47,30
	300	14,3 a				47,43
	Gedser	13,7 b				47,63 a
	Moschus	12,9 c				46,93
	150	13,1 a				45,43
	Gedser	13,2 a				48,80 a
	Moschus	11,5 b				46,50
	75	11,0 b				43,53 b
	Gedser	11,7 a				48,23 a
	Moschus	10,2 c				45,03 b

Tableau 21 : Comparaison entre le rendement théorique et le rendement obtenu (Equation 3).

Essai	Source de variation	Rendement théorique _(t/ha)	Rendement _{t/ha}
E1	400	11,6	11,4 a
	300	11,0	11,1 a
	150	10,7 ^a	10,2 b
	75	10,5	8,7 c
	KWS Extase	11,2	10,6 a
	Gedser	11,4 a	9,7 b
	Moschus	10,3	10,7 a
Essai	Source de variation	Rendement théorique _(t/ha)	Rendement _{t/ha}
E2	400	11,2 a	13,8 a
	300	11,2 a	13,6 a
	150	10,3 ab	12,6 b
	75	9,7 b	11,0 c
	KWS Extase	10,7 a	13,2 a
	Gedser	11,5 a	13,1 a
	Moschus	9,6 b	12,0 b

Comme introduit dans la partie 3.2.1 « Rendement et ses composantes », le rendement peut être décomposé et prédit à partir de ses composantes. En effet, le Tableau 20 illustre le rendement et ses composantes dont la densité de grains est obtenue à partir du rendement et du PMG. De plus, un rendement théorique a été calculé à partir de la densité d'épis, du nombre de grains/épi et du PMG en comparaison au rendement obtenu (abstraction de l'interaction dans l'E2) (Tableau 21).

Dans l'E1, les rendements théoriques sont très proches des rendements obtenus, mis à part à la densité de semis 75 gr/m² où l'écart entre les rendements est justifié par l'hétérogénéité intraparcellaire plus élevée. Cette proximité entre les rendements à la récolte et les rendements théoriques confirme ainsi la fiabilité des méthodes de mesures des composantes pour les deux essais. Cependant, dans l'E2, les différences entre les rendements théoriques et les rendements obtenus sont bien plus élevées. En outre, les différences entre les deux essais, traitant les mêmes modalités, sont entre 2-3 t/ha. En effet, bien que les composantes entre les deux essais soient assez similaires (mise à part la densité d'épis), il semble se dégager une possible surévaluation des rendements de l'E2.

Après réflexion, l'unique méthode qui diffère entre les deux essais est la méthode de pesage des grains récoltés. En effet, dans l'E1, récolté en interne par Jorion Philip-Seeds, le rendement est estimé par une pesée des sacs en post récolte sur une balance de précision. Au contraire, dans l'E2, récolté par Redebel S.A., la balance de précision est directement incluse sur la batteuse au moment de la récolte. Les différences de tares entre les balances pourraient expliquer les écarts de rendement entre les deux essais. La comparaison des rendements et des nombres de grains/m² entre les deux essais est à traiter avec précaution. Cependant, cela n'exclut pas le fait que les données récoltées pour chacun des essais sont fiables. En effet, quelle que soit la méthode, l'entièreté de chaque essai a été exécutée de la même manière. Cela a donc affecté les modalités avec la même amplitude de la source de variation.

L'optimisation de la densité de semis est déterminante dans l'élaboration du rendement. En effet, l'accroissement de celle-ci augmente le nombre d'épis. L'augmentation du nombre d'épis entraîne un phénomène compensatoire par une diminution du nombre de grains/épi et par des variations du PMG (Slafer et al., 2014). Bien qu'il y ait des compensations entre les composantes, celles-ci sont partielles. Le rendement augmente avec l'accroissement de la densité de semis, puis, il se stabilise autour des densités de semis de 300 et 400 gr/m² (Figure 30). En effet, le rendement finit par atteindre un plateau à partir de 400-450 épis/m². Comme explicité précédemment, la concurrence trop élevée entre les épis finit par stabiliser la densité d'épis et/ou par faire chuter des composantes. Lors de cette étude, la densité agronomique optimale était de 300 gr/m² (groupes du test SNK similaires pour le rendement à une densité de semis 300 et 400 gr/m²) (Tableau 21).

En outre, à partir de l'outil d'aide à la détermination de la densité de semis du Livre Blanc Céréales⁵, la densité de semis optimale recommandée a été évaluée entre 200 et 250 gr/m² pour les deux essais. Cette différence entre la densité de semis optimale recommandée et la densité de semis optimale obtenue tend à explorer plus amplement l'effet de la densité de semis. Afin de déterminer plus précisément la densité de semis agronomique optimale, il serait pertinent d'étudier des densités de semis intermédiaires entre 150 et 300 gr/m² telle que 250 gr/m². En effet, lorsqu'on reporte graphiquement la densité d'épis optimale obtenue (400-450 gr/m²), la densité de semis optimale s'avère proche de 250 gr/m² (Figure 30).

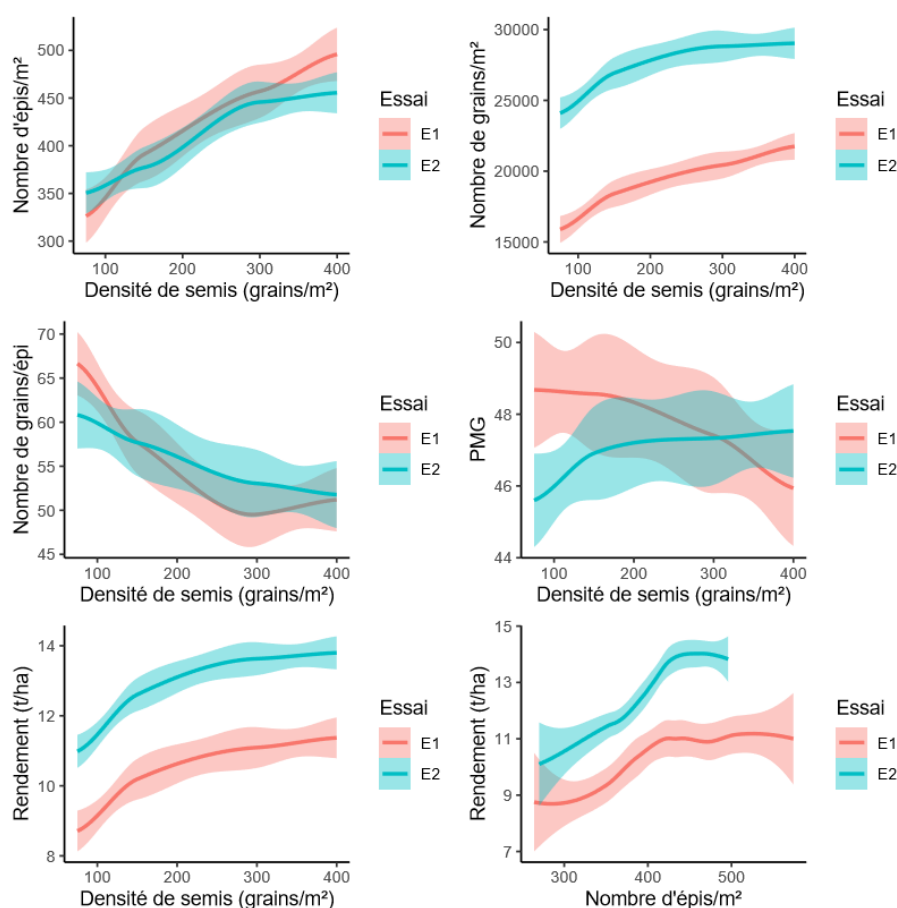


Figure 30 : Synthèse des graphiques des composantes de rendement selon la densité de semis et l'essai.

⁵ <https://livre-blanc-cereales.be/>

7.13 Relations entre les variables

La Figure 31 synthétise les corrélations entre les variables pour chaque essai et permet de mettre en évidence les relations de dépendance entre les variables.

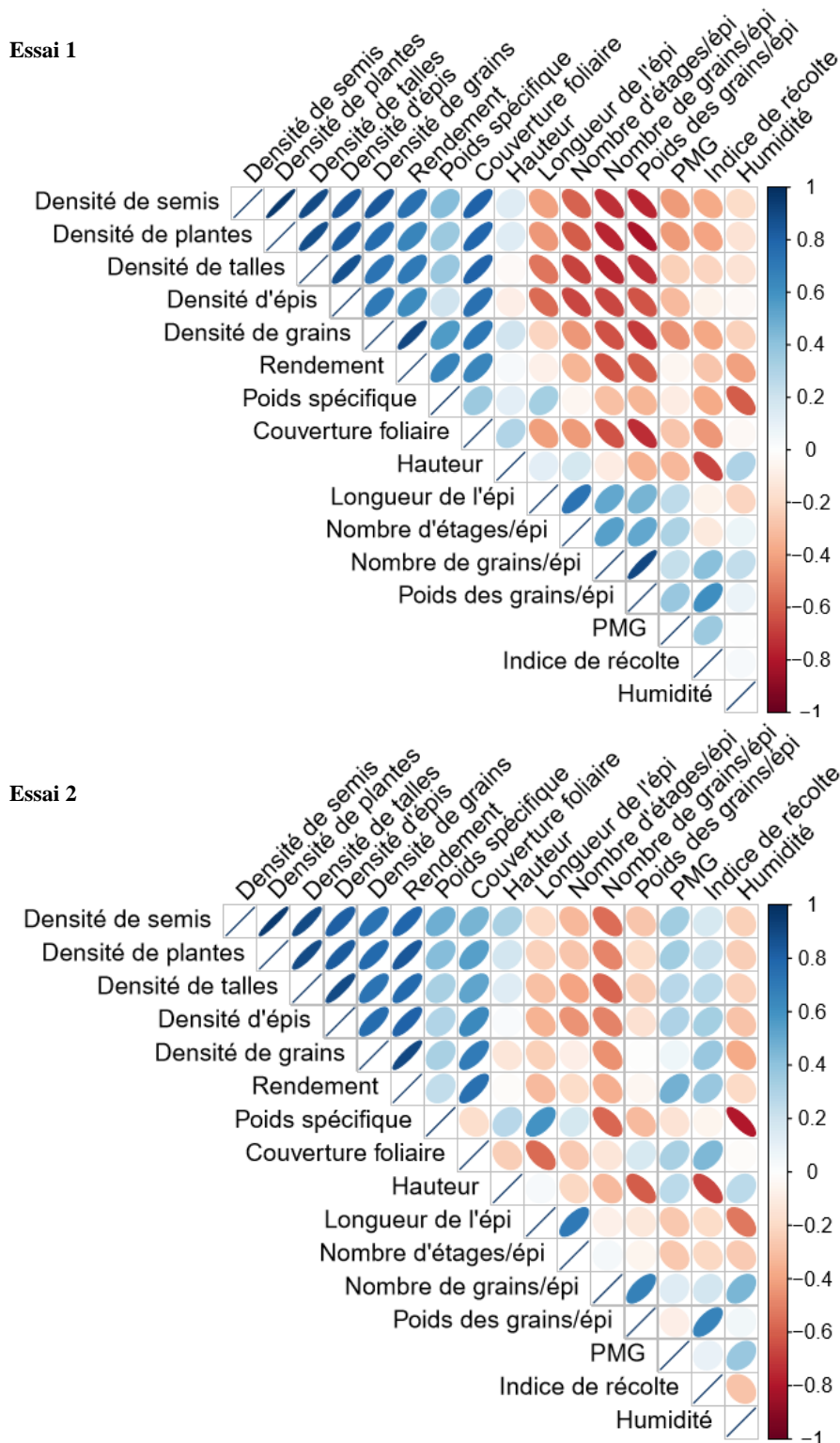


Figure 31 : Corrélogrammes des variables étudiées selon les essais.

(Légende : Les corrélations sont sous la forme d'ellipsoïde présentant ainsi la force et la direction des corrélations entre les variables. Une faible épaisseur de l'ellipsoïde traduit une corrélation et une covariance élevée ainsi qu'une faible dispersion des données entre les variables et inversement.)

Afin d'interpréter au mieux le rendement, il est essentiel de comprendre comment les composantes du rendement se développent selon la physiologie végétale et comment elles interagissent entre elles. Tout d'abord, le rendement est le résultat de l'interaction entre les forces sources, qui sont les organes produisant des ressources grâce à la photosynthèse, et les forces puits, qui sont les organes consommant les ressources via les allocations et la remobilisation nécessaire à la formation des grains. Avant la floraison (phase de détermination du rendement), les forces sources dominent les forces puits dans l'élaboration du rendement. Elles jouent un rôle dans la formation des talles et déterminent le nombre de fleurs par épi, in fine le nombre et la taille des grains par épi. Après la floraison (phase de réalisation du rendement), le nombre et la taille des grains, représentant l'ensemble des forces puits, dominent les forces sources pour le remplissage des grains. En résumé, le rendement est limité par les forces puits, car elles sont restreintes par les ressources disponibles des forces sources. Le poids des grains, ou encore PMG, est en partie le résultat de l'interaction entre les forces sources et les forces puits et dépendra de la remobilisation des ressources allouées à chacun des grains (Reynolds et al., 2022).

Des différences entre les essais dans les degrés de relation entre les variables sont mises en évidence grâce à la Figure 31 et l'Annexe 25. En général, les mêmes tendances entre les variables se présentent pour les deux essais. Cependant, l'E1 présente un nombre plus élevé de corrélations significatives que l'E2 (Annexe 25). En outre, les dépendances significatives entre certaines variables diffèrent d'un essai à l'autre tel qu'observé avec le PMG (Figure 31).

L'étude souligne les relations entre les variables à travers des corrélations positives et négatives. Les variables de densité de semis, de plantes, de talles, d'épis, de grains, le rendement, le poids spécifique, la couverture foliaire et le LAI sont toutes corrélées positivement entre elles dans les deux essais. De fortes corrélations positives et significatives sont plus marquées entre la densité de semis, de plantes, de talles, d'épis, la couverture foliaire et le LAI supérieures à 0,8. Par ailleurs, la densité de semis est corrélée entre 0,74 et 0,8 avec le rendement respectivement dans l'E1 et l'E2. D'autres groupes de variables sont également corrélés positivement et significativement entre elles tels que la longueur de l'épi, le nombre d'étages de grains/épi, le nombre de grains/épi et le poids des grains/épi (Figure 31 et Annexe 25).

En outre, il ne faut pas négliger les phénomènes compensatoires entre ces composantes (Slafer et al., 2014). Des corrélations significativement négatives sont également présentes pour la densité de semis, de plantes, de talles, d'épis, la couverture foliaire, le LAI croisé avec le nombre d'étages de grains/épi, le nombre de grains/épi et le poids des grains/épi. Des plus fortes corrélations significativement entre -0,6 à -0,8 se manifestent entre les variables de la densité de plantes, de talles, d'épis avec le nombre d'étages de grains/épi, le nombre de grains/épi et le poids des grains/épi. En outre, de fortes corrélations négatives sont également présentes entre la couverture foliaire et le LAI avec le nombre et le poids des grains/épi. Ou encore, le poids spécifique et l'humidité sont deux variables corrélées négativement. De plus, d'autres variables ne présentent pas de corrélations ou de faibles corrélations significatives telles que la hauteur du couvert avec les variables de densités ou encore le PMG avec la plupart des variables étudiées pour cette étude (Figure 30 et Annexe 25).

Ces différences dans les forces de réponses des corrélations entre les variables peuvent être mises en parallèle avec la hiérarchie de la plasticité des composantes du rendement. Sadras et al. (2012) présentent les plasticités différentes des composantes (le nombre de talles > le nombre d'inflorescences \approx le nombre de grains par inflorescence > le poids du grain) en réponse aux changements environnementaux, génétiques et culturels. En effet, lors de cette étude, le nombre de talles et le nombre d'inflorescences (densité de talles et d'épis) ont montré un mécanisme de régulation plus grossier à la source de variation (la densité de semis) à travers des corrélations élevées. Au contraire, le PMG (poids du grain) ayant un mécanisme de régulation faible face aux sources de variation a souligné une faible corrélation avec la densité de semis. Cependant,

l'augmentation du PMG avec la réduction de la densité de semis dans l'E1 a mis en évidence une plus grande remobilisation des assimilats, due à des biomasses de tiges plus élevées à faibles densités de semis.

Les effets de la densité de semis et les relations entre les variables peuvent être résumés comme suit : lorsque la densité de semis augmente, la densité de plantes, de talles, d'épis, de grains et le rendement augmentent également ainsi que le taux de perte hivernale des plantes et de régression des talles (Allard, 2017; Baloch et al., 2010; Matsuyama et al., 2020; Soomro et al., 2009). L'augmentation de la densité de talles entraîne une diminution du nombre de talles/plante, du pourcentage de talles fertiles, du nombre de grains/épillet, de la longueur de l'épi ainsi que le nombre d'étages de grains/épi. En conséquence à ce dernier, cela diminue le nombre de grains/épi et le poids des grains/épi en raison de la faible variation du PMG (Bastos et al., 2020; Holman et al., 2021; Kondic et al., 2017; Ma et al., 2018; Matsuyama et al., 2020; Slafer et al., 2014).

La couverture foliaire et le LAI augmentent avec l'augmentation de la densité de talles (Baccar, 2011 ; Vidal, 2017 ; Zhang et al., 2023). De plus, la croissance en hauteur du couvert avec l'augmentation de la densité de talles résulte de la concurrence entre les talles plus forte pour la lumière, favorisant l'élongation des entrenœuds (Bourak, 2018; Ma et al., 2018). En revanche, l'IR non significativement différent en fonction de la densité de semis résulte des effets similaires du facteur sur les poids des grains/épi et les biomasses des tiges, entraînant des ratios similaires entre les sources de variation.

L'augmentation de la densité d'épis entraîne une hausse du poids spécifique tout en réduisant l'humidité, ces derniers étant étroitement liés à la teneur en eau. Ces variations pourraient résulter d'un stress hydrique plus élevé lié aux densités de semis importantes (Valério et al., 2013). Toutefois, il est important de spécifier qu'aucune donnée n'a été récoltée dans les parcelles sur les facteurs environnementaux ou inférées des données météorologiques, tels que le déficit hydrique. Cette hypothèse est posée en se basant sur la bibliographie et en cohérence avec les données climatiques enregistrées depuis la station météo.

Enfin, le choix variétal a également souligné des effets significatifs sur la majorité des variables étudiées (Tableau 13). De nombreuses études illustrent les caractères variétaux sur le rendement, la densité de talles, le nombre de talles/plante, la densité d'épis, la densité de grains, le nombre de grains/épi, le PMG, la longueur de l'épi, l'IR, le pourcentage de germination, la hauteur, la morphologie de la plante, etc. (Matsuyama et al., 2020 ; Pathania et al., 2018; Rahman et al., 2010; Shahwani et al., 2014; Valério et al., 2013). Les corrélations illustrées précédemment coïncident pour la plupart d'entre elles aux effets sur les différentes variétés. En effet, KWS Extase et Gedser sont les deux variétés présentant une densité de plantes, de talles et d'épis, le LAI et l'IR plus élevé que Moschus. Quant à Moschus, la variété a présenté un nombre d'étages de grains, une longueur d'épi, une hauteur et un poids spécifique plus élevé ainsi qu'un rendement plus faible ou de même ordre aux autres variétés.

L'étude n'a souligné que trois interactions entre les deux facteurs étudiés, uniquement dans l'E2 pour le rendement, le PMG et la couverture foliaire. Cependant, d'autres études abordent de multiples interactions, notamment entre le potentiel de tallage des variétés et la densité de semis moins visible dans l'étude (partie 3.2.2 « Facteur génotypique »).

8. Contribution personnelle

Ce TFE débute d'un engagement personnel et d'une motivation à développer les compétences acquises durant ces cinq années d'études en milieu professionnel. À la suite d'un entretien chez Jorion Philip-Seeds et d'une proposition de suivi d'essais, le choix des variables étudiées a été décidé par moi-même et mon promoteur tout en respectant les contraintes établies par l'entreprise. Les relevés des données ont été réalisés par mes soins et à l'aide du personnel de l'entreprise lorsque la mesure demandait d'importants déploiements de matériels comme lors de la moisson (Figure 32).



Figure 32 : Réalisation d'une cotation (a) et récolte de l'E1 (b) (Colinet M., 2023).

Ce travail a demandé une grande adaptation liée au terrain. En effet, la première contrainte est les conditions climatiques lors des mesures. J'ai dû également faire preuve d'improvisation et d'adaptation pour la prise de certaines variables telles que le LAI. Bien qu'avec des protocoles correctement établis, la prise de mesure semble n'être qu'une formalité. Il a fallu faire preuve de bon sens dans certains cas et garder une vision à l'échelle parcellaire. De plus, de nombreuses mesures étaient fastidieuses à travers leur durée et leur méthode telles que les variables de densités et le LAI. En outre de la prise de données, ce mémoire est également basé sur de nombreuses analyses statistiques à l'aide du logiciel RStudio. La construction de certains codes a nécessité de nombreuses heures de travail et de manipulation des données.

Le choix de ce travail de fin d'études était également une prise de risque à cause de la date indéterminée de la récolte. L'objectif principal était d'obtenir la mesure la plus représentative de l'étude à savoir le rendement. Afin d'anticiper ce possible échec de mesure, j'ai donc réalisé un maximum de relevés au cours du développement de la culture afin de contrebalancer ce manque si la moisson n'était pas réalisée à temps pour le dépôt du mémoire.

9. Conclusion et recommandations

L'objectif principal en agronomie et en sélection est d'atteindre un rendement en grains optimal, ce qui souligne l'importance d'étudier les facteurs qui le déterminent. L'étude met en évidence l'importance des composantes ainsi que leurs relations et réponses dans l'élaboration du rendement, sous des conditions agro-pédo-climatiques belges. En outre, cette étude a confirmé l'influence significative de la densité de semis et le choix variétal sur le développement végétal et les composantes de rendement. Toutefois, le facteur densité de semis s'est avéré jouer un rôle plus déterminant sur le rendement et ses composantes par rapport au facteur variétal. Le rendement a augmenté de 20 à 31% avec l'accroissement de la densité de semis de 75 à 400 gr/m² selon l'essai.

L'étude menée à travers deux essais, chacun étudié séparément mais nécessaire, a complexifié l'interprétation des résultats. Néanmoins, les deux essais ont mis en évidence des différences significatives dans les valeurs des variables. De plus, en fonction de l'essai, certaines variables présentaient des différences significatives ou non selon les facteurs. Dans ces essais, il est conclu que la densité agronomique optimale entre les quatre densités étudiées est de 300 gr/m². Cependant, pour déterminer plus précisément cette densité agronomique optimale, il serait pertinent d'étudier des densités de semis intermédiaires à 150 et 300 gr/m². En plus de cette constatation faite dans un contexte spécifique, le choix de la densité de semis dépend d'autres facteurs tels que la date de semis. Il est fortement recommandé de suivre les directives des instituts de recherche agronomique concernant la densité de semis en fonction du contexte cultural. En semis précoce, d'importantes densités de semis favorisent une gestion plus complexe en raison d'un risque plus élevé de développements de maladies, de verse, de stress nutritionnel et d'autres contraintes biotiques et abiotiques.

Enfin, il est essentiel de rappeler que la densité de semis et le choix variétal ne constituent qu'une partie des éléments déterminant le rendement final. Mais celui-ci s'exprime à travers les réponses de nombreux facteurs génétiques, environnementaux, culturels ainsi que leurs interactions.

Recommandations :

Afin d'étudier plus amplement l'effet des facteurs, il serait pertinent de réitérer l'étude :

- sur plusieurs années et dans différentes régions ;
- avec une date de semis précoce et tardive ;
- avec plus de modalités pour la densité de semis (ex : 250 gr/m²) et avec des variétés caractérisées par des tallages plus extrêmes entre eux (ex: ajout d'une variété à faible tallage) ;
- avec des mesures des conditions environnementales intraparcellaires ;
- avec des parcelles destinées à la détermination du rendement et à la destruction des biomasses durant la saison culturale.

10. Bibliographie

- Alaoui S.B., 2005. *Référentiel pour la Conduite Technique de la Culture du blé dur (Triticum durum)*, Morocco.
- Allard F., 2017. Détermination des dates et densités de semis optimales du blé d'automne en vue d'augmenter la survie à l'hiver et le rendement en contexte québécois (Mémoire).
- Apaq-W, 2023. Types de céréales produites en Wallonie | l'Apaq-W. *Apaq-W*.
<https://www.apaqw.be/fr/types-de-cereales-produites-en-wallonie>, (07/02/2023).
- ARVALIS, 2013. Céréales à paille - Semis tardifs : les précautions à prendre pour limiter les risques encourus. *ARVALIS*. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/semis-tardifs-les-precautions-prendre-pour-limiter-les-risques-encourus>, (19/05/2023).
- ARVALIS, 2017. *Blé tendre: Guide de culture*, Arvalis, Institut du végétal, Paris.
- ARVALIS, 2022. Comment s'élabore le rendement des céréales à paille ? *ARVALIS*.
<https://www.arvalis.fr/infos-techniques/comment-selabore-le-rendement>, (08/02/2023).
- Baccar R., 2011. Plasticity of winter wheat architecture modulated by sowing date and plant population density and its effect on Septoria tritici epidemics.
- Bahloul F., Bouzerzour H. & Benmahammed A., 2008. Effets de la vitesse et de la durée du remplissage du grain ainsi que de l'accumulation des assimilats de la tige dans l'élaboration du rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans les conditions de culture des hautes plaines orientales d'Algérie. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*
- Bailly R. & Mamarot J., 1977. *Mauvaises herbes des grandes cultures [Texte imprimé]: ouvrage de base, 69 espèces importantes présentées au stade plantule*, Association de coordination technique agricole, Paris, 70.
- Baloch M., Shah I., Nadim M., Khan I. & Abdul Aziz K., 2010. Effect of seeding density and planting time on growth and yield attributes of wheat. *Journal of Animal and Plant Sciences* **20**, 239–240.
- BASF, 2019a. Les clés d'optimisation du rendement du blé.
https://www.agro.basf.fr/fr/cultures/ble/implantation_du_ble/les_composantes_du_rendement_du_ble/, (08/02/2023).
- BASF, 2019b. Bien choisir ses variétés de blé.
https://www.agro.basf.fr/fr/cultures/ble/semences_de_ble/bien_choisir_ses_varietes_de_ble/, (14/02/2023).
- Bastos L.M., Carciocchi W., Lollato R.P., Jaenisch B.R., Rezende C.R., Schwalbert R., Vara Prasad P.V., Zhang G., Fritz A.K., Foster C., Wright Y., Young S., Bradley P. & Ciampitti I.A., 2020. Winter Wheat Yield Response to Plant Density as a Function of Yield Environment and Tillering Potential: A Review and Field Studies. *Front Plant Sci* **11**, 54, DOI:10.3389/fpls.2020.00054.
- Bodson B., Massaux C., Lenartz J., Vancutsem F., Sinnaeve G., Dardenne P., Deroanne C., Falisse A. & Sindic M., 2006. Influence de la protection fongicide, de la variété et de la date de semis sur les caractéristiques et les propriétés de l'amidon de blé. Presented at the 8ème Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes.
- Bodson B., Meeus P. & Falisse A., 1997. Influence de l'évolution de la phytotechnie du blé sur le raisonnement de la protection fongicide. *Faculté des Sciences Agronomiques Gembloux*, Cinquième conférence internationale sur les maladies des plantes 1–8.
- Boiffin J., Caneill J., Meynard J.-M. & Sebillotte M., 1981. Élaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse I. - Protocole et méthode d'étude d'un problème technique régional. *Agronomie* **1**(7), 549–558, DOI:10.1051/agro:19810705.
- Bonjean A., 2001. Histoire de la culture des céréales et en particulier de celle du blé tendre (*Triticum aestivum* L.). *Dossier de l'environnement de l'INRA*, Agriculture et biodiversité des plantes (21), 1–10.
- Bourak K., 2018. Selection Assistée Par Marqueurs Snp Et Étude Phénotypique Du Blé Tendre (*Triticum Aestivum* L.) (Thesis).
- Cao S., Xu D., Hanif M., Xia X. & He Z., 2020. Genetic architecture underpinning yield component traits in wheat. *Theor Appl Genet* **133**(6), 1811–1823, DOI:10.1007/s00122-020-03562-8.
- Carver B.F. (Ed.), 2009. *Wheat: science and trade*, World agriculture series, Wiley-Blackwell, Ames, Iowa, 569.
- Casnin C., Madre J.-F. & Levesque H., 2016. *Le Blé, une plante modèle pour étudier la biologie végétale au lycée*.

- Chambres d'agriculture, 2017. Synthèse régionale des expérimentations en grandes cultures biologiques 2017. *Chambres d'agriculture du Pays de la Loire* 59–65.
- Chambres d'agriculture de Normandie, 2022. Semis des céréales. *Chambres d'agriculture de Normandie*. <https://normandie.chambres-agriculture.fr/conseils-et-services/produire-thematiques/cultures/cereales/semis-des-cereales/>, (14/02/2023).
- Charles R. & Cholley E., 2011. Maladies et rendement du blé d'automne: influence du système de culture. *Recherche Agronomique Suisse*, Production végétale **2**(6), 264–271.
- Cornec N., 2009. La date des semis de céréales ne doit pas être dictée par le hasard et les habitudes. Elle est fonction des caractéristiques de la variété et d'une série de facteurs, à ne pas négliger. Au risque de s'exposer au gel des épis ou à l'échaudage thermique. *Perspectives agricoles*, Cultures (359), 45–49.
- Coventry D.R., Reeves T.G., Brooke H.D. & Cann D.K., 1993. Influence of genotype, sowing date, and seeding rate on wheat development and yield. *Aust. J. Exp. Agric.* **33**(6), 751–757, DOI:10.1071/ea9930751.
- CRA-W, 2023. OAD Pheno V2. OAD. <https://www.agromet.be/fr/oad/pheno01/plotly/v2/#results>, (25/05/2023).
- Darwinkel A., Hag B.A. ten & Kuizenga J., 1977. Effect of sowing date and seed rate on crop development and grain production of winter wheat. *Netherlands Journal of Agricultural Science* **25**(2), 83–94, DOI:10.18174/njas.v25i2.17134.
- Deswarte J.-C., Girousse C. & Allard V., 2022. PHYSIOLOGIE DES CÉRÉALES À PAILLE : COMMENT SE CONSTITUE LA FERTILITÉ DES ÉPIS ? *Perspectives agricoles*. <https://www.perspectives-agricoles.com/physiologie-des-cereales-a-paille-comment-se-constitue-la-fertilite-des-epis--@/view-3939-arvarticlepa.html>, (19/05/2023).
- Doré C. & Varoquaux F., 2006. *Histoire et amélioration de cinquante plantes cultivées*, Savoir faire, Institut national de la recherche agronomique, Paris.
- Dumont B. & Fagnant L., 2021. *Cours de Phytotechnie générale - Blé tendre d'hiver*.
- Dumont B., Pierreux J. & Meza Morales W.R., 2020. Gérer la fertilisation azotée pour s'adapter aux aléas climatiques en ciblant les composantes de rendement. Gembloux, 1–8.
- Duvivier M., 2018. Figure 1-Période d'infection des principales maladies en blé (flèches... *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/Periode-dinfection-des-principales-maladies-en-ble-fleches-horizontales-et-stades-de_fig1_323585365, (27/06/2023).
- FAOSTAT, 2021. FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/fr/#data/QCL/visualize>, (08/02/2023).
- Farooq U., Khan E.A., Khakwani A.A., Ahmed S., Ahmed N. & Zaman G., 2016. Impact of sowing time and seeding density on grain yield of wheat variety Gomal-08.
- Faux A.-M., Legrand J., Stalport A., Mahieu O. & Godin B., 2020. 4. Variétés de céréales en agriculture biologique. *Livre Blanc « Céréales » – Septembre 2020* 1–23.
- Gate P., 1995. *Ecophysiologie du blé : de la plante à la culture*, Technique et Documentation-Lavoisier, Paris, 429 p.
- Glesener M., 2017. ÉTUDE DES CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES DE LA CANOPÉE D'UNE CULTURE DE FROMENT PAR STÉRÉOSCOPIE (Mémoire).
- Gooding M.J., Pinyosinwat A. & Ellis R.H., 2002. Responses of wheat grain yield and quality to seed rate. *The Journal of Agricultural Science* **138**(3), 317–331, DOI:10.1017/S0021859602002137.
- Goodwin A.W., Lindsey L.E., Harrison S.K. & Paul P.A., 2018. Estimating Wheat Yield with Normalized Difference Vegetation Index and Fractional Green Canopy Cover. *Crop, Forage & Turfgrass Management* **4**(1), 180026, DOI:10.2134/cftm2018.04.0026.
- Gouvernement du Canada, 2012. La biologie du Triticum aestivum L. (blé). <https://inspection.canada.ca/varietes-vegetales/vegetaux-a-caracteres-nouveaux/demandeurs/directive-94-08/documents-sur-la-biologie/triticum-aestivum-l-fra/1330982915526/1330982992440>, (06/02/2023).
- Groupe de la Banque Mondiale, 2023. Rendement des céréales (kg par hectare) | Data. *Groupe de la Banque Mondiale*. <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/AG.YLD.CREL.KG>, (04/02/2023).
- Holman J.D., Haag L.A., Schlegel A.J. & Assefa Y., 2021. Yield components of dryland winter wheat genotypes and response to seeding rate. *Agronomy Journal* **113**(2), 1776–1791, DOI:10.1002/agj2.20607.
- INRAE, 2020. L'origine des blés modernes révélée. *INRAE Institutionnel*. <https://www.inrae.fr/actualites/lorigine-bles-modernes-revelee>, (08/02/2023).
- Institut technique de l'agriculture biologique, 2000. Protocole de suivi d'essais comparant des variétés de céréales à paille d'hiver en conduite biologique.

- Institut technique des céréales et des fourrages (Ed.), 2003. *Stades du blé*, ITCF, Paris.
- Inventaire national du patrimoine naturel, 2023. *Triticum aestivum* L., 1753 [nom. cons.] - Blé d'été, Blé tendre, Froment, Blé ordinaire. *Inventaire National du Patrimoine Naturel*. https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/127692, (07/02/2023).
- IRM, 2023. IRM - Paramètres. *KMI*. <https://www.meteo.be/fr/unpublish/climat-general-en-belgique/parametres>, (29/04/2023).
- ITAB, 2022. Comparaison de variétés de céréales à paille en agriculture biologique.
- Jorion Philip-Seeds, 2023. Qui sommes-nous ? - Jorion Philip-Seeds. *Jorion Philip-Seeds*. <https://www.jorion-philip-seeds.be/fr/qui-sommes-nous/>, (15/02/2023).
- Kassaye K.T. & Yilma W.A., 2022. Seeding and NP Fertilizer Rates' Effect on Irrigated Wheat Yield and Water Use Efficiency in Midland Tropical Environment. *J Soil Sci Plant Nutr* **22**(2), 1490–1505, DOI:10.1007/s42729-021-00749-w.
- Kelley K.W., 2001. Planting Date and Foliar Fungicide Effects on Yield Components and Grain Traits of Winter Wheat. *Agronomy Journal* **93**(2), 380–389, DOI:10.2134/agronj2001.932380x.
- Kondic D., Bajić M., Hajder Đ. & Bosancic B., 2017. The Rate of Productive Tillers per Plant of Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars under Different Sowing Densities. *AIPOZHABE* **17**, 345, DOI:10.7251/AGREN1604345K.
- Kouadio A., 2012. Prévisions des rendements du blé d'hiver à échelle régionale par modélisation de la courbe de chute de l'indice foliaire.
- Leterme P., Manichon H., Roger-Estrade J. & Buisson O., 1994. Analyse intégrée des rendements du blé tendre et de leurs causes de variation dans un réseau de parcelles d'agriculteurs du Thymerais. *Agronomie* **14**(6), 341–361, DOI:10.1051/agro:19940601.
- Leterme P. & Viaux P., 2021. Pourquoi les rotations des cultures?
- Livre Blanc Céréales, 2017. principaux-stades-reperes-de-la-vegetation-en-cereales.pdf. *Livre Blanc Céréales*. <https://www.livre-blanc-cereales.be/wp-content/uploads/2017/01/principaux-stades-reperes-de-la-vegetation-en-cereales.pdf>, (07/02/2023).
- Livre Blanc Céréales, 2023. FROMENT – Livre Blanc Céréales.
- Livre Blanc Céréales, 2023b. Densité de semis – Livre Blanc Céréales.
- Ma S.-C., Wang T.-C., Guan X.-K. & Zhang X., 2018. Effect of sowing time and seeding rate on yield components and water use efficiency of winter wheat by regulating the growth redundancy and physiological traits of root and shoot. *Field Crops Research* **221**, 166–174, DOI:10.1016/j.fcr.2018.02.028.
- Malika M. & Zeyneb S., 2018. Etude du comportement de quelques variétés de blé tendre oasisien (*Triticum aestivum* L.) de la région d'Adrar (Mémoire).
- Martre P., n.d. *Echelle de cotation de la sénescence des feuilles chez le blé*.
- Matsuyama H. & Ookawa T., 2020. The effects of seeding rate on yield, lodging resistance and culm strength in wheat. *Plant Production Science* **23**(3), 322–332, DOI:10.1080/1343943X.2019.1702469.
- Maufras J.-Y., 2021. Maladies des céréales : activer tous les leviers agronomiques pour gérer le risque. *ARVALIS*. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/etat-des-lieux-et-marges-de-manoeuvre-pour-regagner-en-rentabilite>, (14/02/2023).
- Miralles D. & Slafer G., 2007. Sink limitations to yield in wheat : how could it be reduced? *J. Agric. Sci.* **145**.
- Morgan G., Shaffer O., Vietor D. & Baughman T., 2011. Wheat Grain Yield Responses to Seeding Date and Rate Under Rainfed Conditions in Texas. *cm* **10**, 1–10, DOI:10.1094/CM-2011-0518-01-RS.
- Naveed K., Khan M.A., Baloch M.S., Ali K., Nadim M.A., Khan E.A., Shah S. & Arif M., 2014. EFFECT OF DIFFERENT SEEDING RATES ON YIELD ATTRIBUTES OF DUAL-PURPOSE WHEAT **30**.
- Nielsen D.C., Miceli-Garcia J. & Lyon D., 2012. Canopy Cover and Leaf Area Index Relationships for Wheat, Triticale, and Corn. *Agronomy Journal* **104**, 1569–1573, DOI:10.2134/agronj2012.0107n.
- Pathania R., Prasad R., Rana R.S., Mishra S. & Sharma S., 2018. Growth and yield of wheat as influenced by dates of sowing and varieties in north western Himalayas. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* **7**(6), 517–520.
- Patrignani A. & Ochsner T.E., 2015. Canopeo: A Powerful New Tool for Measuring Fractional Green Canopy Cover. *Agronomy Journal* **107**(6), 2312–2320, DOI:10.2134/agronj15.0150.
- Peltonen-Sainio P. & Järvinen P., 1995. Seeding rate effects on tillering, grain yield, and yield components of oat at high latitude. *Field Crops Research* **40**(1), 49–56, DOI:10.1016/0378-4290(94)00089-U.
- Perspectives agricoles, 2013a. Un indicateur pour évaluer la tolérance variétale. *Perspectives agricoles* (402), 58–59.

- Perspectives agricoles, 2013b. BLÉ SUR BLÉ : DES RENDEMENTS qui finissent par décrocher. *Perspectives agricoles*, Les indispensables (400), 1–5.
- Poole N.F. & Arnaud M.E., 2014. The role of fungicides for effective disease management in cereal crops. *Canadian Journal of Plant Pathology* **36**(1), 1–11, DOI:10.1080/07060661.2013.870230.
- Rahman M.A., Hossain S.J., Hossain M.B., Amin M.R. & Sarkar K.K., 2010. EFFECT OF VARIETY AND CULTURE METHOD ON THE YIELD AND YIELD ATTRIBUTES OF WHEAT. *Int. J. Sustain. Crop Prod.* **5**(3), 17–21.
- Reed V., Arnall D.B., Finch B. & Bigatao Souza J.L., 2021. Predicting Winter Wheat Grain Yield Using Fractional Green Canopy Cover (FGCC). *International Journal of Agronomy* **2021**, 1–8, DOI:10.1155/2021/1443191.
- Reynolds M., Rajaram S. & Sayre K., 1999. Physiological and Genetic Changes of Irrigated Wheat in the Post–Green Revolution Period and Approaches for Meeting Projected Global Demand. *Crop Science - CROP SCI* **39**, DOI:10.2135/cropsci1999.3961611x.
- Reynolds M., Slafer G., Foulkes J., Griffiths S., Murchie E., Carmo-Silva E., Asseng S., Chapman S., Sawkins M., Gwyn J. & Flavell R., 2022. A wiring diagram to integrate physiological traits of wheat yield potential. *Nature Food* **3**, 318–324, DOI:10.1038/s43016-022-00512-z.
- Sadras V.O. & Slafer G.A., 2012. Environmental modulation of yield components in cereals: Heritabilities reveal a hierarchy of phenotypic plasticities. *Field Crops Research* **127**, 215–224, DOI:10.1016/j.fcr.2011.11.014.
- Schaafsma A.W. & Tamburic-Ilincic L., 2005. Effect of Seeding Rate and Seed Treatment Fungicides on Agronomic Performance, Fusarium Head Blight Symptoms, and DON Accumulation in Two Winter Wheats. *Plant Disease* **89**(10), 1109–1113, DOI:10.1094/PD-89-1109.
- Services opérationnels du collège des producteurs, 2019. Commission Grandes cultures – Orge Brassicole - Plan de développement stratégique 2019 – 2029. *Commission Grandes cultures* 1–113.
- Shahwani A., Baloch S., Baloch S., Mengal B., Bashir W., Noor H., Baloch R., Sial A., Sabiel S., Razzaq K., Shahwani A. & Mengal A., 2014. INFLUENCE OF SEED SIZE ON GERMINABILITY AND GRAIN YIELD OF WHEAT (*Triticum Aestivum* L.) VARIETIES. *Journal of Natural Sciences Research* **4**, 147–155.
- Shili-Touzi I., 2009. Analyse du fonctionnement d’une association de blé d’hiver (*Triticum aestivum* L.) et d’une plante de couverture sur une échelle annuelle par modélisation et expérimentation (phdthesis).
- Slafer G., García G., Serrago R. & Miralles D., 2022. Physiological drivers of responses of grains per m² to environmental and genetic factors in wheat. *Field Crops Research* **285**, 108593, DOI:10.1016/j.fcr.2022.108593.
- Slafer G.A., Foulkes M.J., Reynolds M.P., Murchie E.H., Carmo-Silva E., Flavell R., Gwyn J., Sawkins M. & Griffiths S., 2023. A ‘wiring diagram’ for sink strength traits impacting wheat yield potential. *Journal of Experimental Botany* **74**(1), 40–71, DOI:10.1093/jxb/erac410.
- Slafer G.A., Savin R. & Sadras V.O., 2014. Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment. *Field Crops Research* **157**, 71–83, DOI:10.1016/j.fcr.2013.12.004.
- Soltner D., 2005. *Les grandes productions végétales: phytotechnie "spéciale : les céréales, les plantes dites "sarclées", prairies*, Collection sciences et techniques agricoles, Bressuire.
- Soomro U.A., Rahman M.U., Odhano E.A., Gul S. & Tareen A.Q., 2009. Effects of Sowing Method and Seed Rate on Growth and Yield of Wheat (*Triticum aestivum*). *IDOSI, World Journal of Agricultural Sciences* **5**(2), 159–162.
- Spaner D., Todd A.G. & McKenzie D.B., 2000. The effect of seeding date, seeding rate and N fertilization on winter wheat yield and yield components in eastern Newfoundland. *Can. J. Plant Sci.* **80**(4), 703–711, DOI:10.4141/P99-165.
- Spink J.H., Semere T., Sparkes D.L., Whaley J.M., Foulkes M.J., Clare R.W. & Scott R.K., 2000. Effect of sowing date on the optimum plant density of winter wheat. *Annals of Applied Biology* **137**(2), 179–188, DOI:10.1111/j.1744-7348.2000.tb00049.x.
- Spotifarm A., 2020. Somme de température: pourquoi suivre l’évolution des degrés jours ? *Spotifarm*. <https://blog.spotifarm.fr/tour-de-plaine-spotifarm/somme-de-temperature-pourquoi-suivre-levolution-des-degres-jours>, (15/02/2023).
- STATBEL, 2021. Exploitations agricoles et horticoles | Statbel. <https://statbel.fgov.be/fr/themes/agriculture-peche/exploitations-agricoles-et-horticoles#figures>, (04/02/2023).

- Statista Research Department, 2022. Céréales : volume de production par type dans le monde 2022/2023. *Statista*. <https://fr.statista.com/statistiques/565119/production-totale-de-cereales-par-type-dans-le-monde/>, (07/02/2023).
- Terrones Gavira & Burny P., 2012. 9. Évolution du marché mondial du blé au cours des cinquante dernières années. *Livre Blanc « Céréales » ULg Gembloux Agro-Bio Tech et CRA-W Gembloux – Février 2012*, Economie 1–9.
- Tremblay G., Maisonneuve J.-É., Rioux S. & Faucher Y., 2016. UTILISATION DES FONGICIDES FOLIAIRES EN GRANDES CULTURES. *Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture* (1), 1–62.
- ULg - GxABT, SPW-DGARNE, Legrain X. & Bock L., 2009. LÉGENDE DE LA CARTE NUMÉRIQUE DES SOLS DE WALLONIE - TABLEAU SIMPLIFIÉ *.
- Université Mohamed khider-Biskra, February-7-2023. Morphologie et physiologie du Blé. http://elearning.univ-biskra.dz/moodle2019/pluginfile.php/79152/mod_resource/content/1/TP1.pdf, (07/02/2023).
- Valério I.P., Carvalho F.I.F. de, Benin G., Silveira G. da, Silva J.A.G. da, Nornberg R., Hagemann T., Luche H. de S. & Oliveira A.C. de, 2013. Seeding density in wheat: the more, the merrier? *Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)* **70**, 176–184, DOI:10.1590/S0103-90162013000300006.
- Vidal T., 2017. Intérêt de la diversité architecturale des plantes cultivées pour limiter la progression épidémique de maladies foliaires à dispersion pluviale : cas de la septoriose au sein d'associations variétales de blé (phdthesis).
- WalOnMap, 2023. WalOnMap. <http://geoportail.wallonie.be/walonmap>, (17/02/2023).
- Wheat yield, February-15-2023. . *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/grapher/wheat-yields>, (15/02/2023).
- Wiethold J., 2023. Le blé tendre (*Triticum aestivum* L. ; syn. *Triticum vulgare*).... *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/Le-ble-tendre-Triticum-aestivum-L-syn-Triticum-vulgare-Le-ble-tendre-est-un-ble_fig19_267098379, (07/04/2023).
- Willenborg C.J. & Van Acker R.C., 2008. The biology and ecology of hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.) and its implications for trait confinement. *Can. J. Plant Sci.* **88**(5), 997–1013, DOI:10.4141/CJPS07144.
- Wood G.A., Welsh J.P., Godwin R.J., Taylor J.C., Earl R. & Knight S.M., 2003. Real-time Measures of Canopy Size as a Basis for Spatially Varying Nitrogen Applications to Winter Wheat sown at Different Seed Rates. *Biosystems Engineering, Precision Agriculture - Managing Soil and Crop Variability for Cereals* **84**(4), 513–531, DOI:10.1016/S1537-5110(03)00006-0.
- Yara France, 2018. Production mondiale de blé. *Yara France*. <https://www.yara.fr/fertilisation/solutions-pour-cultures/ble/production-mondiale-ble/>, (04/02/2023).
- Zhang F., Zhang D., Li L., Zhang Z., Liang X., Wen Q., Chen G., Wu Q. & Zhai Y., 2023. Effect of Planting Density on Canopy Structure, Microenvironment, and Yields of Uniformly Sown Winter Wheat. *Agronomy* **13**(3), 870, DOI:10.3390/agronomy13030870.
- Zheng X., Yu Z., Yu F. & Shi Y., 2022. Grain-filling characteristics and yield formation of wheat in two different soil fertility fields in the Huang–Huai–Hai Plain. *Front Plant Sci* **13**, 932821, DOI:10.3389/fpls.2022.932821.

11. Annexes

Annexe 1 : Origine du blé tendre.

Le blé tendre (*Triticum aestivum* L., 1753) ou plus communément appelé froment d'hiver en Belgique, est utilisé comme base alimentaire depuis des décennies (Bourak, 2018; Willenborg et al., 2008). La domestication des premiers blés diploïdes et tétraploïdes remonte au dixième millénaire av. J-C (Arvalis, 2017; Doré et al., 2006). L'apparition de *Triticum aestivum*, espèce hexaploïde, débute entre 8900 et 7000 av. JC durant la période du Néolithique et est située dans le Croissant fertile (Bonjean, 2001; Doré et al., 2006; INRAE, 2020). L'origine de *Triticum aestivum* est polyphylétique. En effet, l'espèce résulte d'un croisement de plusieurs sous-espèces à grains nus ou vêtus (Bonjean, 2001). *T. aestivum* est hexaploïde provenant des trois génomes d'espèces diploïdes différentes (Arvalis, 2017; Bourak, 2018; Gouvernement du Canada, 2012). La première hybridation débute il y a plus de 500 000 ans entre *Triticum urartu* et une espèce proche de *Aegilops speltoides* créant *Triticum dicoccoides* à l'origine des espèces tétraploïdes ou blés durs. Ensuite, une hybridation entre les blés tétraploïdes et *Aegilops tauschii* a produit *T. aestivum*, le blé hexaploïde ou blé tendre (Bonjean, 2001; INRAE, 2020) (Figure S1).

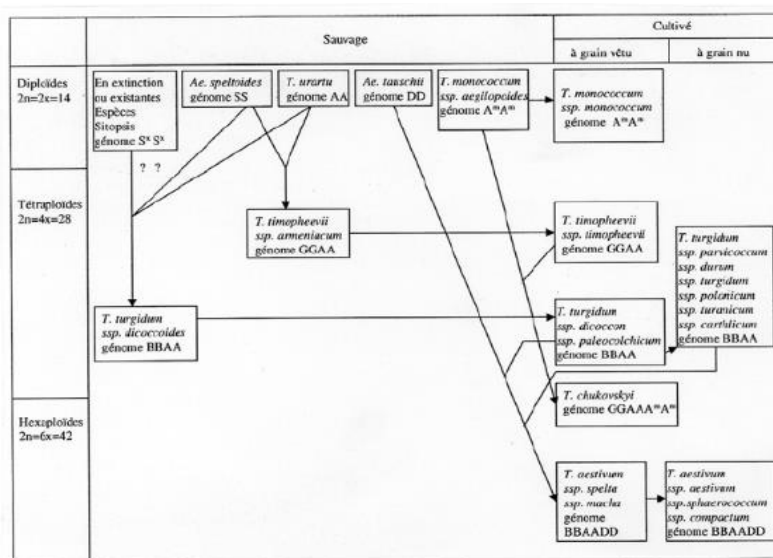


Figure S33 : Hybridations des blés diploïdes (Bonjean, 2001).

Annexe 2 : Stade de développement du blé d'hiver.

Dans la majorité des pays à climats tempérés, le blé d'hiver est semé en automne et plus précisément en Belgique durant les mois d'octobre et novembre. Cette culture se développe et mûrit jusqu'à la fin du printemps et au début l'été. La récolte a lieu en Belgique selon les conditions climatiques de l'année culturale aux mois de juillet-août. Les stades de développement à partir de la germination comprennent la levée, le tallage, la montaison, l'épiaison, la floraison, la maturité physiologique ainsi que la sénescence (Figure S2). Le cycle de développement du blé débute par les périodes juvénile et végétative qui sont strictement herbacées. La période végétative s'étend jusqu'à fin du tallage et est suivie par la période reproductive et la sénescence (Bourak, 2018).

Stade principal 0 : germination et levée

Afin d'induire la germination, un traitement au froid appelé vernalisation est nécessaire pour lever la dormance (Casnin et al., 2016). Une fois la graine imbibée d'eau, quelques jours plus tard, la germination a lieu et se traduit par le pointement de la radicule et l'émergence du coléoptile. Le stade de la levée correspond à l'élongation du coléoptile et au développement de la jeune tige feuillée (Casnin et al., 2016; Institut technique des céréales et des fourrages, 2003; Université Mohamed khider-Biskra, February-7-2023).

Stade principal 1 : développement des feuilles

Ce stade se traduit par le développement des trois premières feuilles (Institut technique des céréales et des fourrages, 2003; Livre Blanc Céréales, 2017).

Stade principal 2 : le tallage

Le tallage correspond à la formation du plateau de tallage. L'axe principal de la plante produit des axes secondaires appelés talles (Casnin et al., 2016).

Stade principal 3 : élongation de la tige principale

La fin du tallage herbacé est marquée par le redressement des plantes (Institut technique des céréales et des fourrages, 2003). Ce stade correspond au début de la montaison : il débute par l'élongation du premier nœud et continue avec les nœuds suivants (Livre Blanc Céréales, 2017).

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

Il se traduit par l'élongation et le gonflement de la gaine foliaire de la dernière feuille et se termine par l'apparition de l'épi (Livre Blanc Céréales, 2017).

Stade principal 5 : sortie de l'inflorescence ou épiaison

Durant ce stade, l'inflorescence en épi sort de la gaine au fur et à mesure jusqu'à ce qu'elle soit complètement sortie (Livre Blanc Céréales, 2017).

Stade principal 6 : floraison, anthèse

Durant ce stade, les épillets vont fleurir (Livre Blanc Céréales, 2017).

Stade principal 7 : développement des graines

Les grains vont successivement passer du stade aqueux, mi laiteux et laiteux (Livre Blanc Céréales, 2017).

Stade principal 8 : maturation des graines

Les grains vont passer du stade pâteux mou à pâteux dur pour finalement atteindre la maturation complète lorsque le caryopse est dur (Livre Blanc Céréales, 2017).

Stade principal 9 : sénescence

La sénescence se traduit par l'affaiblissement et est suivie par la mort de la plante. Une surmaturité des grains est observée et entraîne ensuite leur détachement (Livre Blanc Céréales, 2017).

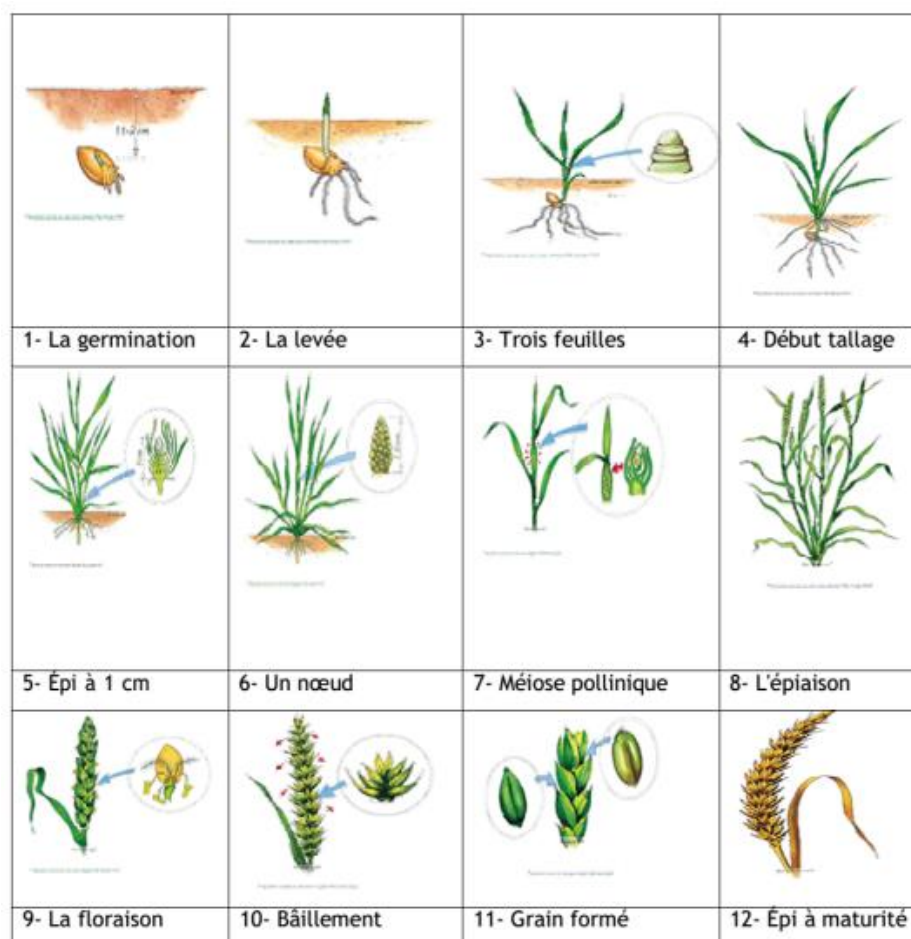


Figure S34 : Stades de développement du blé tendre (Université Mohamed khider-Biskra, February-7-2023).

Annexe 3 : Le blé tendre et ses débouchés en quelques chiffres.

a. Le blé tendre en quelques chiffres

Le blé tendre est l'une des cultures céréalières qui domine dans le monde. Il s'agit de la seconde céréale la plus cultivée mondialement avec 770,8 millions de tonnes, précédée par le maïs avec 1187,8 millions de tonnes pour l'année 2022 (Statista Research Department, 2022) (Figure S3). Cette base alimentaire présente une importance économique majeure qui ne cesse de croître d'année en année (Bourak, 2018). En effet, en considérant la constante expansion de la population, la demande en blé est estimée à augmenter de 60% d'ici 2050 (Cao et al., 2020).

Production/Rendement de Blé en Monde + (Total)

2010 - 2021

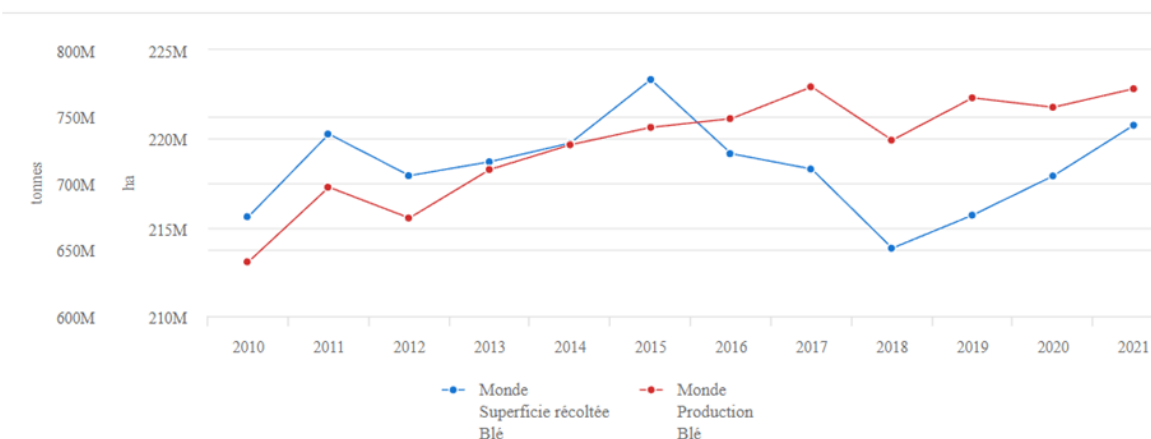


Figure S35 : Production et superficie mondiale de blé respectivement en millions de tonnes et hectares (FAOSTAT, 2021).

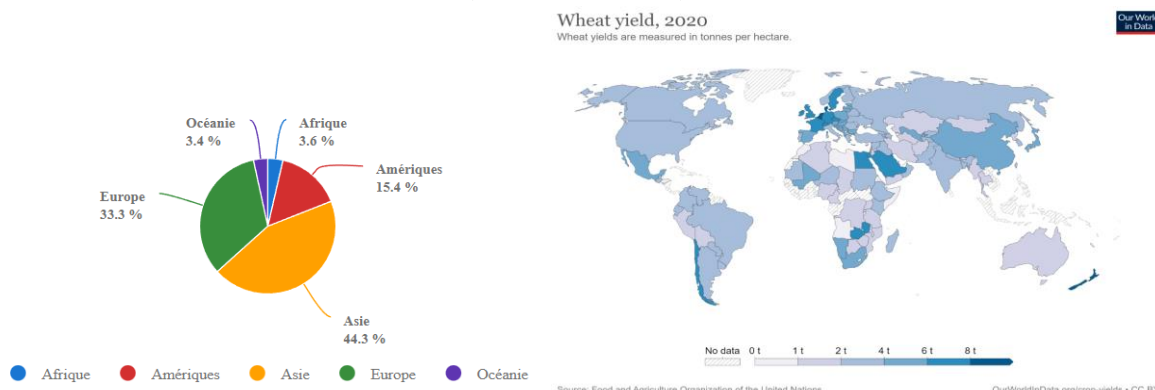


Figure S36 : Moyenne de 2010 à 2021 des parts de la production de blé par région du monde (à gauche) (FAOSTAT, 2021) ; Rendements mondiaux du blé d'hiver (à droite) ("Wheat yield," February-15-2023).

Les plus gros pays producteurs de blé par ordre décroissant sont la Chine, l'Inde, la Russie et les Etats-Unis. La Chine, étant le premier pays producteur mondial, produit 137 millions de tonnes, un tonnage qui est comparable à la production de l'Union européenne qui s'élevait à 138 millions de tonnes au cours de l'année 2021-22 (Statista Research Department, 2022). En Belgique, cette culture est la plus grande production céréalière (Services opérationnels du collège des producteurs, 2019). En 2021, le pays dénombrait une production de 1,5 millions de tonnes pour 188 410 hectares de culture (STATBEL, 2021).

De plus, les rendements varient fortement selon les continents et les pays (Figure S4). La Belgique est l'un des pays ayant les rendements observés les plus élevés dans le monde avec un rendement moyen de 8,5 t/ha. En comparaison, l'Union européenne a un rendement moyen de 5,5 t/ha tandis que les rendements moyens de l'Asie sont de 3,3 à 5,5 t/ha (Yara France, 2018; Groupe de la Banque Mondiale, 2023).

b. Les débouchés

Le blé tendre est cultivé principalement pour récolter ses graines qui occupent une place dominante au sein de l'alimentation humaine et animale. La consommation animale de blé tendre représente 19% de la consommation mondiale. Quant à la consommation humaine, celle-ci représente 69% de la consommation totale. Cette consommation est estimée autour de 66 kg par personne par an (Terrones Gavira et al., 2012). Cette valeur est élevée notamment en raison qu'un cinquième des calories alimentaires consommées dans le monde proviennent du blé (Cao et al., 2020). Ces calories résultent de la transformation des graines en farine

utilisée dans la confection de divers produits issus des boulangeries, pâtisseries, biscuiteries, etc. (Gouvernement du Canada, 2012).

En Belgique, le blé d'hiver est la principale culture wallonne destinée majoritairement à l'alimentation animale, l'amidonnerie et l'industrie des biocarburants (Apaq-W, 2023). La paille, coproduit de cette culture, peut être broyée et laissée à même le sol. Celle-ci peut également être récoltée et utilisée en tant que litière, aliment pour animaux ou à d'autres fins (Doré et al., 2006).

Annexe 4 : Les maladies du blé d'hiver.

Les principales maladies cryptogamiques retrouvées chez le blé sont le piétin-verse (*Oculimacula yallundae*, *O. acutiformis*), le piétin-échaudage (*Gaeumannomyces graminis tritici*), la septoriose (*Septoria nodorum*), l'helminthosporiose (*Drechslera tritici-repentis*), l'oïdium (*Erysiphe graminis*), la rouille jaune (*Puccinia striiformis*), la rouille brune (*Puccinia recondita*) et la fusariose (*Fusarium spp.*) (Charles et al., 2011; Livre Blanc Céréales, 2023a).

Ces dernières années, les rendements se sont améliorés grâce à la protection des cultures, à l'amélioration génétique et à des performances accrues de la fertilisation. Les rendements sont influencés par la protection fongique bien que l'amélioration génétique développe des variétés plus résistantes (Bodson et al., 1997). L'application d'une protection fongique montre des améliorations sur le rendement en grains et le PMG. Cependant, cette protection n'est pas le facteur principal influençant le rendement puisque celui-ci est fortement lié au choix variétal et à la date de semis (Bodson et al., 2006).

Des études soulignent que le rendement est significativement influencé par la protection fongique et permet un gain (Charles et al., 2011; Kelley, 2001; Tremblay et al., 2016). Bien que des densités de semis élevées peuvent favoriser des rendements supérieurs, elles contribuent également à des conditions climatiques propices au développement de maladies principalement foliaires (Chambres d'agriculture de Normandie, 2022; Maufras, 2021). En outre, la protection fongique n'est pas toujours significative d'une année à l'autre sur le rendement (Charles et al., 2011; Kelley, 2001; Tremblay et al., 2016). Celui-ci est affecté par la protection fongique dans la majorité des cas mais est fortement dépendant de la gravité des maladies, de la résistance du cultivar aux maladies et des conditions météorologiques (Kelley, 2001).

L'intérêt de l'utilisation de fongicides n'est pas dans l'accroissement du rendement mais dans la protection de la culture afin que le potentiel de rendement s'exprime pleinement en l'absence de maladies (Poole et al., 2014).

Annexe 5 : Effet du précédent cultural.

Le précédent cultural peut présenter des effets non négligeables sur le développement de la culture mise en place. En effet, le précédent cultural modifie, conformément à sa nature, l'état du milieu biologiquement (ex: développement de maladies), chimiquement (ex: variation des éléments minéraux) et physiquement (ex: tassement du sol) tout au long de son cycle selon l'interaction entre son peuplement, les techniques culturales appliquées et les conditions météorologiques. La culture suivante présente une sensibilité élevée ou faible en fonction du précédent et son développement sera favorisé ou impacté selon une certaine ampleur (Dumont et al., 2021; Leterme et al., 2021).

La place du blé d'hiver à la suite d'un précédent cultural de dicotylédones (ex: betterave, lin, pomme de terre) ne présente pas de risques majeurs contrairement à un précédent graminée ou de céréale. Le précédent cultural fournit également selon sa nature une certaine quantité d'azote accessible par le système racinaire du blé d'hiver. Le lin et la pomme de terre sont des précédents à reliquats azotés élevés respectivement de 58 et 69 kgN/ha contrairement à la betterave (37 kgN/ha) et au maïs (40 kgN/ha) (Dumont et al., 2021).

Annexe 6 : Estimation de la couverture foliaire.

Les blés sont vulnérables durant l'hiver aux stress environnementaux tels que des températures glaciales, des sols saturés ainsi que les phénomènes de gels et dégels. Ces facteurs influencent négativement le couvert végétal ainsi que le rendement. Bien que le blé d'hiver possède des phénomènes de compensation tels que le développement de nouvelles talles ou encore un nombre de grains/épi plus important, cela n'est pas toujours suffisant lorsque le couvert est fortement impacté. Une estimation précoce de la couverture végétale permettrait d'estimer le rendement en grains et ainsi donner la possibilité d'implanter une autre culture si elle n'est plus profitable. Différents index sont alors étudiés afin d'estimer le rendement tel que la NDVI (normalized difference vegetation index), la FGCC (fractional green canopy cover), etc (Goodwin et al., 2018). De plus, obtenir l'estimation du couvert permet également d'optimiser les apports fertilisants (Reed et al., 2021).

La couverture foliaire peut être définie comme pourcentage de surface verte ou encore le rapport entre le nombre de pixels des feuilles sur le nombre de pixels total de la surface. Le taux est toujours égal ou inférieur à l'unité (Glesener, 2017). De plus, il existe une relation étroite entre la couverture foliaire et le LAI (leaf area index). En effet, au plus le pourcentage de la couverture augmente, au plus la surface foliaire augmente et par conséquent, la capacité photosynthétique de la couverture végétale augmente également. Cette relation suit une exponentielle (Nielsen et al., 2012).

A l'heure actuelle, de plus en plus de modèles prédictifs et moyens technologiques sont développés afin que les agriculteurs puissent utiliser efficacement la donnée de la couverture végétale dans la gestion des cultures. Un exemple est l'application mobile Canopeo® permettant aux agriculteurs d'estimer la couverture fractionnée de la canopée verte (FGCC) directement à partir de leur smartphone (Reed et al., 2021). La FGCC ou la couverture foliaire est une variable qui permet d'estimer le développement de la couverture du sol, l'interception de la lumière et le partage de l'évapotranspiration. L'outil Canopeo® est basé sur des rapports de couleur : du rouge sur le vert et du bleu sur le vert (Patrignani et al., 2015). Cependant, actuellement, l'utilité d'évaluer le rendement à mi-saison grâce à l'application n'a pas encore été testée. L'objectif de l'étude de Reed et al. (2021) était d'évaluer si la FGCC pourrait remplacer la NDVI en quantifiant leur relation. L'étude a prouvé que ces deux index étaient fortement corrélés entre eux mais que la FGCC ne peut pas directement être insérée dans le modèle de prédiction du rendement provenant de la NDVI. Cependant, il a été montré que la prédiction du rendement à partir du modèle basé sur la FGCC donne des estimations similaires au modèle de rendement basé sur la NDVI. L'avantage de ce modèle basé FGCC permettrait aux agriculteurs d'avoir plus facilement accès à la prédiction de leur rendement et aux recommandations du taux d'azote grâce à l'application mobile (Reed et al., 2021).

Annexe 7 : Dégâts post semis.

Le lendemain du semis, l'E1 a subi un orage contrairement à l'E2 dont la date de semis était une semaine plus tard. Des coulées d'eau/boue ont provoqués des dégâts comme des espacements entre les interlignes de semis et un retard dans le développement des plantes dans les zones des concentrations des coulées. Les dégâts sont d'autant plus visibles à partir du stade deuxième nœud (BBCH 32) où des différences de hauteurs entre les plantes sont observables (Figure S5).



Figure S37 : Différences de hauteurs de plantes.

Annexe 8 : Qualités technologiques des trois variétés étudiées (Jorion Philip-Seeds, 2023).

	Moschus	Gedser	KWS Extase
Classe qualité technologique	Panifiable E	Panifiable BP	Panifiable BPS
Poids spécifique	Très élevé	Bon	Elevé
Protéines	Elevé-très élevé	Bonne	Bonne
Zélény	Elevé	Correct	Bon
Hagberg	Stable	/	Stable
PMG	Elevé	Très élevé	Elevé

Annexe 9 : Echelle BBCH améliorée (Livre Blanc Céréales, 2017).

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

Échelle BBCH des stades phénologiques des céréales

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

Code et définition

Stade principal 0: germination, levée

00 semence sèche (caryopse sec)

01 début de l'imbibition de la graine

03 imbibition complète

05 la radicule sort de la graine

06 élongation de la radicule, apparition de poils absorbants et développement des racines secondaires

07 le coléoptile sort de la graine

09 levée: le coléoptile perce la surface du sol

Stade principal 1: développement des feuilles 1, 2

10 la première feuille sort du coléoptile

11 première feuille étalée

12 2 feuilles étalées

13 3 feuilles étalées

1 . et ainsi de suite ...

19 9 ou davantage de feuilles étalées

Stade principal 2: le tallage³

20 aucune talle visible

21 début tallage: la première talle est visible

22 2 talles visibles

23 3 talles visibles

2 . et ainsi de suite ...

29 fin tallage

1 Une feuille est étalée si sa ligule est visible ou si l'extrémité de la prochaine feuille est visible

2 Le tallage ou l'élongation de la tige principale peut intervenir avant le stade 13, dans ce cas continuez avec le stade 21

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

Stade principal 3: élongation de la tige principale

30 début montaison: pseudo-tiges et talles dressées, début d'élongation du premier entre- nœud, inflorescence au plus à 1 cm au-dessus du plateau de tallage.

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

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

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

3 . et ainsi de suite ...

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

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

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

41 début gonflement : élongation de la gaine foliaire de la dernière feuille

43 la gaine foliaire de la dernière feuille est visiblement gonflée

- 45 gonflement maximal de la gaine foliaire de la dernière feuille
- 47 la gaine foliaire de la dernière feuille s'ouvre
- 49 les premières arêtes (barbes) sont visibles (pour les variétés aristées)

Stade principal 5: sortie de l'inflorescence ou épiaison

- 51 début de l'épiaison: l'extrémité de l'inflorescence est sortie de la gaine, l'épillet supérieur est visible
- 52 20% de l'inflorescence est sortie
- 53 30% de l'inflorescence est sortie
- 54 40% de l'inflorescence est sortie
- 55 mi-épiaison: 50% de l'inflorescence est sortie
- 56 60% de l'inflorescence est sortie
- 57 70% de l'inflorescence est sortie
- 58 80% de l'inflorescence est sortie
- 59 fin de l'épiaison: l'inflorescence est complètement sortie de la gaine

Stade principal 6: floraison, anthèse

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

Stade principal 7: développement des graines

- 71 stade aqueux: les premières graines ont atteint la moitié de leur taille finale
- 73 début du stade laiteux
- 75 stade milaiteux: contenu de la graine laiteux, les graines ont atteint leur taille finale mais sont toujours vertes
- 77 fin du stade laiteux

Stade principal 8: maturation des graines

- 83 début du stade pâteux
- 85 stade pâteux mou: contenu de la graine tendre mais sec, une empreinte faite avec l'ongle est réversible
- 87 stade pâteux dur: contenu de la graine dur, une empreinte faite avec l'ongle est irréversible
- 89 maturation complète: le caryopse est dur et difficile à couper en deux avec l'ongle

Stade principal 9: sénescence

- 92 sur-maturité: le caryopse est très dur, ne peut pas être marqué à l'ongle
- 93 des graines se détachent
- 97 la plante meurt et s'affaisse
- 99 produit après récolte

Annexe 10 : Scannes de la surface foliaire pour le LAI.



Annexe 11 : Identification des maitres brins.

La Figure S6 illustre l'identification des cinq maitres brins par parcelle. Les Figures S7 et S8 soulignent les différences visuelles des taux de sénescence entre les différentes variétés.



Figure S38 : Identification et marquage des maitres brins.



Figure S39 : Différences visuelles des taux de sénescence au stade 71 respectivement pour la variété Gedser, KWS Extase et Moschus.



Figure S40 : Différences visuelles des taux de sénescence au stade 75 respectivement pour la variété Gedser, KWS Extase et Moschus.

Annexe 12 : Cotations des maladies.

Protocole de l'Institut de l'agriculture et de l'alimentation biologiques utilisé lors de cette étude (ITAB, 2022).

Comment noter ?

Tableau 1 : échelle de notation pour les maladies foliaires, hors rouilles.

Note	Etages de feuilles atteints	Plantes affectées	Surfaces foliaires attaquées (moyenne sur F1 et F2)
0		absence de dégâts	
1	F3 uniquement	< 50 %	traces sur F3
2	F3 uniquement	> 50 %	< 50% sur F3
3	F1, F2 et F3	< 100 %	< 10 %
4	F1, F2 et F3	100 %	< 10 %
5	F1, F2 et F3	100 %	20 %
6	F1, F2 et F3	100 %	30 %
7	F1, F2 et F3	100 %	40 %
8	F1, F2 et F3	100 %	50 %
9	F1, F2 et F3	100 %	60 %
10	F1, F2 et F3	100 %	> 70 %

Tableau 2 : échelle de notation pour les maladies foliaires : rouille jaune et rouille brune.

Note	Plantes affectées	Surfaces foliaires attaquées (moyenne sur F1 et F2)
0	absence de dégâts	
1	traces	traces
2	< 50 %	10 %
3	> 50 %	10 %
4	100 %	10 %
5	100 %	25 %
6	100 %	50 %
7	100 %	60 %
8	100 %	75 %
9	100 %	90 %
10	100 %	100 %

Tableau 3 : échelle de notation pour les maladies sur épis : rouille jaune.

Note	Plantes affectées	Surface de l'épi attaqué
0	absence de dégâts	
1	traces	traces
2	< 50 %	10 %
3	> 50 %	10 %
4	100 %	10 %

5	100 %	25 %
6	100 %	50 %
7	100 %	60 %
8	100 %	75 %
9	100 %	90 %
10	100 %	100 %

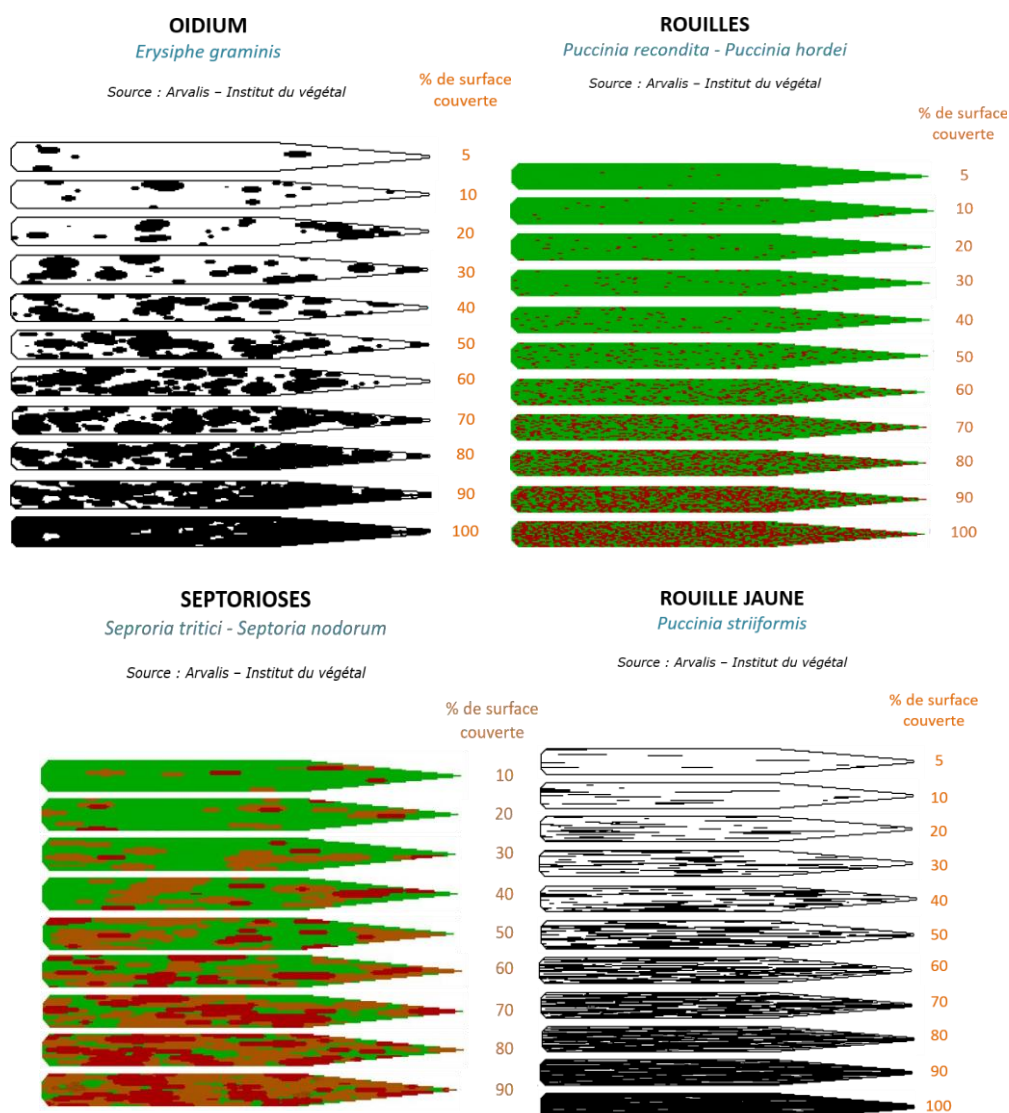
Remarque pour la rouille jaune :

Être sûr de la présence de rouille jaune, **ne noter que si le diagnostic est confirmé** (par exemple : éviter la confusion avec de la sénescence ou de la septoriose).

Si note RJ > 7, ne pas noter d'autres maladies (risques de confusion).

Épis atteints : réaliser une note à part (ouvrir quelques glumes, la rouille jaune étant parfois à l'intérieur et non visible à l'extérieur).

Echelles de notation



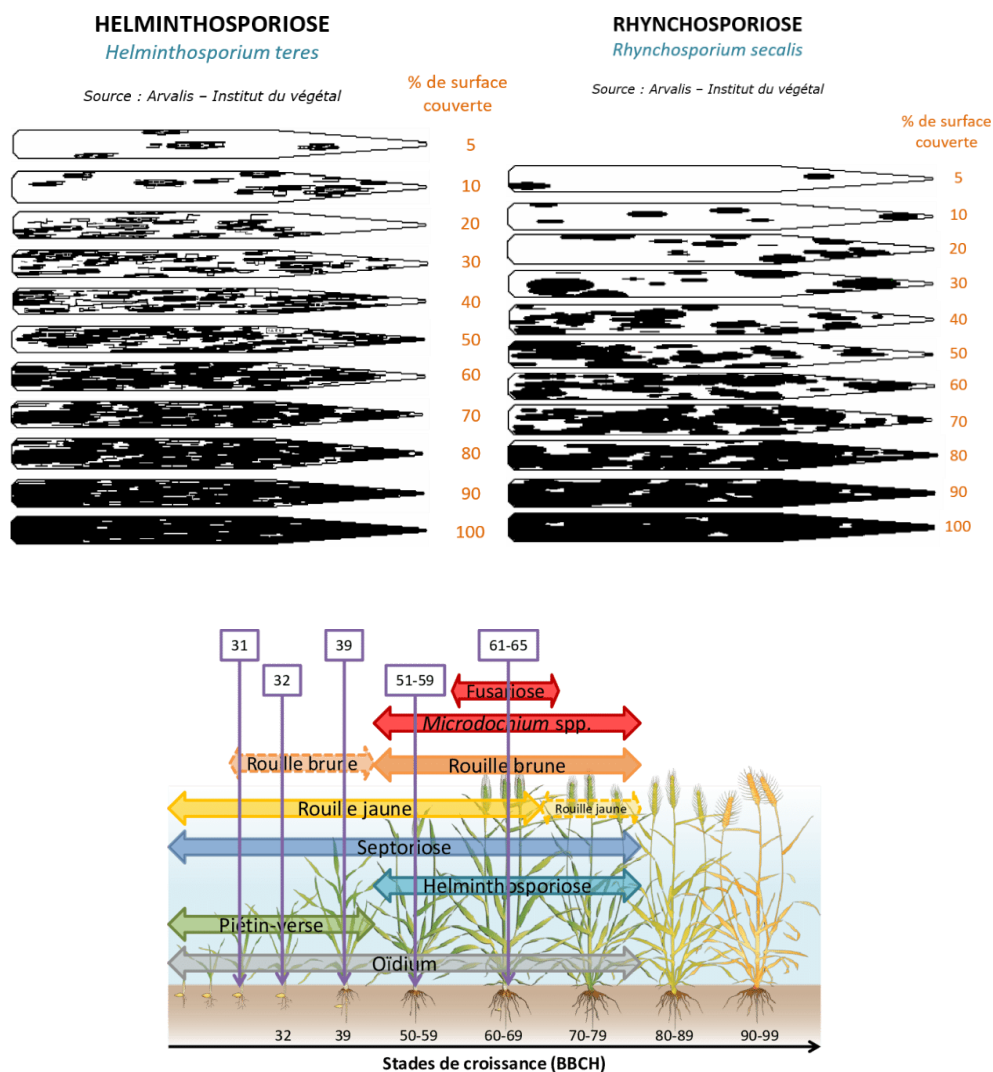


Figure S41 : Période d'infection des principales maladies en blé (Duvivier, 2018).

Tableau S22 : Cotations des symptômes des maladies chez le blé tendre (Légende : de 0 à 10, note de 0 : absence de symptômes).

E1 et E2	Maladies	Septoriose	Rouille jaune	Rouille brune	Helmintho- sporiose	Oïdium	Rhyncho- sporiose	Maladies des épis
Stade BBCH	Variété							
Stade 32	KWS Extase	1	0	0	0	0	0	/
	Gedser	1	0	0	0	0	0	/
	Moschus	1	0	0	0	0	0	/
Stade 39	KWS Extase	1	0	0	0	0	0	/
	Gedser	1	0	0	0	0	0	/
	Moschus	1	0	0	0	0	0	/
Stade 55	KWS Extase	2	0	0	0	2	0	0
	Gedser	3	0	1	0	1	0	0
	Moschus	2	0	0	0	0	0	0
Stade 65	KWS Extase	3	0	0	0	1	0	0
	Gedser	3	0	1	0	1	0	0
	Moschus	3	0	1	0	1	0	0
Stade 71	KWS Extase	4	0	0	0	3	0	1
	Gedser	4	0	2	0	2	0	1
	Moschus	4	0	2	0	1	0	1

Une observation visuelle des symptômes des maladies fréquentes de *Triticum aestivum* a été réalisée aux stades BBCH 32, 39, 55, 65 et 71 dans les deux essais (Figure S9). L'estimation visuelle de l'intensité de la présence de maladies a été effectuée sur un ensemble des plantes homogènes par parcelle. La notation est effectuée pour chaque maladie individuellement sur le pourcentage de présence de symptômes visibles à l'aide du protocole de l'Institut de l'agriculture et de l'alimentation biologiques. Aucune ou de faibles différences visuelles ont été observées entre les densités de semis pour une même variété et entre les deux essais. Les symptômes étant mineurs, l'étude n'a plus approfondie (Tableau S1).



Figure S42, S11 et S12 : Septoriose des feuilles, oïdium et rouille brune (respectivement de gauche à droite).



Figure S13 et S14 : Jaunisse nanisante, décoloration blanchâtre de la dernière feuille et tâches physiologiques (de gauche à droite).



Figure S43 : Portions d'épillets échaudés.

Annexe 13 : Relevé des adventices.

La présence d'adventice peut être influencée par la densité de semis. Un relevé a donc été réalisé dans chaque parcelle au stade BBCH 32 et 55 et identifié à l'aide du livre « Mauvaises herbes des grandes cultures, ouvrage de base, 69 espèces importantes présentées au stade plantule » 4ème édition de Bailly et al. ainsi que le livre « Mauvaises herbes : combattre, déterminer exactement » de Bayer. Aucune différence n'a été observée entre les modalités. Étant donné la faible pression d'adventice, l'étude n'a pas été approfondie (Tableau S2).

Tableau S23 : Relevé des adventices.

Adventice	Nom scientifique	Nombre	Essai
Ray-grass d'Italie	<i>Lolium multiflorum</i> Lam.	1	E1
Gaillet gratteron	<i>Galium aparine</i> L.	2	
Fumeterre officinale	<i>Fumaria officinalis</i> L.	34	
Séneçon commun	<i>Senecio vulgaris</i> L.	2	E2
Escourgeon	<i>Hordeum vulgare</i> subsp. <i>hexastichum</i> (L.) Celak.	8	
Chrysanthème des moissons	<i>Chrysanthemum segetum</i> L.	1	
Petite Ciguë	<i>Aethusa cynapium</i> L.	1	



Figure S44 : Fumeterre officinale.



Figure S45 : Ray-grass d'Italie.



Figure S46 : Séneçon commun.



Figure S47 : Escourgeon.

Annexe 14 : Relevés des ravageurs et insectes.

Des observations visuelles de la présence de ravageurs et insectes ou de leurs dégâts ont été réalisées à partir du stade BBCH 30 jusqu'au stade BBCH 75 (Tableau S3). Comme la présence de ravageurs/insectes a montré uniquement de faibles dégâts sur la culture, l'étude n'a pas été approfondie.

Tableau S24 : Relevé de la présence de ravageurs/insectes dans les deux essais étudiés.

Ravageurs/insectes	Nom scientifique
Campagnol des champs	<i>Microtus arvalis</i> L.
Lièvre	<i>Lepus europaeus</i> L.
Bruant jaune	<i>Emberiza citrinella</i> L.
Criocère	<i>Oulema melanopus</i> L.
Chrysope verte	<i>Chrysoperla carnea</i> Stephens.
Syrphe	<i>Episyrphus balteatus</i> L.
Cantharide moine	<i>Cantharis rustica</i> Fallén.
Coccinelle	<i>Coccinella septempunctata</i> L.
Puceron/Puceron des épis	Famille Aphididae (<i>Sitobion avenae</i> <i>Fabricius des épis</i>)
Cicadelle des céréales	<i>Psammotettix alienus</i> Dahlbom.
Tipule	<i>Tipula</i> L.
Libellule	<i>Odonata Fabricius</i> .



Figure S20, 21 et 48 : Galeries de campagnol, lièvre et cantharide moine (de gauche à droite).



Figure S50 : Criocère (stade imago et larvaire).



Figure S51 : Coccinelle (stade imago et nymphal).



Figure S52 : Syrphe (stade imago et larvaire).



Figure S53 : Pucerons aptères et ailés.



Figure S54 : Cicadelle des céréales.



Figure S55 : Chrysope verte.

Annexe 15 : Tableaux des tests de normalité et d'égalité des variances des variables.

Les Tableaux S4, S5, S6 et S7 reprennent les tests de normalité et d'égalité des variances pour les principales variables étudiées. Au cours de cette étude, la majorité des variables présentent des données normales. Par ailleurs, l'égalité des variances est moins respectée au vu du faible nombre d'observations par répétition.

Tableau S25 : Synthèse des graphiques de normalité des variables selon les stades phénologiques pour l'essai 1.

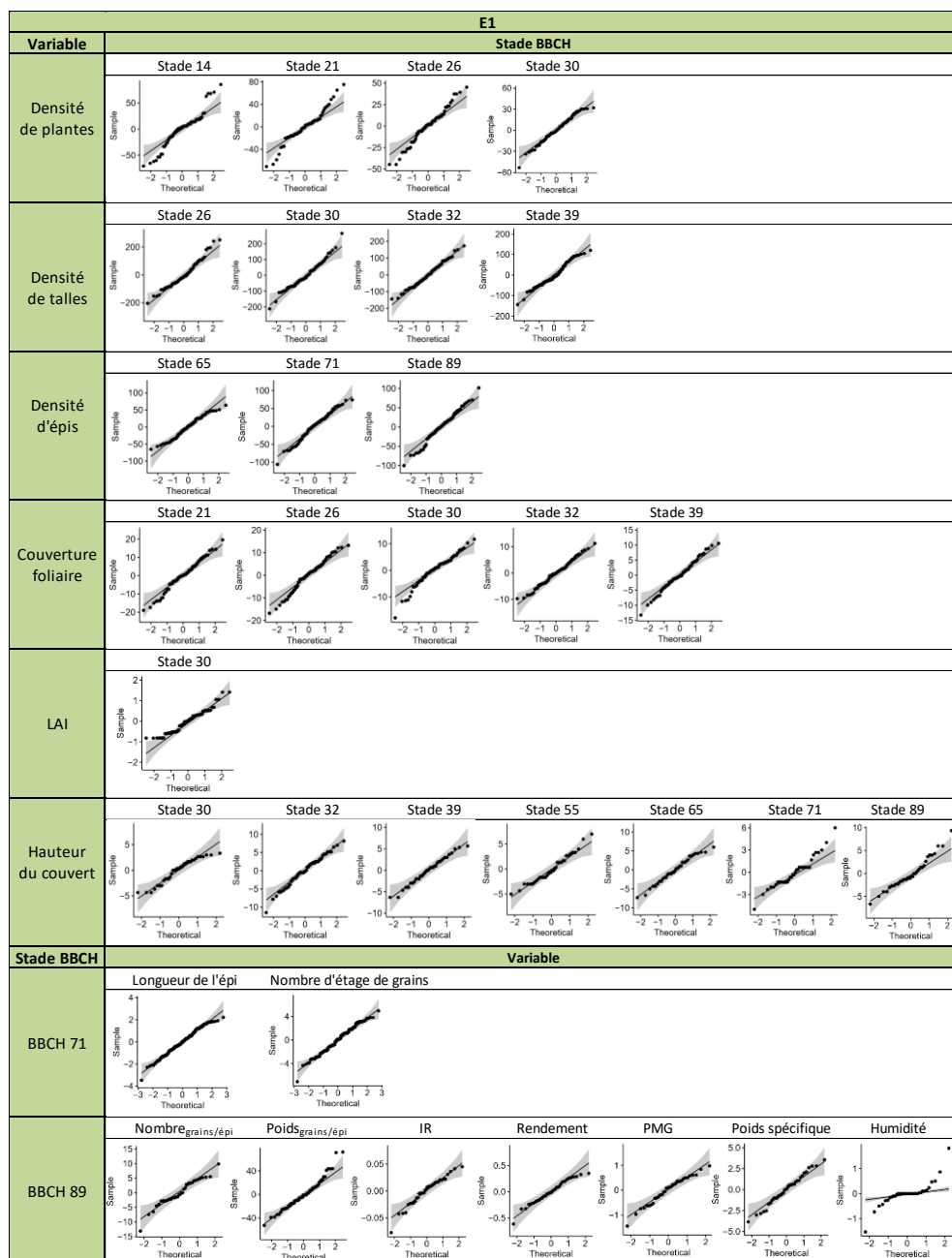


Tableau S26 : Synthèse des graphiques de normalité des variables selon les stades phénologiques pour l'essai 2.

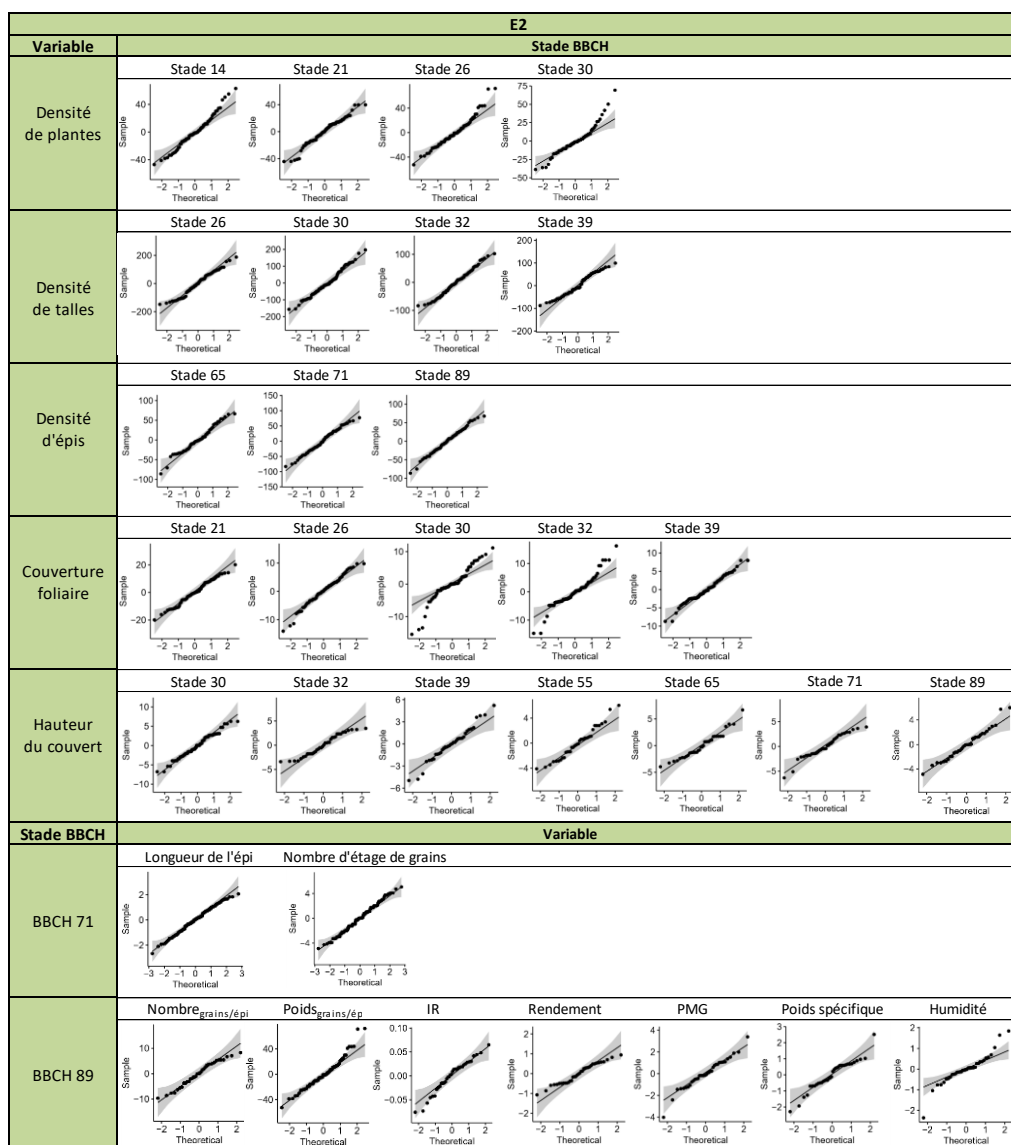


Tableau S27 : Synthèse des graphiques d'égalité des variances des variables selon les stades phénologiques pour l'essai 1.

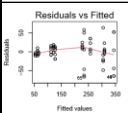
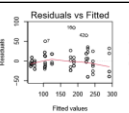
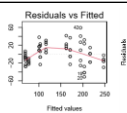
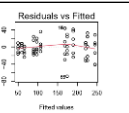
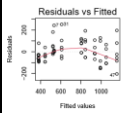
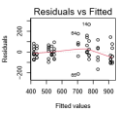
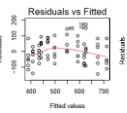
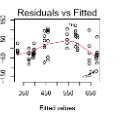
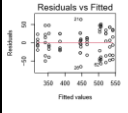
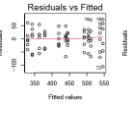
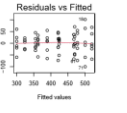
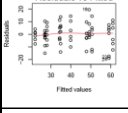
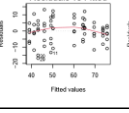
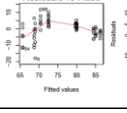
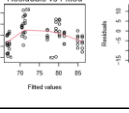
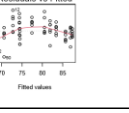
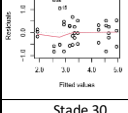
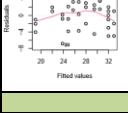
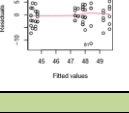
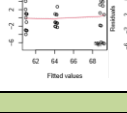
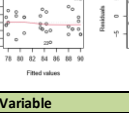
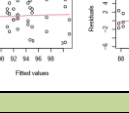
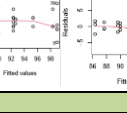
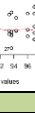
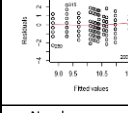
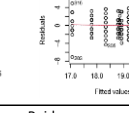
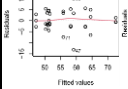
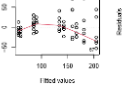
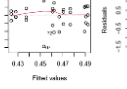
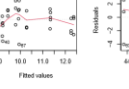
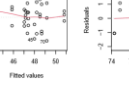
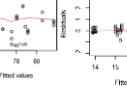

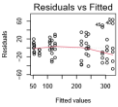
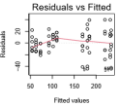
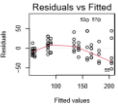
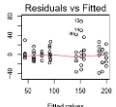
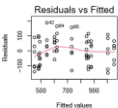
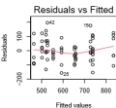
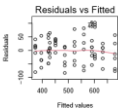
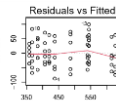
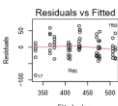
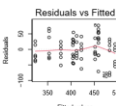
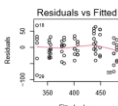
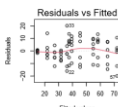
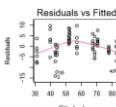
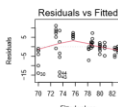
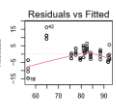
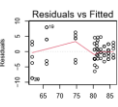
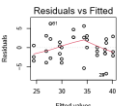
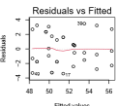
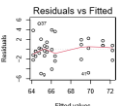

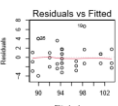
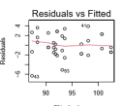
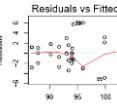
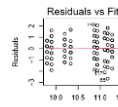
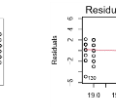
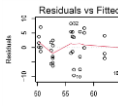
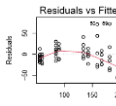
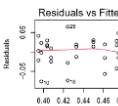
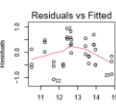
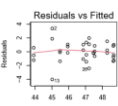
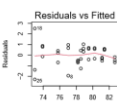
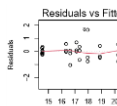
E1							
Variable	Stade BBCH						
Densité de plantes	Stade 14	Stade 21	Stade 26	Stade 30			
							
Densité de talles	Stade 26	Stade 30	Stade 32	Stade 39			
							
Densité d'épis	Stade 65	Stade 71	Stade 89				
							
Couverture foliaire	Stade 21	Stade 26	Stade 30	Stade 32	Stade 39		
							
LAI	Stade 30						
							
Hauteur du couvert	Stade 30	Stade 32	Stade 39	Stade 55	Stade 65	Stade 71	Stade 89
							
Stade BBCH	Variable						
BBCH 71	Longueur de l'épi		Nombre d'étage de grains				
							
BBCH 89	Nombregrains/épi	Poidsgrains/épi	IR	Rendement	PMG	Poids spécifique	Humidité
							

Tableau S28 : Synthèse des graphiques d'égalité des variances des variables selon les stades phénologiques pour l'essai 2.

E2	
Variable	Stade BBCH
Densité de plantes	Stade 14 Stade 21 Stade 26 Stade 30
	   
Densité de tiges	Stade 26 Stade 30 Stade 32 Stade 39
	   
Densité d'épis	Stade 65 Stade 71 Stade 89
	  
Couverture foliaire	Stade 21 Stade 26 Stade 30 Stade 32 Stade 39
	    
Hauteur du couvert	Stade 30 Stade 32 Stade 39 Stade 55 Stade 65 Stade 71 Stade 89
	      
Stade BBCH	Variable
BBCH 71	Longueur de l'épi Nombre d'étage de grains
	 
BBCH 89	Nombre grains/épi Poids grains/épi IR Rendement PMG Poids spécifique Humidité
	      

Annexe 16 : Tableau des résultats de la significativité des facteur étudiés issus des ANOVA pour les variables inférées des variables de base.

(Légende : *** : p-valeur très hautement significative ; ** : p-valeur hautement significative ; * : p-valeur significative)

Variable	Stade BBCH	E1			E2		
		Interaction Variété Densité	Facteur Variété	Facteur Densité semis	Interaction Variété Densité	Facteur Variété	Facteur Densité semis
Taux de levée	14		**			**	
Perte de plantes	14-21			***			***
Perte de plantes	21-30						
Perte de plantes	14-30			***			***
Regression _{talles}	26-39			***			***
Talles/plante	30/39		**	***			***
Talles/plante	30/30		**	***			***
Talles fertiles	71/39			***			***
Perte d'épis	65-89						
Epis/plante	89/30		*	***			***
Biomasse paille	89		**	***		***	
Densité de grains	89			***		***	***
Nombre _{grains/épillet}	89			***		**	*
Rendement _{théorique}	89					**	*

Annexe 17 : Tableaux des moyennes et écart-type des variables ainsi que les groupes des tests SNK pour les facteurs étudiés.

Tableau S29 : Moyennes et écart-type ainsi que les groupes des tests SNK des variables selon le facteur densité de semis.

Variable	Densité de semis	Essai 1									
		BBCH 14	BBCH 21	BBCH 26	BBCH 30	BBCH 32	BBCH 39	BBCH 55	BBCH 65	BBCH 71	BBCH 89
Densité de plantes (/m²)	400	313 ± 9 a	248 ± 8 a	210 ± 6 a	227 ± 5 a						
	300	246 ± 8 b	206 ± 9 b	189 ± 6 b	182 ± 7 b						
	150	123 ± 2 c	116 ± 5 c	118 ± 4 c	99 ± 4 c						
	75	56 ± 1 d	62 ± 2 d	59 ± 2 d	56 ± 2 d						
Densité de talles (/m²)	400			1028 ± 33 a	860 ± 21 a	639 ± 19 a	627 ± 13 a				
	300			901 ± 17 b	790 ± 27 b	624 ± 18 a	620 ± 10 a				
	150			600 ± 23 c	528 ± 12 c	494 ± 13 b	451 ± 16 b				
	75			354 ± 13 d	416 ± 11 d	380 ± 14 c	335 ± 6 c				
Densité d'épis (/m²)	400								522 ± 9 a	526 ± 13 a	496 ± 9 a
	300								502 ± 10 a	486 ± 10 b	457 ± 7 b
	150								426 ± 9 b	412 ± 9 c	391 ± 7 c
	75								338 ± 7 c	346 ± 9 d	326 ± 6 d
Hauteur (cm)	400				31 ± 0,6 a	48 ± 0,6	65 ± 1,2	85 ± 1,4	96 ± 1,3	94 ± 0,8	94 ± 0,7
	300				31 ± 0,7 a	47 ± 1,2	65 ± 1,2	84 ± 1,1	95 ± 1,3	94 ± 1,1	94 ± 1,0
	150				27 ± 0,7 b	47 ± 1,0	65 ± 1,2	84 ± 1,2	94 ± 1,0	93 ± 1,3	92 ± 0,9
	75				21 ± 0,9 c	46 ± 1,1	64 ± 1,0	83 ± 1,2	92 ± 0,9	92 ± 0,8	92 ± 0,7
Couverture foliaire (%)	400		54 ± 2,6 a	71 ± 1,2 a	83 ± 0,6 a	82 ± 0,6 a	85 ± 0,7 a				
	300		48 ± 2,4 b	56 ± 1,5 b	82 ± 0,4 a	81 ± 1,1 a	83 ± 0,9 a				
	150		33 ± 1,9 c	50 ± 2,0 c	77 ± 0,8 b	75 ± 0,9 b	79 ± 1,0 b				
	75		24 ± 1,4 d	40 ± 1,7 d	63 ± 1,6 c	53 ± 0,8 c	58 ± 1,3 c				
LAI	400				4,32 ± 0,2 a						
	300				4,08 ± 0,1 a						
	150				3,12 ± 0,1 b						
	75				2,42 ± 0,2 c						
Variable	Densité de semis	Essai 2									
		BBCH 14	BBCH 21	BBCH 26	BBCH 30	BBCH 32	BBCH 39	BBCH 55	BBCH 65	BBCH 71	BBCH 89
Densité de plantes (/m²)	400	307 ± 8 a	227 ± 5 a	176 ± 8 a	189 ± 4 a						
	300	229 ± 6 b	177 ± 6 b	154 ± 7 b	155 ± 7 b						
	150	119 ± 4 c	108 ± 3 c	95 ± 3 c	88 ± 3 c						
	75	57 ± 2 d	57 ± 2 d	49 ± 2 d	54 ± 2 d						
Densité de talles (/m²)	400			958 ± 29 a	789 ± 22 a	623 ± 11 a	582 ± 12 a				
	300			820 ± 21 b	651 ± 17 b	576 ± 17 b	545 ± 14 b				
	150			636 ± 17 c	557 ± 16 c	452 ± 9 c	415 ± 10 c				
	75			437 ± 19 d	506 ± 22 d	395 ± 11 d	369 ± 10 d				
Densité d'épis (/m²)	400								492 ± 8 a	464 ± 8 a	455 ± 5 a
	300								462 ± 7 b	461 ± 12 a	445 ± 6 a
	150								416 ± 9 c	397 ± 10 b	377 ± 5 b
	75								361 ± 10 d	361 ± 11 c	350 ± 6 c
Hauteur (cm)	400				38 ± 0,7 a	53 ± 1,0 a	67 ± 1,0	88 ± 1,4 a	97 ± 1,1 a	94 ± 1,2 a	96 ± 0,9 a
	300				36 ± 0,7 a	53 ± 0,5 a	67 ± 1,0	88 ± 1,4 a	96 ± 1,1 a	95 ± 1,3 a	95 ± 0,8 ab
	150				32 ± 0,9 b	50 ± 0,6 ab	67 ± 0,7	84 ± 1,2 b	96 ± 1,2 a	94 ± 1,1 a	92 ± 0,8 b
	75				26 ± 0,7 c	50 ± 0,7 b	66 ± 0,8	84 ± 1,3 b	92 ± 0,8 b	92 ± 1,3 b	92 ± 0,8 b
Couverture foliaire (%)	400		59 ± 3,3 a	74 ± 1,6 a	81 ± 0,5 a	Tableau 15					
	300		51 ± 3,7 b	67 ± 1,6 b	81 ± 0,3 a						
	150		36 ± 2,9 c	52 ± 1,7 c	80 ± 0,7 a						
	75		22 ± 1,6 d	36 ± 1,7 d	70 ± 1,8 b						

Tableau S30 : Moyennes et écart-type ainsi que les groupes des tests SNK pour les variables selon le facteur variété.

Variable	Choix variétal	Essai 1									
		BBCH 14	BBCH 21	BBCH 26	BBCH 30	BBCH 32	BBCH 39	BBCH 55	BBCH 65	BBCH 71	BBCH 89
Densité de plantes (/m²)	KWS Extase	174 ± 20 b	150 ± 15 b	134 ± 12 b	132 ± 14 b						
	Gedser	197 ± 23 a	179 ± 18 a	158 ± 14 a	151 ± 15 a						
	Moschus	182 ± 20 ab	144 ± 13 b	139 ± 12 b	139 ± 14 ab						
Densité de talles (/m²)	KWS Extase			701 ± 57 b	671 ± 42 a	567 ± 27 a	518 ± 27 a				
	Gedser			786 ± 61 a	657 ± 42 ab	536 ± 25 ab	529 ± 25 a				
	Moschus			675 ± 53 b	617 ± 38 b	499 ± 23 b	477 ± 28 b				
Densité d'épis (/m²)	KWS Extase								461 ± 17 a	452 ± 19 a	420 ± 17 a
	Gedser								462 ± 16 a	461 ± 15 a	443 ± 15 a
	Moschus								418 ± 15 b	415 ± 13 b	326 ± 14 b
Hauteur (cm)	KWS Extase				29 ± 0,9 a	48 ± 0,5 a	64 ± 0,5 b	84 ± 0,7 b	91 ± 0,5 b	91 ± 0,5 b	88 ± 0,3 c
	Gedser				28 ± 1,0 a	45 ± 0,9 b	61 ± 0,6 c	79 ± 0,5 c	93 ± 0,8 b	93 ± 0,3 b	93 ± 0,6 b
	Moschus				25 ± 1,2 b	49 ± 0,9 a	69 ± 0,9 a	89 ± 0,6 a	98 ± 1,0 a	98 ± 0,7 a	97 ± 0,6 a
Couverture foliaire (%)	KWS Extase		42 ± 3,1 a	58 ± 3,1 a	76 ± 1,7	76 ± 1,9	77 ± 1,8 b				
	Gedser		43 ± 3,3 a	58 ± 2,9 a	77 ± 1,7 a	74 ± 1,3 a	81 ± 1,3 a				
	Moschus		34 ± 2,5 b	54 ± 2,8 b	76 ± 2,0	75 ± 1,8	78 ± 1,7 ab				
LAI	KWS Extase				3,86 ± 0,3 a						
	Gedser				3,68 ± 0,2 a						
	Moschus				2,92 ± 0,1 b						
Variable	Choix variétal	Essai 2									
		BBCH 14	BBCH 21	BBCH 26	BBCH 30	BBCH 32	BBCH 39	BBCH 55	BBCH 65	BBCH 71	BBCH 89
Densité de plantes (/m²)	KWS Extase	183 ± 22 a	144 ± 14 ab	116 ± 11	127 ± 11 a						
	Gedser	184 ± 19 a	150 ± 13 a	127 ± 13 a	124 ± 11 a						
	Moschus	167 ± 19 b	133 ± 14 b	111 ± 9	112 ± 12 b						
Densité de talles (/m²)	KWS Extase			760 ± 47 a	672 ± 31 a	549 ± 22 a	496 ± 20 a				
	Gedser			732 ± 45 a	610 ± 22 b	509 ± 21 b	488 ± 23 a				
	Moschus			645 ± 37 b	596 ± 27 b	478 ± 19 c	451 ± 17 b				
Densité d'épis (/m²)	KWS Extase								457 ± 10 a	442 ± 11 a	426 ± 7 a
	Gedser								441 ± 12 a	434 ± 11 a	411 ± 8 a
	Moschus								401 ± 13 b	385 ± 12 b	383 ± 7 b
Hauteur (cm)	KWS Extase				35 ± 1,0 a	52 ± 0,5 b	66 ± 0,5 b	85 ± 0,7 b	91 ± 0,7 c	90 ± 0,7 c	89 ± 0,4 c
	Gedser				33 ± 1,0 ab	49 ± 0,6 c	65 ± 0,6 b	79 ± 0,4 c	94 ± 0,4 b	93 ± 0,6 b	94 ± 0,4 b
	Moschus				31 ± 1,4 b	54 ± 0,6 a	71 ± 0,5 a	91 ± 0,6 a	100 ± 0,6 a	100 ± 0,6 a	98 ± 0,7 a
Couverture foliaire (%)	KWS Extase		49 ± 4,1 a	62 ± 3,4 a	78 ± 1,4 ab						
	Gedser		48 ± 3,1 a	60 ± 2,8 a	79 ± 0,6 a						
	Moschus		30 ± 3,1 b	49 ± 3,2 b	76 ± 1,5 b						
	KWS Extase					91 ± 1,4 a	84 ± 0,6 a				
	Gedser 400					83 ± 0,6 c	86 ± 0,9 a				
	Moschus					87 ± 0,7 b	78 ± 1,5 b				
	KWS Extase					89 ± 0,9 a	83 ± 0,8 a				
	Gedser 300					83 ± 0,2 b	85 ± 0,8 a				
	Moschus					83 ± 1,3 b	77 ± 1,8 b				
	KWS Extase					86 ± 0,7 a	82 ± 1,1 a				
	Gedser 150					79 ± 0,7 b	83 ± 1,0 a				
	Moschus					76 ± 1,0 c	69 ± 2,1 b				
	KWS Extase					76 ± 0,2 a	80 ± 0,9 a				
	Gedser 75					74 ± 0,6 a	81 ± 1,2 a				
	Moschus					47 ± 2,0 b	59 ± 2,1 b				

Tableau S31 : Moyennes et écart-type ainsi que les groupes des tests SNK pour les variables selon la densité de semis et le choix variétal.

Essai	Source de variation	Etages grains/épi	Longueur épi _(cm)	Nombre grains/épi	Poids _(g) grains/épi	IR _(%)	Humidité (%)	Poids _(kg/hl) spécifique	PMG _(g)	Rendement (t/ha)
E1	400	18 ± 0,4 b	10,1 ± 0,2 bc	51 ± 1,0 c	2,0 ± 0,06 c	45 ± 0,9	15,3 ± 0,7 b	78,5 ± 0,8 b	45,9 ± 1,0 ab	11,4 ± 0,3 a
	300	18 ± 0,2 b	9,8 ± 0,2 c	49 ± 1,3 c	2,0 ± 0,08 c	45 ± 1,4 a	14,9 ± 0,4 b	79,1 ± 0,7 a	47,4 ± 0,6 ab	11,1 ± 0,4 a
	150	19 ± 0,4 a	10,4 ± 0,3 ab	57 ± 2,4 b	2,4 ± 0,13 b	46 ± 1,1	15,1 ± 0,3 b	78,0 ± 0,6 b	48,6 ± 0,7 a	10,2 ± 0,2 b
	75	19 ± 0,3 a	10,8 ± 0,3 a	66 ± 2,0 a	2,9 ± 0,06 a	48 ± 0,8	16,2 ± 0,6 a	75,8 ± 0,7 c	48,7 ± 0,8 a	8,7 ± 0,2 c
E2	400	19 ± 0,3	10,6 ± 0,2	51 ± 1,1 c	2,0 ± 0,07	45 ± 1,7	16,4 ± 0,6 b	80,0 ± 0,8 a	E2*	
	300	19 ± 0,3 a	10,8 ± 0,2 a	53 ± 1,8 bc	2,1 ± 0,08 a	45 ± 0,9	16,5 ± 0,6 b	79,4 ± 0,9 a		
	150	20 ± 0,1	10,9 ± 0,2	57 ± 2,2 ab	2,1 ± 0,12	43 ± 1,9 a	17,3 ± 0,8 ab	77,9 ± 0,9 b		
	75	20 ± 0,2	11,0 ± 0,2	60 ± 2,2 a	2,2 ± 0,09	43 ± 1,8	17,7 ± 1,0 a	76,1 ± 1,0 c		
E1	KWS Extase	19 ± 0,3 ab	10,3 ± 0,1 b	56 ± 2,3	2,5 ± 0,13 a	48 ± 0,7 a	14,0 ± 0,0 c	78,3 ± 0,4 b	48,3 ± 0,7	10,6 ± 0,4 a
	Gedser	18 ± 0,4 b	9,5 ± 0,2 c	55 ± 2,2 a	2,3 ± 0,12 b	47 ± 1,2 a	17,0 ± 0,5 a	75,4 ± 0,4 c	47,4 ± 1,0 a	9,7 ± 0,2 b
	Moschus	19 ± 0,3 a	10,9 ± 0,2 a	57 ± 2,9	2,3 ± 0,13 b	44 ± 0,7 b	15,2 ± 0,1 b	79,8 ± 0,5 a	47,2 ± 0,4	10,7 ± 0,4 a
E2	KWS Extase	20 ± 0,2	11,1 ± 0,1 a	54 ± 1,7 b	2,2 ± 0,07	48 ± 0,9 a	14,5 ± 0,1 c	79,6 ± 0,4 b		
	Gedser	19 ± 0,2 a	10,1 ± 0,1 b	58 ± 1,9 a	2,2 ± 0,09 a	44 ± 1,2 b	19,5 ± 0,5 a	74,9 ± 0,6 c		
	Moschus	20 ± 0,2	11,4 ± 0,1 a	54 ± 1,8 b	2,0 ± 0,08	40 ± 0,9 c	16,9 ± 0,2 b	80,5 ± 0,5 a		
E2*	400 KWS Extase								48,3 ± 0,5	14,4 ± 0,2 a
	400 Gedser								46,9 ± 0,7 a	13,7 ± 0,2 b
	400 Moschus								47,3 ± 0,5	13,4 ± 0,0 b
	300 KWS Extase								47,4 ± 2,3	14,3 ± 0,1 a
	300 Gedser								47,6 ± 0,5 a	13,7 ± 0,2 b
	300 Moschus								46,9 ± 0,4	12,9 ± 0,2 c
	150 KWS Extase								45,4 ± 1,3	13,1 ± 0,1 a
	150 Gedser								48,8 ± 0,4 a	13,2 ± 0,2 a
	150 Moschus								46,5 ± 0,6	11,5 ± 0,1 b
	75 KWS Extase								43,5 ± 0,7 b	11,1 ± 0,2 b
	75 Gedser								48,2 ± 0,8 a	11,0 ± 0,0 a
	75 Moschus								45,0 ± 0,0 b	10,2 ± 0,2 b

Annexe 18 : Port de plante.

Le test SNK souligne pour le facteur densité de semis que le port de plante est plus étalé pour les faibles densités de semis et plus dressé pour les densités de semis élevées avant et légèrement après la montaison (Tableau S11). Les variétés Moschus et Gedser présentent une précocité demi-tardive à la montaison contrairement à KWS Extase étant une variété demi-précoce. Cependant, la variété Gedser semble présenter un port plus dressé et une précocité à la montaison plus précoce tel que confirmé par la détermination des stades phénologiques. Ce constat est probablement dû à la variété, caractérisée comme une demi-hiver, contrairement aux autres variétés dites d'hiver (5.6.1 – Figure 8). Lorsque le port des plantes était encore non dressé, la couverture foliaire a pu être influencée à la hausse selon le facteur de la densité de semis. Cependant, l'influence du port était non suffisante afin de marquer une différence élevée dans les valeurs de la couverture foliaire à travers les analyses statistiques. Le port de plante peut également influencer la hauteur du couvert étant donné que la mesure est réalisée sans étirement des plantes.

Tableau S32 : Moyenne des cotations des ports de plante et groupes du test SNK selon les stades BBCH pour les deux essais confondus (*Légende : 9 ; port étalé à 1 ; port dressé*).

Port de plante	E1 et E2	BBCH 21		BBCH 26		BBCH 30		BBCH 32		BBCH 39	
Densité de semis	75	7	a	6	a	4	a	1,5	a	1	a
	150	6	b	4	b	2	b	1	b	1	
	300	5	c	3	c	1	c	1	b	1	
	400	5	c	2,5	d	1	c	1	b	1	
Variété	Moschus	6	a	5	a	2,5	a	1	a	1	a
	KWS Extase	5,5	b	4	b	2	b	1	a	1	
	Gedser	5	c	3	c	2	b	1		1	

Annexe 19 : Couverture foliaire.

Des différences significatives des moyennes de la couverture foliaire sont présentes entre les stades étudiés (Tableau 12). Pour l'E1, aucune interaction entre le facteur densité de semis et la variété n'a été observée. Des différences très hautement significatives des moyennes sont marquées selon la densité de semis. Au contraire, le facteur variété présente, selon certains stades, des différences des moyennes significatives (ou non). Dans l'E2, aucune interaction n'est présente entre les deux facteurs pour les stades 21, 26 et 30. Des différences significatives des moyennes entre les densités de semis et également entre les variétés sont observées. Aux stades 32 et 39, des interactions très hautement significatives sont marquées entre les deux facteurs (Tableau 13).

Au cours des stades de développement, la couverture foliaire a augmenté significativement depuis la sortie d'hiver jusqu'au stade dernière feuille, correspondant à la couverture foliaire maximale. En outre, il est toujours constaté que la densité de semis augmente la couverture foliaire. A titre d'exemple, en sortie d'hiver, la couverture foliaire variait de 22 à 24% et de 54 à 59% respectivement pour une densité de semis de 75 et de 400 grains/m². En effet, des faibles densités de talles entraînent une plus faible couverture foliaire (Baccar, 2011).

A partir du stade tallage jusqu'à la dernière feuille, aucune différence significative est observée entre les densités de semis 300 et 400 grains/m² dans l'E1 (Tableau 14). La couverture foliaire de la densité de semis de 75 grains/m² se distingue toujours fortement des autres densités avec des valeurs plus faibles autour de 60-70%.

L'E2 présente des interactions très hautement significatives entre la densité de semis et la variété aux stades 32 et 39 (Tableau 13). KWS Extase présente toujours une couverture plus élevée et Moschus une couverture plus faible quelle que soit la densité de semis. La variété Gedser présente des taux de couvertures, selon les densités de semis, similaires à KWS Extase ou à Moschus au stade 32. Cependant, à l'exception à une densité de semis de 400 gr/m², Gedser présente la couverture foliaire la plus faible. Au stade dernière feuille, cette variété présente, quelle que soit la densité de semis, des moyennes similaires à KWS Extase. Ces différences entre les variétés à travers les stades mettent en évidence les différences de densité de talles. En général, la densité de talles était plus élevée pour les variétés KWS Extase et Gedser, tout comme leur couverture foliaire (Tableau 15).

Annexe 20 : Indice de surface foliaire.

Aucune interaction entre la variété et la densité de semis n'est présente pour le LAI (Tableau 13). Les différences de moyennes sont très hautement significatives et hautement significatives respectivement pour le facteur densité de semis et variété.

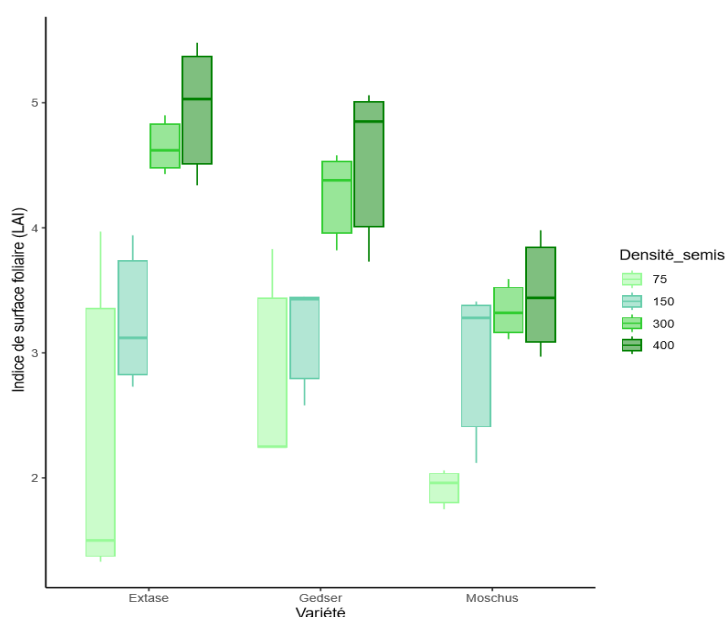


Figure S56 : Indice de surface foliaire selon la variété et la densité de semis pour l'E1.

Le LAI fait référence à la moitié de la surface foliaire interceptrice développée par unité de surface. Cette mesure ne présente pas d'unité mais est souvent exprimée en unité de surface foliaire par unité de surface de sol. Le LAI joue un rôle actif dans divers processus tels que la capture du rayonnement, la photosynthèse et l'évapotranspiration. En culture, les valeurs de LAI varient entre 2 à 6 (Kouadio, 2012). Les LAI maximales observées pour le blé d'hiver s'élèvent autour de 5 à 6 aux stades gonflement-épiaison. Ensuite, le LAI va chuter jusqu'à la récolte en raison de la maturité et de la sénescence de la plante (Shili-Touzi, 2009).

De plus, le LAI est un paramètre important qui reflète la surface photosynthétiquement active. Cette variable est également étudiée car elle indique la présence de stress abiotique et biotique tels qu'une faim d'azote. En effet, de nombreux stress tels que des déficits hydriques ou azotés peuvent se marquer à travers une réduction de la surface foliaire verte. La décoloration des feuilles entraîne la diminution du rayonnement intercepté par la plante (Perspectives agricoles, 2013a).

En outre, le LAI se différencie de la couverture foliaire en estimant la surface réelle des feuilles et non une projection 2D de la surface foliaire. La couverture foliaire et le LAI sont deux variables fortement corrélées (Dandrifosse et al., 2018). En effet, lors de cette étude, au stade 30, les deux variables ont présenté une corrélation élevée et des groupes des tests SNK similaires selon la densité de semis (Tableau 14).

Dans l'essai, le LAI augmente avec l'accroissement de la densité de semis, également souligné par Zhang et al (2023) (Figure S29). En effet, la surface foliaire par unité de sol augmente avec l'accroissement de la densité de semis en raison de la densité de plantes et de talles plus élevées. Les moyennes maximales et minimales observées au stade montaison sont respectivement 4,32 et 2,42 pour une densité de semis de 400 et 75 gr/m² (Tableau 14).

Concernant les variétés, KWS Extase et Gedser ont une moyenne similaire de 3,73 tandis que la variété Moschus a une moyenne de LAI plus faible de 2,92 (Tableau 15). La différence de LAI entre les variétés dans cette étude est principalement due à la différence de densité de plantes et talles. KWS Extase et Gedser ont tous deux présenté des densités de plantes et de talles plus élevées se distinguant de Moschus qui montrait des moyennes significativement plus faibles. En effet, le LAI est corrélé à 71% à la densité de plantes et de talles (Figure 30). Bien que la corrélation n'exprime pas la causalité, un nombre de plantes ou talles par unité de surface plus important traduit un LAI élevé (Baccar, 2011). Cependant, d'autres facteurs peuvent souligner des divergences entre les variétés à travers des tolérances différentes aux stress abiotiques et biotiques tels que les maladies (Perspectives agricoles, 2013a; Shili-Touzi, 2009). En outre, au stade 30, la surface foliaire observée pour toutes les variétés était quasi totalement photosynthétiquement active et présentait des symptômes inexistantes ou minimes de maladies ou autres stress physiologique.

Annexe 21 : Sénescence foliaire.

La notion d'étage foliaire est un paramètre important dans les prises des mesures notamment pour les maladies et la sénescence des feuilles (Figure S30).

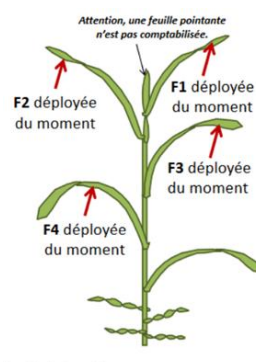


Figure S57 : Positionnement des feuilles sur les céréales (Arvalis et al., 2022).

Au stade mi-remplissage des grains, une différence très hautement significative du pourcentage de sénescence des feuilles entre les étages est observable dans les deux essais (Tableau 12). De plus, dans l'E1, le facteur densité de semis et le facteur variété présentent des différences très hautement significatives contrairement à l'E2 où des différences de moyennes sont observables uniquement entre les variétés.

La perte de la capacité photosynthétique des organes représente la sénescence. La vitesse de sénescence des dernières feuilles est un paramètre utilisé dans l'estimation précoce du rendement mais encore trop peu exploité à ce jour. En effet, des liens sont établis entre la durée du maintien de la surface verte des dernières feuilles déployées lors du remplissage des grains et le rendement. La sénescence est un phénomène

physiologique normal observé au cours du cycle de développement du blé. Cependant, divers facteurs peuvent la favoriser tels que le froid, la sécheresse, l'ombrage, des déficits nutritifs, etc. Les feuilles se développent en fonction de l'intensité lumineuse et de la température. La sénescence peut donc se refléter à travers ces deux paramètres. Elle dépend principalement de l'âge de feuille, du stress hydrique et de l'effet d'ombrage (Kouadio, 2012).

La sénescence des feuilles diffère fortement selon l'étage des feuilles (Tableau 12). Au plus la feuille se trouve dans un étage inférieur à l'épi, au plus sa sénescence est avancée. Les effets de la densité de semis sur le taux de sénescence sont divergents d'un stade à l'autre. Au stade 71, la sénescence des feuilles augmente avec l'accroissement de la densité de semis. Au contraire, à partir du stade 75 jusqu'à la récolte, celle-ci diminue avec l'augmentation de la densité de semis (Tableau S12).

Des différences entre les taux de sénescence sont marquées selon la variété mais principalement lorsque la feuille est en cours de sénescence. Au stade 71, KWS Extase présente des taux de sénescence supérieurs aux autres variétés variant de 50 à 79% en F3 selon l'essai contrairement à Moschus ayant les taux de sénescence les plus faibles allant de 31 à 41%. En outre, Moschus est la variété présentant la densité d'épis la plus faible. Une plus faible densité d'épi favorise une meilleure perception des rayonnements dans les étages inférieurs à cause d'un effet d'ombrage moindre en comparaison aux autres variétés. La variété Gedser se situe dans un cas intermédiaire avec des moyennes similaires soit à KWS Extase ou à Moschus. Après le stade 71, la variété Gedser souligne des taux de sénescence inférieurs en raison de sa précocité tardive à la maturité. Ces différences entre les variétés peuvent être dues à de nombreux facteurs tels que leurs différences génétiques comme leur précocité et leurs réponses aux stress environnementales.

Tableau S33 : Moyennes et groupes des tests SNK du taux de sénescence selon facteurs étudiés, l'étage foliaire, le stade et l'essai.

Etage foliaire	Densité de semis	E1								E2							
		BBCH 71	BBCH 75	BBCH 87	BBCH 89	BBCH 71	BBCH 75	BBCH 87	BBCH 89	BBCH 71	BBCH 75	BBCH 87	BBCH 89	BBCH 71	BBCH 75	BBCH 87	BBCH 89
F1	400	0	47	90	100	0	42	83	100	0	42	83	100	0	42	83	100
	300	0	55	93	100	0	47	84	100	0	47	84	100	0	47	84	100
	150	0	58	92	100	0	48	87	100	0	48	87	100	0	48	87	100
	75	0	59	90	100	0	56	90	100	0	56	90	100	0	56	90	100
F2	400	5	84	99	100	3	74	100	100	3	74	100	100	3	74	100	100
	300	0,7	87	100	100	3	74	99	100	3	74	99	100	3	74	99	100
	150	0,2	90	100	100	1	76	100	100	1	76	100	100	1	76	100	100
	75	2	94	100	100	2	80	100	100	2	80	100	100	2	80	100	100
F3	400	51	99	100	100	63	100	100	100	63	100	100	100	63	100	100	100
	300	43	100	100	100	52	100	100	100	52	100	100	100	52	100	100	100
	150	31	100	100	100	54	100	100	100	54	100	100	100	54	100	100	100
	75	28	100	100	100	54	100	100	100	54	100	100	100	54	100	100	100
F4	400	99	100	100	100	99	100	100	100	99	100	100	100	99	100	100	100
	300	97	100	100	100	99	100	100	100	99	100	100	100	99	100	100	100
	150	93	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	75	98	100	100	100	97	100	100	100	97	100	100	100	97	100	100	100
Etage foliaire	Choix variétal	E1								E2							
		BBCH 71	BBCH 75	BBCH 87	BBCH 89	BBCH 71	BBCH 75	BBCH 87	BBCH 89	BBCH 71	BBCH 75	BBCH 87	BBCH 89	BBCH 71	BBCH 75	BBCH 87	BBCH 89
F1	KWS Extase	0	51	100	100	0	56	92	100	0	56	92	100	0	56	92	100
	Gedser	0	48	75	100	0	30	74	100	0	30	74	100	0	30	74	100
	Moschus	0	66	99	100	0	58	93	100	0	58	93	100	0	58	93	100
F2	KWS Extase	4	88	100	100	5	84	100	100	5	84	100	100	5	84	100	100
	Gedser	2	85	99	100	2	61	99	100	2	61	99	100	2	61	99	100
	Moschus	0	94	100	100	1	83	100	100	1	83	100	100	1	83	100	100
F3	KWS Extase	50	100	100	100	79	100	100	100	79	100	100	100	79	100	100	100
	Gedser	39	100	100	100	49	100	100	100	49	100	100	100	49	100	100	100
	Moschus	31	99	100	100	40	100	100	100	40	100	100	100	40	100	100	100
F4	KWS Extase	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	Gedser	97	100	100	100	99	100	100	100	99	100	100	100	99	100	100	100
	Moschus	94	100	100	100	98	100	100	100	98	100	100	100	98	100	100	100

Annexe 22 : Hauteur du couvert.

Des différences significatives des moyennes de la hauteur du couvert sont présentes entre les stades phénologiques (Figure S31 et Tableau 12). Aucune interaction est observée entre le facteur variété et le facteur densité de semis. Les moyennes sont significativement différentes entre les variétés dans les deux essais. Selon le stade, le facteur densité de semis a des moyennes significativement différentes ou non. Après le stade montaison, l'E1 ne présente plus aucune différence des moyennes selon la densité de semis contrairement à l'E2 où des différences significatives sont parfois présentes (Tableau 13).

La hauteur du couvert s'accroît au fur et à mesure des stades de développement. Au stade 30, les moyennes des hauteurs augmentent avec l'accroissement de la densité de semis pour les deux essais. En effet, avant la montaison, la densité de semis favorise un port plus dressé des plantes entraînant des hauteurs du couvert supérieures (Annexe 18).

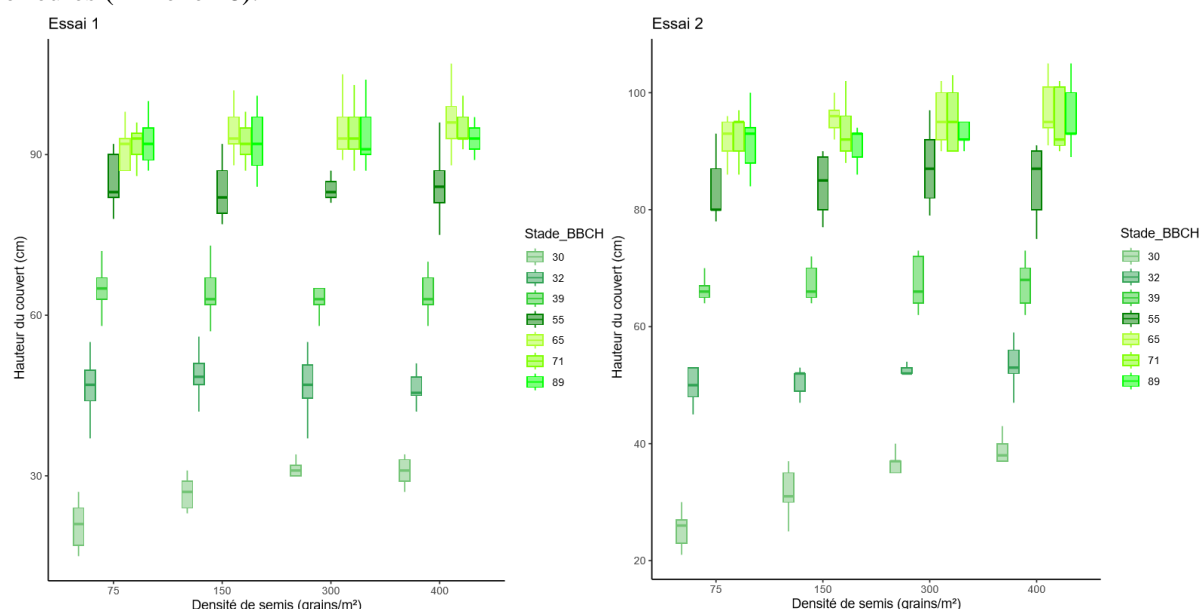


Figure S58 : Boxplots de la hauteur du couvert en fonction de la densité de semis selon les stades.

Dans l'E2, la hauteur augmente avec l'accroissement de la densité de semis. Au stade floraison, la densité 75 gr/m² présente une hauteur plus faible de 92 cm contrairement aux densités 150, 300 et 400 gr/m² avec une moyenne de 96 cm. En effet, des accroissement de hauteur de plante avec l'augmentation de la densité de semis sont également observés dans d'autres études (Bourak, 2018; Ma et al., 2018).

Quant aux différences entre les variétés, les moyennes varient selon les stades et les tendances divergent, notamment en raison des caractéristiques variétales. Cependant, il est observé qu'au stade 30, la variété Moschus présente une hauteur plus faible que KWS Extase et Gedser dans les deux essais, mais qu'à partir du stade 32, la variété présente toujours une hauteur plus élevée. En général, Gedser présente les moyennes les plus faibles parmi les 3 variétés. KWS Extase présente des hauteurs similaires à Gedser ou intermédiaires entre les deux autres variétés. Les trois variétés ont pour caractéristique d'avoir une hauteur de plante moyenne (Jorion Philip-Seeds, 2023). Cependant, il est important de souligner que les essais ont été menés en pratique conventionnelle et que des régulateurs de croissance ont été appliqués à certains stades. Les variétés présentent des réponses différentes aux régulateurs de croissance bien qu'elles sont toutes caractérisées par la même hauteur de plante. D'après les hauteurs, Gedser et Moschus ont une résistance aux régulateurs de croissance respectivement la plus faible et la plus élevée. La variété Gedser était la plus avancée en sortie d'hiver par son alternativité demi-hiver et a été la plus impactée face aux régulateurs. Au

contraire, Moschus était la variété la moins avancée en sortie d'hiver de par son alternativité dite hiver et sa précocité à la montaison tardive. Celle-ci a été moins impactée par les régulateurs.

Annexe 23 : Indice de récolte et biomasses.

La différence non significative de l'IR est expliquée dans l'E1 à cause de la diminution significative des poids de grains et de la biomasse de la paille avec l'augmentation de la densité de semis. Dans l'E2, le poids de grains et la biomasse de la paille étaient non significatives avec la densité de semis (Tableau 16 et Annexe 16). Le ratio des poids des grains et de la biomasse de la paille a entraîné cette différence non significative de l'IR avec la densité de semis (Tableau 13).

L'IR est fortement relié à la hauteur de la paille influençant la biomasse étant la plus élevée et la plus faible respectivement pour Moschus et KWS Extase (Miralles et al., 2007). La biomasse de la paille a un effet significatif selon la densité de semis uniquement dans l'E1 où celle-ci présente une valeur plus élevée à une densité de semis de 75 gr/m² contrairement aux densités 150, 300 et 400 gr/m² présentant des moyennes similaires.

L'augmentation du rendement est proportionnelle à la biomasse aérienne entraînant de faibles variations de l'IR tel qu'observé lors de cette étude (Bahlouli et al., 2008). Étant donné que la remobilisation des réserves stockées dans les tiges contribue de 10 à 34% au rendement en grains, une biomasse aérienne plus importante traduit un transfert d'assimilats stockés plus élevé aux grains et donc influence le poids des grains et le rendement (Bahlouli et al., 2008 ; Slafer et al., 2023).

Annexe 24 : Mesures post récolte.

Aucune interaction n'est présente pour le PMG, l'humidité et le poids spécifique entre les deux facteurs étudiés dans l'E1 contrairement à l'E2 où une interaction est significative pour le PMG. En l'absence d'interaction, les trois variables ont présenté des différences significatives selon la densité de semis (Tableau 13).

En effet, l'humidité augmente avec la diminution de la densité de semis (Tableau 16 et Figure S32). Ces différences peuvent être expliquées par un stress hydrique plus important à des densités de semis plus élevées en raison de la plus forte densité d'épis au sol. La concurrence pour l'eau est nettement plus marquée à des densités d'épis élevées influençant par conséquent une dessiccation des grains plus rapidement qu'à de faibles densités de semis. En outre, KWS Extase et Gedser sont respectivement les variétés avec l'humidité la plus faible et la plus élevée (Tableau 16). Cette humidité plus élevée pour Gedser peut être mise en lien à sa caractéristique variétal à sa précocité tardive à la maturité.

Quant au poids spécifique, la tendance est que la variable augmente avec l'accroissement de la densité de semis (Tableau 16 et Figure S34). Moschus présente le poids spécifique le plus élevé et Gedser le plus faible tel que le confirme leurs caractéristiques variétales. La période de remplissage des grains est influencée par de nombreux facteurs environnementaux. Le stress hydrique plus élevé, le manque de lumière, la concurrence pour les ressources, etc. sont plus importants à des densités d'épis élevées et par conséquent peut influencer la réduction de la période de remplissage de grains. En outre, le mois de juin était caractérisé comme chaud et sec. Les grains peuvent donc atteindre plus rapidement leur maturité à des densités de semis

élevées. Le poids spécifique plus faible à de faibles densités de semis peut donc être expliqué en partie par une maturité incomplète mais également par la présence d'eau plus élevée dans les grains tel que confirmé par la mesure de l'humidité.

Concernant le PMG, les valeurs entre les densités de semis restent relativement similaires dans l'E1 (Figure S33). Le PMG n'a pas souligné de différences significatives bien que selon les caractéristiques variétales, Gedser a le PMG le plus élevé. Dans l'E1, le PMG diminue avec l'accroissement de la densité de semis. Au contraire, l'E2 souligne une interaction pour le PMG entre les deux facteurs étudiés (Tableau 13). Contrairement à l'E1, le PMG tend à augmenter avec l'accroissement de la densité de semis dans l'E2, excepté pour Gedser. La seule différence significative entre les variétés est présente à la plus faible densité de semis où Gedser a le meilleur PMG.

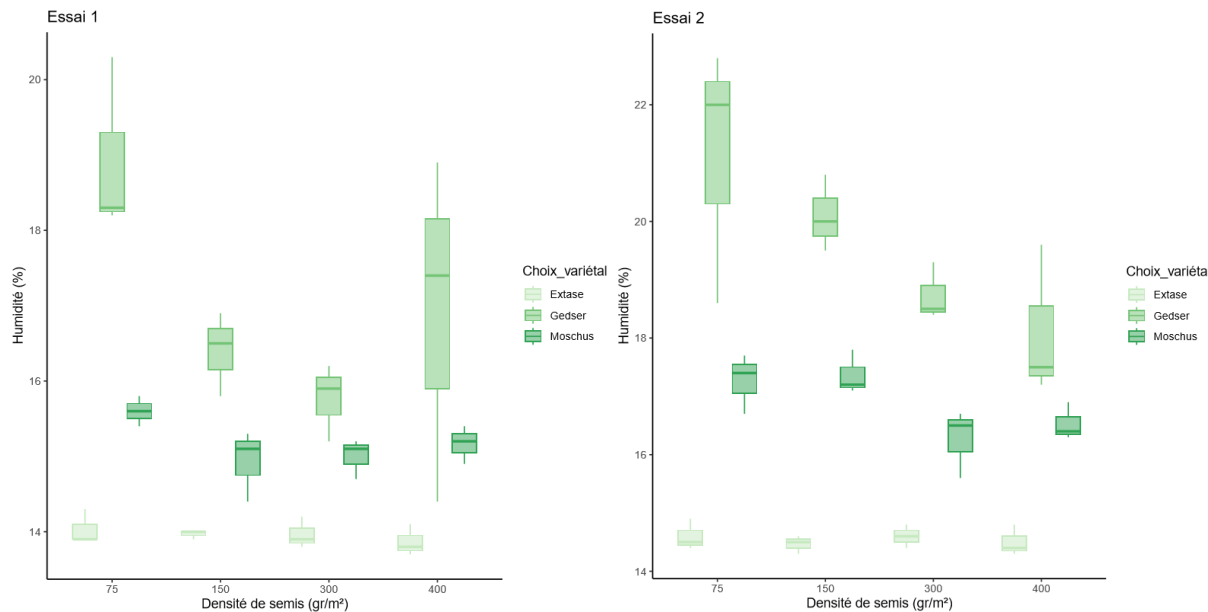


Figure S59 : Boxplots de l'humidité des grains selon la densité de semis et le choix variétal.

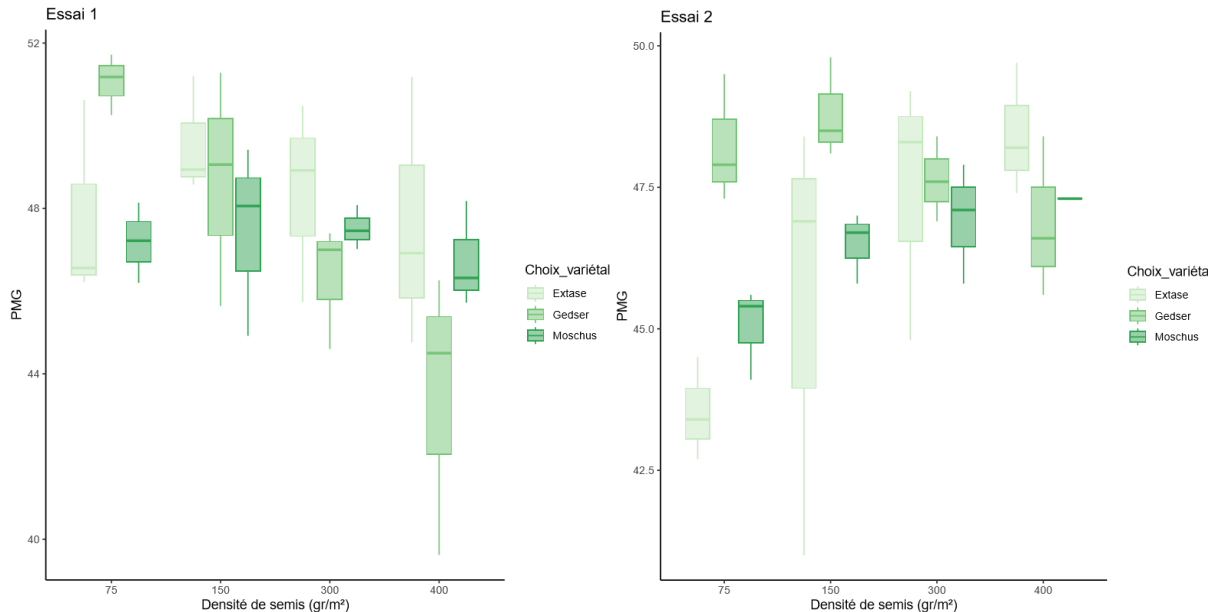


Figure S60 : Boxplots du PMG selon la densité de semis et le choix variétal.

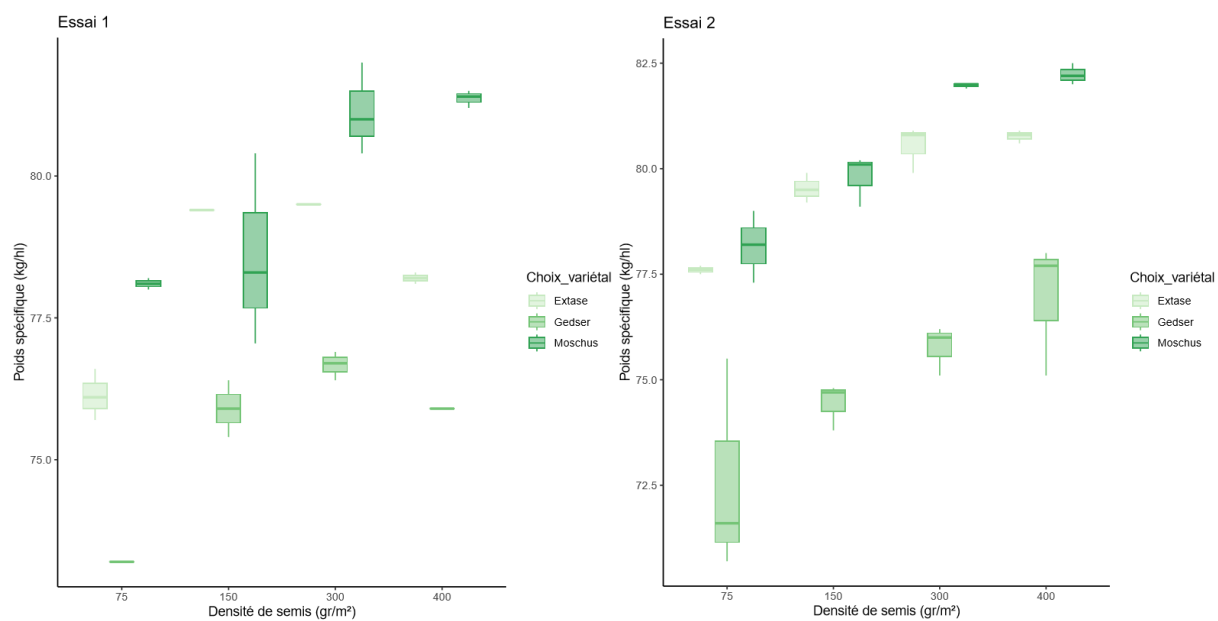


Figure S61 : Boxplots du poids spécifique des grains selon la densité de semis et le choix variétal.

Annexe 25 : Graphique des régressions, de courbes de densité ainsi que les corrélations pour les essais confondus et séparés entre les variables.

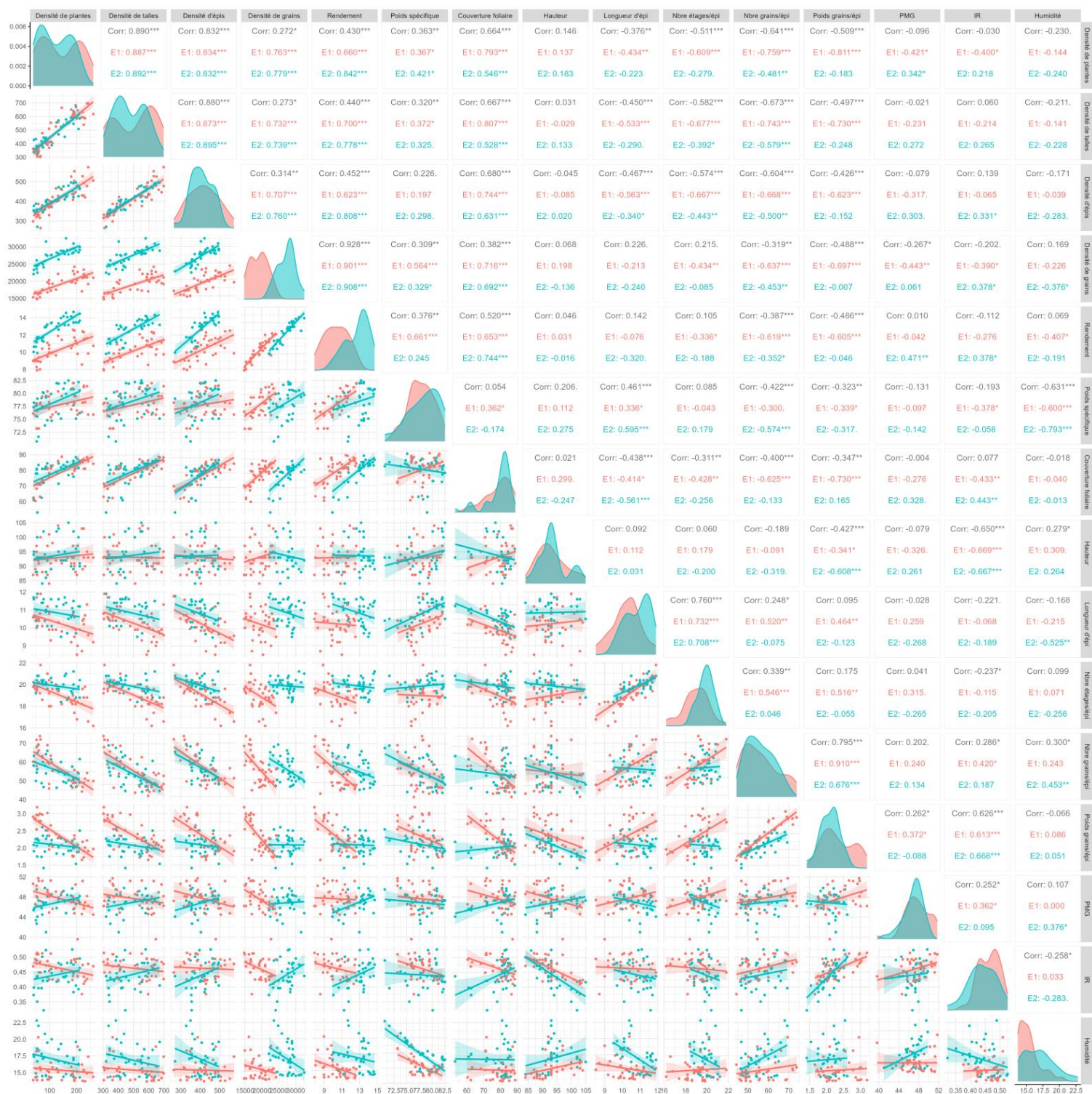


Figure S62 : Synthèses des corrélations entre les variables pour les essais confondus et pour chacun des essais ainsi que leur degré de significativité, graphiques des courbes de densité et des régressions linéaires entre les variables pour les deux essais.

