

---

## Caractérisation du potentiel fourrager du KENZA (*Thinopyrum intermedium*) sous différents régimes de fauches et associations végétales en sciences agronomiques

**Auteur :** Villé, Lucas

**Promoteur(s) :** Dumont, Benjamin; Fagnant, Laura

**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/2268.2/18240>

---

### *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.*

---



# **Caractérisation du potentiel fourrager du Kenza (*Thinopyrum intermedium*) sous différents régimes de fauches et associations végétales**

Lucas VILLÉ

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

**ANNÉE ACADÉMIQUE 2022-2023**

**Promoteur : BENJAMIN DUMONT**

**Co-promoteur : LAURA FAGNANT**





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

Le présent document n'engage que son auteur.



# **Caractérisation du potentiel fourrager du Kenza (*Thinopyrum intermedium*) sous différents régimes de fauches et associations végétales**

Lucas Villé

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

**ANNÉE ACADÉMIQUE 2022-2023**

**Promoteur : BENJAMIN DUMONT**

**Co-promoteur : LAURA FAGNANT**



## Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mon promoteur, Benjamin Dumont pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce travail de fin d'études. Je suis très reconnaissant de tous vos conseils et votre aide apportée concernant l'utilisation du logiciel Matlab. Sans vous, l'utilisation du modèle prédictif sur Matlab aurait été beaucoup plus compliquée.

Ensuite, je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers ma co-promotrice Laura Fagnant. Les remerciements sont trop nombreux que pour tous les citer. Sans elle, ce travail n'aurait pas été le même. Sa disponibilité, son aide et ses précieux conseils tout au long du TFE ont joué un rôle essentiel dans la réussite de ce travail. Je tiens également à la remercier pour tous ces bons moments passés, que ce soit lors des prélèvements au champ ou bien lors du tri et du comptage des tiges de Kernza. Enfin, je la remercie de m'avoir permis de découvrir cette incroyable plante qu'est le Kernza !

Je tiens également à remercier le professeur Yves Beckers pour ses conseils concernant les valeurs fourragères ainsi que pour ces deux années de master en Sciences agronomiques.

En outre, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers Sylvie Mabilie pour son aide incroyable lors de la réalisation de mes manipulations en laboratoire. Elle m'a été d'une très grande aide. De plus, sa disponibilité et sa patience m'ont permis d'engranger de l'expérience de travail en laboratoire. C'est une personne pleine de gentillesse, qui ne dit jamais non pour aider son prochain et qui a toujours été disponible, même lorsque je m'y prenais à la dernière minute. Merci d'avoir accepté de mouliner les échantillons et d'avoir préparé avec moi les cupules. Je remercie également l'équipe de zootechnie pour leur accueil et pour m'avoir invité à participer au FAC TROPHY avec vous.

Mes remerciements s'étendent également à Virginie Decruyenaere, pour m'avoir fourni les prédictions infrarouges des légumineuses nécessaires à la réalisation de mon travail ainsi que pour avoir répondu à mes questions au sujet des résultats obtenus.

Je tiens également à adresser mes remerciements à la team "Openspace": Mathieu, Arthur, Christophe, Pierre, Noémie, Camille, Ophélie et Laura. Partager ce bureau avec vous a été essentiel afin de me motiver lors de ces nombreuses heures de rédaction ou de codage. Merci pour votre soutien, vos encouragements et les nombreuses réponses que vous avez apportés à mes questions.

Je remercie également particulièrement Simon Biver et Stéfan Kalla pour leur soutien et leur amitié depuis la BAC1. Nous avons passé 6 années incroyables au sein des murs de Gembloux. Merci également à Valentin Champenois pour cet incroyable second quadri passé dans les murs de zootechnie.

Enfin, je remercie aussi Isabelle Léonard pour son aide concernant la relecture de mon travail à la recherche des moindres fautes d'orthographe et de français.

## Résumé

La culture de Kernza, également connue sous le nom d'agropyre intermédiaire (*Thinopyrum intermedium*), incarne une perspective novatrice dans le domaine de l'agriculture durable. En tant que céréale vivace, elle se distingue des cultures traditionnelles en offrant une gamme d'avantages environnementaux précieux. L'une de ses caractéristiques les plus notables est son système racinaire profond, qui joue un rôle essentiel dans la préservation des sols et la séquestration du carbone. Ce système racinaire améliore également l'efficacité de l'utilisation de l'eau et des nutriments, contribuant à une meilleure gestion des ressources. De plus, le Kernza est une céréale vivace qui présente une double valorisation, produisant à la fois des grains et du fourrage de qualité, maximisant ainsi l'utilisation de la récolte. Sa résilience naturelle et son impact positif sur la biodiversité en font une option prometteuse pour promouvoir la durabilité à long terme. Alors que les recherches et le développement continuent d'améliorer les rendements et les avantages de cette culture, il est clair que le Kernza pourrait jouer un rôle clé dans la transformation de notre système alimentaire en un système plus équilibré et écologiquement responsable. Ce travail vise tout d'abord à valider un modèle de prédiction des valeurs fourragères du Kernza par spectrométrie infrarouge. Ensuite, il évalue la gestion de fauches du Kernza en association avec des légumineuses, tout en considérant différents schémas de récolte et de valorisation, se basant sur une analyse de la quantité et de la qualité du fourrage produit. Les résultats montrent une augmentation du fourrage produit au cours de la saison culturale accompagnée d'une diminution de la qualité de ce dernier. Concernant l'association des légumineuses au Kernza, le trèfle blanc se distingue en offrant la meilleure qualité de fourrage, mais en produisant une quantité plus limitée. En revanche, la luzerne et le trèfle violet présentent également une bonne qualité tout en générant un volume plus important de fourrage. Cependant, elles s'avèrent trop compétitives par rapport au Kernza, contrairement au trèfle blanc. Enfin, la gestion purement fourragère, bien qu'elle préserve une meilleure qualité, génère une quantité de fourrage insuffisante pour justifier cette conduite.

**Mots-clés :** Kernza – *Thinopyrum intermedium* – Légumineuse – Rendement fourrager – SPIR – Constituant fourrager – Valeur alimentaire

## Abstract

Kernza, also known as intermediate wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*), represents an innovative approach to sustainable agriculture. As a perennial cereal, it stands out from traditional crops by offering a range of valuable environmental benefits. One of its most notable features is its deep root system, which plays an essential role in soil preservation and carbon sequestration. This root system also improves water and nutrient use efficiency, contributing to better resource management. In addition, Kernza is a perennial cereal with dual value, producing both high-quality grains and fodder, maximising harvest utilization. Its natural resilience and positive impact on biodiversity make it a promising option for promoting long-term sustainability. As research and development continues to improve the yields and benefits of this crop, it is clear that Kernza could play a key role in transforming our food system into a more balanced and ecologically responsible one. The aim of this work is firstly to validate a predictive model for Kernza's forage values using infrared spectroscopy. Subsequently, it assesses the mowing management of Kernza in conjunction with legumes, considering various harvest and valorization schemes based on an analysis of both quantity and quality of the fodder produced.

The results show an increase in fodder production during the growing season, accompanied by a decrease in its quality. Regarding the association of legumes with Kernza, white clover stood out as offering the highest quality forage, but producing a more limited quantity. Alfalfa and red clover, on the other hand, also demonstrate good quality while yielding a larger volume of forage. However, they prove to be overly competitive with Kernza, unlike white clover. Finally, although pure forage management preserves better quality, it generates insufficient forage to justify it.

**Keywords:** Kernza - *Thynopyrum intermedium* – Legume – Forage Yield – NIRS - Forage Constituent – Feed Value

## **Liste des abréviations**

ADF : Acid Detergent Fiber

ADL : Acid Detergent Lignin

CB : Cellulose Brute

CP : Crude protein

DMO : Digestibilité de la Matière Organique

DVE : Darm Verteerbaar Eiwit

IWG : intermediate wheatgrass

MAT : Matières Azotées Totales

MS : Matière Sèche

MSa : Matière Sèche analytique

ND: Normalized Difference

NDF : Neutral Detergent Fiber

OEB: Onbestendige Eiwit Balans

RMSE: Root Mean Square Deviation

RPD: Ratio of Performance to Deviation

SD: Standard Deviation

SEC: Standard Error of Calibration

SEP: Standard Error of Prediction

SPIR : Spectrométrie Proche Infrarouge

VEM : VoederEenheid Melk

VEVI : VoederEenheid Vleesvee Intensief

## **Table des matières**

1	Mise en contexte .....	1
1.1	Dans le monde.....	1
1.1.1	État des lieux de la situation mondiale .....	1
1.1.2	Conversion de terres vierges ou cultivées sous système pérenne au profit des céréales annuelles et problèmes associés.....	1
1.1.3	Désavantages des cultures annuelles.....	2
1.1.4	L'avantage des espèces pérennes .....	2
1.2	En Belgique .....	3
2	État de l'art.....	3
2.1	Origine .....	3
2.2	Sélection et rendement en grains .....	3
2.3	Services écosystémiques .....	4
2.4	Double valorisation du Kernza .....	4
2.5	Production fourragère.....	5
2.5.1	Rendement .....	5
2.5.2	Impact de la valorisation fourragère sur le rendement en grains.....	6
2.5.3	Association avec légumineuses .....	6
2.6	Objectif du TFE .....	7
3	Matériel et méthode .....	9
3.1	Sites expérimentaux.....	9
3.2	Prélèvements de la biomasse aérienne .....	10
3.3	Variables observées.....	11
3.4	Mouture des échantillons .....	11
3.5	Analyses chimiques .....	11
3.5.1	Matière sèche analytique.....	11
3.5.2	Teneur en cendres totales.....	11
3.5.3	Matières azotées totales (MAT) .....	11
3.5.4	Dosage des constituants pariétaux .....	12
3.5.5	Digestibilité de la matière organique .....	12
3.6	Spectrométrie proche infrarouge.....	12
3.7	Modèle prédictif des valeurs fourragères – Prédiction et Validation .....	12
3.7.1	Évaluation qualité du modèle prédictif : .....	12
3.8	Calcul des valeurs énergétiques et protéiques .....	13

3.9	Software et traitement statistique.....	13
3.9.1	Étude de l'effet du stade et de l'association.....	14
3.9.2	Étude de l'effet de la fauche.....	14
4	Résultats.....	15
4.1	Spectrométrie infrarouge – Modèle prédictif.....	15
4.2	Analyse de la matière sèche produite.....	18
4.2.1	Conduite pour la production de grains.....	18
4.2.1.1	Performance du Kernza.....	18
4.2.1.2	Performance des légumineuses.....	19
4.2.1.3	Performance du mélange Kernza-légumineuses.....	19
4.2.1.4	Composantes de rendement du Kernza.....	20
4.2.1.5	Impact de la verse sur l'essai.....	21
4.2.2	Conduite pour la production de fourrage.....	22
4.2.2.1	Performance du Kernza.....	22
4.2.2.2	Performance des légumineuses.....	22
4.2.2.3	Performance du mélange Kernza-légumineuses.....	22
4.2.3	Composition et production totale cumulée au stade BBCH65.....	22
4.2.3.1	Biomasse totale cumulée du Kernza.....	22
4.2.3.2	Biomasse totale cumulée des légumineuses.....	23
4.2.3.3	Biomasse totale cumulée du mélange Kernza-légumineuses.....	23
4.2.3.4	Proportion de Kernza et de légumineuses dans le mélange.....	25
4.3	Analyse de la qualité de la matière sèche.....	25
4.3.1	Conduite pour la production de grains.....	26
4.3.1.1	Qualité du Kernza.....	26
4.3.1.2	Qualité des légumineuses.....	26
4.3.1.3	Qualité du mélange Kernza-légumineuses.....	27
4.3.2	Conduite pour la production de fourrage.....	28
4.3.2.1	Qualité du Kernza.....	28
4.3.2.2	Qualité des légumineuses.....	29
4.3.2.3	Qualité du mélange Kernza-légumineuses.....	30
4.4	Gestion des adventices.....	35
5	Discussion.....	36
5.1	Spectrométrie proche infrarouge – Modèle prédictif.....	36
5.2	Quantité de fourrage produite.....	36
5.2.1	Conduite pour la production de grains.....	36
5.2.2	Conduite pour la production de fourrage.....	37

5.3	Qualité du fourrage produite .....	39
5.3.1	Conduite pour la production de grains.....	39
5.3.2	Conduite pour la production de fourrage .....	40
5.4	Composante du rendement du Kernza .....	41
5.5	Comparaison des trois modalités de fauche .....	41
5.6	Gestion des adventices.....	42
6	Conclusion et perspectives.....	43
7	Contribution personnelle de l'étudiant.....	45
8	Bibliographie.....	46
9	Annexes : .....	50

## **Table des figures**

<b>Figure 1</b> : Schéma du déroulement de l'essai selon les différents facteurs.....	9
<b>Figure 2</b> : Représentation graphique des résultats de calibration et validation des 8 constituants sélectionnés.....	16
<b>Figure 3</b> : Longueurs d'onde sélectionnées à l'aide des $\beta$ -coefficients afin de caractériser au mieux chaque constituant.....	17
<b>Figure 4</b> : Poids sec du Kernza au cours de son cycle de développement pour chaque association selon les trois traitements de fauche.....	18
<b>Figure 5</b> : Poids sec des légumineuses à chaque stade et pour chaque association selon les trois traitements de fauche.....	19
<b>Figure 6</b> : Poids sec du mélange Kernza-légumineuses à chaque stade de développement et pour chaque association selon les trois traitements de fauche.....	20
<b>Figure 7</b> : Nombre d'épis/m <sup>2</sup> du Kernza pour chaque association au stade BBCH65. Les lettres représentent les résultats du test SNK pour l'effet association.....	21
<b>Figure 8</b> : Cotation de la verse réalisée sur l'ensemble des parcelles de l'essai K21-01 le 26/06/2023	22
<b>Figure 9</b> : Matière sèche totale cumulée du Kernza au Stade BBCH65 pour chaque association selon les trois modalités de fauche.....	23
<b>Figure 10</b> : Matière sèche totale cumulée du mélange Kernza-légumineuses au stade BBCH65 pour chaque association selon les trois modalités de fauche.....	24
<b>Figure 11</b> : Répartition de la matière sèche totale cumulée au stade BBCH65 selon le type de culture (Kernza ou Légumineuse) pour les trois modalités de fauche.....	24
<b>Figure 12</b> : Évolution des teneurs en protéines (CP) du Kernza au cours de la saison culturale selon les trois modalités de fauche.....	28
<b>Figure 13</b> : Évolution de la quantité de VEM du Kernza au cours de la saison culturale selon les trois modalités de fauche.....	29
<b>Figure 14</b> : Évolution du taux de protéines (CP) du mélange Kernza-légumineuses au cours de la saison culturale selon les trois modalités de fauche.....	31
<b>Figure 15</b> : Évolution du taux d'NDF du mélange Kernza-légumineuses au cours de la saison culturale selon les trois modalités de fauche.....	31
<b>Figure 16</b> : Évolution du taux d'OMD du mélange Kernza-légumineuses au cours de la saison culturale selon les trois modalités de fauche.....	32
<b>Figure 17</b> : Évolution de la quantité de VEM du mélange Kernza-légumineuses au cours de la saison culturale selon les trois modalités de fauche.....	33
<b>Figure 18</b> : Évolution de la quantité de VEVI du mélange Kernza-légumineuses au cours de la saison culturale selon les trois modalités de fauche.....	33
<b>Figure 19</b> : Évolution de la quantité de DVE du mélange Kernza-légumineuses au cours de la saison culturale selon les trois modalités de fauche.....	34
<b>Figure 20</b> : Évolution de la quantité d'OEB du mélange Kernza-légumineuses au cours de la saison culturale selon les trois modalités de fauche.....	34
<b>Figure 21</b> : État des parcelles de chaque association pour la modalité visant une production fourragère peu de temps après la troisième fauche réalisée le 28 juin 2023.....	38

## **Table des tableaux**

<b>Tableau 1</b> : Rendements et valeurs nutritives de <i>Thinopyrum intermedium</i> à différentes saisons (Fagnant et al., 2023) .....	5
<b>Tableau 2</b> : <i>caractéristiques du site expérimental et des échantillons analysés</i> .....	10
<b>Tableau 3</b> : Dates de prélèvement des échantillons .....	11
<b>Tableau 4</b> : Critères caractérisant les performances du modèle prédictif employé pour ce TFE .....	15
<b>Tableau 5</b> : Moyennes de la matière sèche totale cumulée des mélanges de Kernza-légumineuses au stade BBCH65 pour les facteurs association et fauche .....	25
<b>Tableau 6</b> : Analyse ANOVA et tableau des moyennes du pourcentage de Kernza et de légumineuses présent au sein du mélange au stade BBCH65.....	25

## **Table des annexes**

<b>Annexe 1</b> : Plan expérimental + tableau reprenant les modalités de chaque facteur .....	50
<b>Annexe 2</b> : Opérations culturales réalisées sur l'essai K21-01.....	50
<b>Annexe 3</b> : Synthèse des analyses ANOVA réalisées pour caractériser la biomasse sèche du Kernza (PS K et PS TOT K) .....	51
<b>Annexe 4</b> : Synthèse des analyses ANOVA réalisées pour caractériser la biomasse sèche des légumineuses (TB, TV et L) .....	51
<b>Annexe 5</b> : Synthèse des analyses ANOVA réalisées pour caractériser la biomasse sèche des mélanges Kernza-légumineuses .....	52
<b>Annexe 6</b> : Synthèse des analyses ANOVA réalisées pour caractériser le nombre d'épis par mètre carré du Kernza au stade BBCH65 .....	52
<b>Annexe 7</b> : Synthèse des analyses ANOVA réalisées pour caractériser le nombre de talles par mètre carré du Kernza.....	52
<b>Annexe 8</b> : Moyennes du poids sec du Kernza au cours du cycle de développement de développement pour chaque association et stade .....	53
<b>Annexe 9</b> : Matière sèche moyenne des légumineuses pour chaque modalité du facteur Stade et du facteur Association.....	53
<b>Annexe 10</b> : Valeurs moyennes de la matière sèche produite par chaque mélange Kernza-légumineuses sous différentes modalités de fauche aux différents stades .....	53
<b>Annexe 11</b> : Moyennes de la matière sèche produite par les mélanges Kernza-légumineuses pour les facteurs association et stade pour la modalité fauche 1 .....	54
<b>Annexe 12</b> : Matière sèche totale cumulée du Kernza pour chaque association en fonction des trois modalités de fauche .....	54
<b>Annexe 13</b> : Tableau synthétique reprenant l'ANOVA 1 de la matière sèche totale des légumineuses pour chaque modalité du facteur fauche.....	54
<b>Annexe 14</b> : Nombre moyen de talles de Kernza par mètre carré selon les différents facteurs.....	55
<b>Annexe 15</b> : Nombre moyen d'épis de Kernza par mètre carré pour chaque modalité du facteur Fauche et du facteur Association .....	55
<b>Annexe 16</b> : Synthèse des analyses ANOVA (AV2) réalisées pour caractériser les constituants fourragers ainsi que les valeurs énergétiques et protéiques du Kernza, des légumineuses et des mélanges Kernza-légumineuses .....	56
<b>Annexe 17</b> : Synthèse des analyses ANOVA (AV1) réalisées pour caractériser les constituants fourragers ainsi que les valeurs énergétiques et protéiques des légumineuses .....	57
<b>Annexe 18</b> : Synthèse des analyses ANOVA (AV1) réalisées pour caractériser les constituants fourragers ainsi que les valeurs énergétiques et protéiques du Kernza et des mélanges Kernza-légumineuses.....	58
<b>Annexe 19</b> : Moyennes des constituants fourragers et des valeurs énergétiques et protéiques du Kernza pour chaque association et stade selon les trois modalités de fauche.....	59
<b>Annexe 20</b> : Moyennes des constituants fourragers des légumineuses pour chaque association et stade selon les trois modalités de fauche .....	60
<b>Annexe 21</b> : Moyennes des valeurs énergétiques et protéiques des légumineuses pour chaque association et stade selon les trois modalités de fauche .....	61
<b>Annexe 22</b> : Moyennes des constituants fourragers des mélanges Kernza-légumineuses pour chaque association et stade selon les trois modalités de fauche .....	62
<b>Annexe 23</b> : Moyennes des valeurs énergétiques et protéiques des mélanges Kernza-légumineuses pour chaque association et stade selon les trois modalités de fauche.....	63

# 1 Mise en contexte

## 1.1 Dans le monde

### 1.1.1 État des lieux de la situation mondiale

Au cours des quatre dernières décennies, la population mondiale s'est accrue de 3,3 milliards de personnes, soit une augmentation de 90 %. Et même si le taux de croissance annuel (1,1 %) est désormais inférieur à ce qu'il a déjà été auparavant, la population mondiale devrait encore augmenter de près de 2,3 milliards de personnes entre 2009 et 2050 (U.N. Food and Agricultural Organization, 2009). Les projections de la FAO prévoient une population mondiale atteignant 9,7 milliards d'habitants d'ici 2050 et 11,2 milliards d'ici 2100. La majorité de cette croissance est attendue au niveau des pays en développement avec une augmentation de 1,05 milliard de personnes en Afrique subsaharienne entre 2019 et 2050 (U.N. Food and Agricultural Organization, 2009; Crist et al., 2017; Sutherlin et al., 2019). La croissance d'une classe mondiale consommatrice est également un facteur important à prendre en considération. En effet, cette dernière a augmenté de plusieurs centaines de millions de personnes au cours des 20 dernières années. En 2016, cette classe moyenne mondiale était estimée à 3,2 milliards de personnes et elle devrait atteindre les 5 milliards d'ici 2030 (Crist et al., 2017). Cela influencera également l'accroissement de la consommation mondiale. En effet, l'accès à des moyens financiers plus importants modifie totalement les habitudes alimentaires de ces personnes. Dès lors, ils consommeront plus de protéines et de viande, de produits transformés et emballés et leur régime alimentaire sera également plus diversifié avec une demande en produits provenant des quatre coins du monde (Crist et al., 2017).

Pour répondre aux besoins alimentaires de cette population grandissante, la production alimentaire devra elle aussi être vue à la hausse. Une augmentation de la production d'environ 70 % est attendue entre 2005 et 2050 et devrait même doubler, voire tripler d'ici 2100 (Crist et al., 2017). Même si les rendements des cultures céréalières ont été multipliés par deux depuis 1950, cela n'est pas suffisant (Pimentel et al., 2012 ; Sutherlin et al., 2019). En effet, la demande en céréales destinées à l'alimentation humaine et animale va, elle aussi, augmenter pour atteindre approximativement 3 milliards de tonnes d'ici 2050. Cela représente une augmentation de près d'un milliard de tonnes par rapport aux 2,1 milliards de tonnes produites en 2005/07. La production de viande devrait également augmenter de plus de 200 millions de tonnes d'ici 2050 afin de nourrir cette population (U.N. Food and Agricultural Organization, 2009). Pour cela, 1 milliard d'hectares de terres supplémentaires seraient nécessaires pour répondre aux besoins alimentaires de cette population grandissante (Pimentel et al., 2012 ; Sutherlin et al., 2019)

Or, à l'heure actuelle, le système alimentaire mondial dépend énormément des cultures annuelles. 70 % des terres cultivées mondiales sont destinées à des cultures annuelles (Cox et al., 2006 ; Glover et al., 2010 ; Pimentel et al., 2012 ; Sutherlin et al., 2019), principalement composées de céréales annuelles, d'oléagineux et de légumineuses (Li et al., 2020). Ces dernières fournissent 80 % de la nourriture mondiale et sont dominées par les cultures céréalières (Pimentel et al., 2012). Cheng et al., (2017) précisent d'ailleurs que les deux tiers de la nourriture mondiale d'origine végétale sont produits par uniquement 3 céréales majeures : le maïs (*Zea mays*), le blé (*Triticum aestivum*) et le riz (*Oryza sativa*).

### 1.1.2 Conversion de terres vierges ou cultivées sous système pérenne au profit des céréales annuelles et problèmes associés

Au cours des dernières décennies, l'allocation des terres a considérablement changé. Selon l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, les terres cultivées sont passées

de 1,35 milliard d'hectares en 1961 à 1,56 milliard d'hectares en 2020. De leur côté, les terres dédiées aux prairies et aux pâturages permanents sont passées de 3,09 milliards d'hectares en 1961 à 3,18 milliards d'hectares en 2020. Ce changement est tel qu'à l'heure actuelle, l'agriculture est principalement tournée vers des espèces annuelles implantées en cultures pures sur de grandes superficies (Cox et al., 2006 ; Dewar, 2007 ; "FAOSTAT," March -11-2023).

Cependant, ces changements d'allocations n'ont pas été les mêmes partout dans le monde. Cette expansion des terres agricoles s'est principalement produite au niveau des tropiques alors qu'elle a diminué dans les zones tempérées. L'expansion des terres au niveau des tropiques s'explique principalement (80 %) par la déforestation (Foley et al., 2011). Les forêts tropicales jouent pourtant un rôle très important en termes de biodiversité et de services écosystémiques. La déforestation est également une cause majeure d'émissions de gaz à effet de serre avec près de 12 % des émissions anthropiques totales de CO<sub>2</sub>. Néanmoins, les forêts tropicales ne sont pas les seules zones ciblées. La savane et les forêts feuillues tempérées sont également défrichées au profit de l'agriculture, tout comme certaines prairies qui sont reconverties en zones de cultures (Foley et al., 2011). La révolution agricole ayant eu lieu au cours du 20<sup>e</sup> siècle a aussi eu un impact sur l'allocation des terres agricoles. Cette dernière a engendré un remaniement complet du système de production qui est passé à un système de production intensif, avec un travail du sol beaucoup plus fréquent. Il y a également eu une reconversion des terres vers une production de cultures annuelles, principalement constituée de cultures céréalières à destination de la consommation humaine et animale (Dewar, 2007 ; Cox et al., 2010 ; Tautges et al., 2018).

### 1.1.3 Désavantages des cultures annuelles

Cependant, un système de production basé uniquement sur des cultures annuelles possède diverses contraintes. Certes, le rendement en grains de ces cultures est plus élevé que celui des cultures pérennes, mais cela est souvent associé à un travail du sol plus important, une fertilisation fractionnée et répartie sur la période de culture, une utilisation de produits phytosanitaires de synthèse et parfois même un recours à de l'irrigation (Cox et al., 2006 ; Li et al., 2020).

De plus, les cultures annuelles engendrent également divers impacts négatifs sur l'environnement. L'azote nitrique provenant de la fertilisation des cultures peut être lessivé vers les eaux souterraines et contaminer ces dernières, ce qui pollue de nombreux écosystèmes aquatiques ainsi que les sources d'eau potable. Une perte de la matière organique, un épuisement du sol, un lessivage des nutriments ainsi qu'un risque d'érosion peuvent être causés par un travail répété du sol en présence de cultures annuelles (Favre et al., 2019 ; Jungers et al., 2019 ; Sutherlin et al., 2019 ; Li et al., 2020). Celles-ci sont également responsables d'un déstockage de carbone dans les régions où les prairies sont converties en faveur de l'agriculture. Concernant les zones où un déboisement est réalisé au profit de l'agriculture, c'est une augmentation des émissions de gaz à effet de serre qui a lieu (Tautges et al., 2018). En revanche, la mise en place de cultures vivaces représente une alternative utile afin de limiter certains de ces impacts négatifs tout en améliorant la durabilité du système agricole (Jungers et al., 2017 ; Favre et al., 2019).

### 1.1.4 L'avantage des espèces pérennes

L'implantation de plantes vivaces dans les systèmes de production agricole pourrait être une solution afin de réduire une partie des impacts négatifs des cultures annuelles tout en apportant de nombreux services écosystémiques. Premièrement, de par leur système racinaire profond et dense ainsi que leur implantation pluriannuelle, les cultures pérennes améliorent l'infiltration de l'eau ainsi que son utilisation et celle des nutriments. Dietzel et al., (2015) précisent d'ailleurs que chez les plantes vivaces, l'allocation de la biomasse racinaire est 2 à 4 fois supérieure à celle des plantes annuelles. De plus, les cultures vivaces permettent également d'apporter une couverture permanente du sol, ce qui diminue

l'érosion du sol tout en augmentant le taux de matière organique et l'activité microbienne du sol. Cela permet aussi de réduire le lessivage des nitrates et la perte de nutriments par ruissellement. Le facteur pérennité joue également sur l'apport d'intrants. En effet, les plantes vivaces requièrent généralement moins de fertilisation, ce qui favorise la réduction des émissions de gaz à effet de serre ainsi que le lessivage chimique des substances apportées à la culture. Selon Jungers et al. (2019), cela a pour conséquence de réduire les émissions de protoxyde d'azote. En outre, grâce à leur repousse sur plusieurs années, ces cultures permettent de réduire le travail du sol, la main-d'œuvre ainsi que la consommation de carburant. Enfin, ces cultures peuvent être implantées au niveau de terres marginales, à forte pente ou bien sur des surfaces érodées, permettant ainsi de tirer profit de ces zones moins accessibles et à plus faible productivité (Lee et al., 2009 ; Pimentel et al., 2012 ; Dietzel et al., 2015 ; Jungers et al., 2017, 2019 ; Dick et al., 2018 ; Tautges et al., 2018 ; Sutherlin et al., 2019 ; Li et al., 2020, 2021 ; Locatelli et al., 2022 ; The Land Institute, March -11-2023). Les systèmes de cultures vivaces ont donc de nombreux avantages afin de lutter contre les problèmes environnementaux et la crise liée au réchauffement climatique (Li et al., 2020).

## 1.2 En Belgique

En Belgique, au cours de l'année 2021, 44,6 % de la superficie du territoire belge était occupée par des terres agricoles, ce qui représente près de 1 368 315 ha (« Chiffres clés de l'agriculture 2022 | Statbel,» March-5-2023). Au sein de cette superficie, ce sont les cultures fourragères qui sont les plus présentes avec 56,4 % de la superficie agricole utilisée, suivie par les céréales avec 22,7 %. Les cultures fourragères sont donc les plus représentées avec 771 404 ha au sein desquels les prairies permanentes (61,74 %) et les prairies temporaires (12,35 %) sont majoritaires. À elle seule, la Wallonie dispose de 65 % des prairies permanentes du pays. En 2022, les chiffres étaient plus ou moins semblables avec 474 630 ha dédiés aux prairies permanentes (« Chiffres clés de l'agriculture 2022 | Statbel, »).

## 2 État de l'art

### 2.1 Origine

L'agropyre intermédiaire [IWG ; *Thinopyrum intermedium* (Host) Barkworth & DR Dewey] est l'une des premières céréales vivaces à avoir été sélectionnée génétiquement dans le but d'améliorer son rendement grains (Favre et al., 2019 ; Duchene et al., 2021 ; Li et al., 2021 ; The Land Institute, March-11-2023). À l'origine, l'agropyre avait été sélectionné pour répondre aux besoins de l'élevage aux États-Unis afin de fournir du fourrage pour le bétail. Par la suite, il fut domestiqué pour sa production de grains à destination de l'alimentation humaine (The Land Institute, March-11-2023) notamment grâce aux différents services écosystémiques qu'il procure (Fagnant et al., 2023). La sélection d'agropyre intermédiaire a commencé pour la première fois en 1988 aux États-Unis (Tautges et al., 2018). Celui-ci est aujourd'hui sélectionné et amélioré au sein de *the Land Institute* (Salina, Kansas, États-Unis). Il est également commercialisé sous le nom de Kernza (Jungers et al., 2017, 2019 ; Sutherlin et al., 2019 ; Li et al., 2020 ; Duchene et al., 2021 ; The Land Institute, March-11-2023), ce qui fait donc de l'agropyre intermédiaire la première céréale pérenne commercialisée en Amérique du Nord (Hunter et al., 2020). D'après Pimentel et al., (2012), cette dernière produirait des grains à haute valeur nutritive accompagnés d'une bonne saveur gustative. Ces mêmes auteurs ajoutent aussi la présence d'attributs favorables à une bonne récolte mécanique telle que la présence de chaumes raides et droits ainsi qu'une maturation synchrone des graines de Kernza.

### 2.2 Sélection et rendement en grains

Les objectifs de sélection de cette céréale sont multiples, avec pour principal but l'augmentation du rendement en grains en sélectionnant la taille de ceux-ci (Jungers et al., 2017 ; Tautges et al., 2018 ; Sutherlin et al., 2019). À cela, viennent s'ajouter d'autres traits comme l'uniformité de la culture, la

capacité de battage ainsi que la résistance à l'égrenage (Jungers et al., 2019 ; Duchene et al., 2021). Le nombre de grains par épis est également un paramètre ciblé par les sélectionneurs selon Duchene et al., (2021) et Locatelli et al., (2022). Suite à cette récente sélection, une amélioration des rendements a déjà pu être constatée. Néanmoins, le rendement de l'agropyre reste encore nettement inférieur au rendement du blé annuel (Tautges et al., 2018). Li et al., (2020) ajoutent que la taille des graines d'agropyre correspond généralement à 20 % de celle du froment conventionnel. Cependant, selon Tautges et al. (2018), le rendement d'agropyre pourrait atteindre les valeurs de celui du froment d'ici une vingtaine d'années si le travail mis en œuvre pour améliorer le rendement reste sur la même trajectoire. Enfin, l'un des derniers points forts de cette sélection est la longévité et la stabilité de la culture d'agropyre. En effet, celle-ci reste implantée pour une période variant de deux à cinq ans, tout en ayant la capacité de résister aux étés secs ainsi qu'aux hivers froids, le tout en produisant des grains chaque année (Pimentel et al., 2012).

Néanmoins, l'un des désavantages persistants de l'agropyre intermédiaire est un déclin de son rendement en grains avec le temps. Une diminution significative est observée à partir de la seconde année de récolte de la culture (Jungers et al., 2017 ; Tautges et al., 2018 ; Hunter et al., 2020 ; Li et al., 2020). Tautges et al. (2018) évoquent même des baisses de rendement en grains pouvant atteindre 75 % à partir de la seconde année d'implantation de la culture. Encore une fois, le but des sélectionneurs est d'améliorer le rendement de la culture.

### 2.3 Services écosystémiques

L'agropyre intermédiaire étant une plante vivace, elle dispose des avantages généraux des cultures pérennes et son implantation apporte divers services écosystémiques. Son système racinaire profond lui permet d'aller prélever l'eau au niveau des couches plus profondes du sol. L'un des gros avantages de ce type de système racinaire est sa capacité à résister au stress hydrique en conservant une humidité du sol plus importante. Cela accroît donc l'efficacité d'utilisation de l'eau tout au long du cycle cultural de la plante. Sutherlin et al. (2019) ajoutent également que par rapport à ses homologues annuels, le système racinaire de l'agropyre favorise de meilleurs taux d'évapotranspiration ainsi qu'une absorption nette de carbone plus élevée. En effet, l'agropyre est un puissant puits à carbone et possède également l'avantage de minéraliser une grande quantité de carbone dans le sol (Sutherlin et al., 2019). Cette plante possède aussi la capacité de tallage et est munie de rhizomes courts (Sutherlin et al., 2019 ; Hunter et al., 2020 ; Clément et al., 2022). Les apports d'engrais azotés peuvent également être réduits, limitant ainsi les coûts économiques de la culture (Favre et al., 2019 ; Fagnant et al., 2023).

### 2.4 Double valorisation du Kernza

Certes, à l'heure actuelle, les rendements en grains de l'agropyre sont nettement inférieurs à ceux d'un froment annuel (Tautges et al., 2018), mais celui-ci a l'avantage de pouvoir fournir une double valorisation (Dick et al., 2018 ; Favre et al., 2019 ; Li et al., 2021). En effet, en plus d'une production de grains en saison estivale, la plante peut également être récoltée sous forme de coupes printanières et automnales afin de produire du fourrage vert de qualité. Lors de la production de grains, il fournit aussi une quantité non négligeable de résidus de culture pouvant servir de paille (Favre et al., 2019). Le côté multifonctionnel de l'agropyre est donc un avantage non négligeable pour promouvoir cette culture tout en augmentant sa productivité et sa rentabilité économique (Dick et al., 2018 ; Favre et al., 2019 ; Li et al., 2021).

## 2.5 Production fourragère

### 2.5.1 Rendement

Une production fourragère complémentaire à la production de grains représente une solution afin de rendre la culture de Kernza économiquement plus rentable. Cependant, la production fourragère de l'agropyre intermédiaire est très variable en termes de qualité et de quantité au cours de la saison de production. Les quantités les plus élevées de matières sèches sont récoltées en été, lors de la récolte des grains, mais leurs valeurs nutritives fourragères sont faibles. En revanche, même si les récoltes de fourrage au printemps et en automne ne représentent qu'un quart à un tiers de la biomasse récoltée en été, leurs valeurs fourragères sont cependant beaucoup plus élevées, ce qui accroît la rentabilité de la culture (Favre et al., 2019 ; Hunter et al., 2020 ; Dufrane, 2021 ; Locatelli et al., 2022). Cependant, le contexte pédoclimatique, la date d'implantation de la culture, la fertilisation ainsi que les opérations de gestion de la culture sont autant de paramètres qui peuvent jouer sur la variabilité des rendements en grains et en fourrage du Kernza (Locatelli et al., 2022). Divers essais ont été réalisés concernant la production fourragère de l'agropyre intermédiaire et sont repris dans le Tableau 1.

**Tableau 1** : Rendements et valeurs nutritives de *Thinopyrum intermedium* à différentes saisons (Fagnant et al., 2023)

Espèce	Stade	Biomasse (kg/ha)	MAT (g/kg MS)	NDF (g/kg MS)	ADF (g/kg MS)	Références
Thinopyrum intermedium	Printemps	1.000-2.400	195-288	-	-	Hunter et al., 2020b
	été	7.400-10.200	26-48	-	-	
	Automne	1.100-3.000	105-132	-	-	
	Annuel	9.200-12.200	-	-	-	
	été	2.500-12.100	82	705,8	429,9	Locatelli et al., 2023
	Automne	600-1.800	142,1	662,6	352,2	
	Hiver	200-800	197,3	560,7	304,7	
	Annuel	3.800-4.200	-	-	-	Clément et al., 2022
	Annuel	9.269-11.983	-	-	-	Jungers et al. 2017
	Printemps	529-5.069	-	-	-	Pugliese, 2017
	été	5072-5.611	-	-	-	
	Automne	799-2.970	-	-	-	
	Printemps	588-3.900	-	-	-	Pugliese, 2017
	Automne	75-3.824	-	-	-	
	Annuel	2.483-13.063	-	-	-	
	Printemps	1.409	225	456	249	Favre et al., 2019
	été	6.141	51	702	427	
	Automne	1.394	119	590	337	
	Annuel	1.800-10.000	-	-	-	Wang et al., 2014
	Annuel	3.500-5.900	-	-	-	Lee et al., 2009
Printemps	1.400	200	480	230	Dufrane et al., 2021	
été	12.700	60	600	350		
Automne	1.000	250	490	250		
Printemps	-	151-215	485-504	299-322	Barriball, 2020	
Eté	-	56-73	708-828	453-501		
Annuel	3.500-9.500	-	-	-	Pugliese et al., 2019	
Printemps	1.156-1.307	84,7-167	477-516	300-331	Fagnant et al., 2018	
Eté	3.480-7.388	44,3-69,8	673-711	393-422		
Annuel	7.544-7.967	-	-	-	Dick et al., 2018	
Annuel	4.100-13.200	-	-	-	Tautges et al., 2018	
Thinopyrum intermedium + Trifolium pratense	été	7.422	86	637	412	Favre et al., 2019
Automne	3.035	177	443	276		
Thinopyrum intermedium Medicago sativa	Annuel	2.900-10.300	-	-	-	Tautges et al., 2018
sativa	Annuel	9-3.985	-	-	-	
Medicago sativa	Printemps	6.900-8.100	-	-	-	Clément et al., 2022
	été	5500-5.800	-	-	-	
	Automne	2.200-2.500	-	-	-	

### 2.5.2 Impact de la valorisation fourragère sur le rendement en grains

Néanmoins, même si les multiples fauches de l'agropyre intermédiaire sont sources de revenus supplémentaires pour le producteur, les effets à long terme de ses coupes sur le maintien du peuplement, son rendement en grains et la qualité de son fourrage ne sont pas encore bien connus (Barribal Spencer, 2020). En effet, ces paramètres pourraient être négativement affectés par un usage à double valorisation de la culture (Pugliese et al., 2019). D'après un essai réalisé par Pugliese et al., (2019), la réalisation d'une coupe fourragère estivale en août lors de la récolte de grains ou bien l'application de cette même coupe accompagnée d'une seconde coupe automnale en octobre favoriseraient le rendement en grains et en fourrage au cours de la seconde et troisième année de culture par rapport au traitement sans fauche. Ils précisent d'ailleurs que c'est la modalité d'une fauche qui augmente le plus les rendements en grains et en fourrage. Le développement de la biomasse racinaire de la culture est également favorisé par ces fauches printanières (Pugliese et al., 2019).

De plus, dans l'optique de chercher à réduire la perte de rendement en grains observée avec le vieillissement du peuplement, lors de l'un de leurs essais, Hunter et al. (2020) ont fait varier les défoliations mécaniques sur la culture ainsi que l'interligne de semis. De manière générale, ces paramètres ont favorisé le tallage de l'agropyre. Cela s'explique par une intensité lumineuse et un rapport rouge/rouge lointain plus élevé au niveau de la base de la plante. Cela permet également de réduire la probabilité de verse de la culture, ce facteur limitant pourtant souvent le rendement en grains de l'agropyre. Le rendement moyen en grains s'est donc vu accroître, mais aucun de ces deux paramètres n'a permis d'atténuer la baisse de rendement de la culture au cours du temps. Ils ajoutent cependant qu'une défoliation trop répétée peut également mener à une perte de vigueur de la culture au cours du temps. Au niveau de la composante fourragère de la culture, les résultats ont été différents. La défoliation a eu pour effet d'augmenter le nombre de talles par hectare, mais le rendement fourrager a, lui, diminué (Hunter et al., 2020).

L'apport d'une précision est cependant nécessaire dans le cas de l'IWG et de son besoin de vernalisation (Locatelli et al., 2022). Une défoliation automnale n'a pas le même effet sur la culture qu'une défoliation printanière, modifiant donc la production de grains. En effet, la première stimule la production de talles qui serviront à la reproduction l'année suivante. En revanche, une défoliation printanière favorise plutôt une production de talles végétatives qui concurrence directement les talles reproductives. Cette dernière encourage donc une production fourragère et non pas une production de grains. Toutefois, il est important de ne pas réaliser une défoliation trop excessive de la culture, car cela impacterait de manière négative la physiologie de la plante et sa capacité à se reproduire et à photosynthétiser (Hunter et al., 2020).

### 2.5.3 Association avec légumineuses

Une autre voie qui peut être mise en avant pour augmenter le rendement fourrager de la culture d'agropyre intermédiaire est son association à des légumineuses. En plus d'accroître le rendement de la culture, cela permettrait également d'augmenter la valeur nutritive du fourrage, le tout accompagné de divers avantages environnementaux (Favre et al., 2019 ; Li et al., 2021). L'association de cultures céréalières à des légumineuses apporte de nombreux avantages tels qu'une meilleure utilisation des éléments nutritifs du sol, un meilleur cycle des nutriments, une plus grande fixation biologique de l'azote, une meilleure séquestration du carbone ainsi qu'une meilleure fertilité des sols. Ce mélange végétal favorise aussi la diversité des pollinisateurs en leur fournissant un meilleur habitat tout en réduisant le problème des ravageurs. Il permet également de réduire la pression des adventices au sein de la culture et d'améliorer la résistance à la verse du Kernza (Tautges et al., 2018 ; Jensen et al., 2020 ; Li et al., 2021). Une réduction de l'utilisation des engrais synthétiques est également possible

grâce à la présence des légumineuses qui sont capables de fixer l'azote atmosphérique pour satisfaire leurs besoins et laissent donc l'azote du sol disponible pour les céréales. Ce mélange permet donc une utilisation complémentaire des sources d'azote dans le système. Cela représente ainsi un avantage économique pour l'agriculteur (Tautges et al., 2018 ; Jensen et al., 2020 ; Li et al., 2021).

La teneur en protéines des graines d'agropyre est également vue à la hausse en présence de légumineuses (Tautges et al., 2018). Selon Favre et al. (2019), l'association avec du trèfle violet permettrait d'augmenter considérablement la teneur en protéines brutes de l'agropyre intermédiaire. Leurs résultats démontrent une augmentation de 69 % de la teneur en protéines brutes pour des résidus d'été ainsi qu'une augmentation de 49 % de ces mêmes protéines au niveau de résidus d'automne. Le trèfle rouge est également avantageux en raison de sa facilité d'implantation, son bon rendement et sa tolérance au pâturage (Favre et al., 2019).

Li et al. (2020) ont démontré qu'une association Kernza-luzerne possédait de nombreux avantages ainsi qu'un meilleur rendement par rapport à une culture pure de cette même céréale faisant donc de la luzerne une légumineuse idéale. Cependant, la proportion de chaque espèce au sein du mélange est un paramètre qu'il faut prendre en compte. En effet, lorsque la proportion de luzerne dans le mélange devient très élevée, Li et al. (2020) ont constaté une diminution de l'accumulation de MS et d'N pour la culture de luzerne au sein de l'association. Cela s'expliquerait par une compétition intraspécifique de la luzerne beaucoup plus importante que la compétition interspécifique qu'elle pourrait avoir avec l'agropyre. Leurs résultats démontrent que les valeurs de MS et d'N étaient les plus élevées en présence d'un rapport 75 %/25 % en faveur de l'agropyre par rapport à la luzerne. De plus, même si cette association est favorable à de nombreux services écosystémiques, elle peut aussi amener à une compétition entre les cultures de céréales et de légumineuses. En effet, la luzerne peut montrer une certaine compétitivité vis-à-vis de l'agropyre lorsqu'ils sont associés, réduisant ainsi de manière négative la biomasse produite par la céréale (Li et al., 2021). Cette domination de la luzerne est encore plus accrue en l'absence de fertilisation azotée et cela s'explique simplement par la capacité de cette dernière à fixer l'azote, ce dont n'est pas capable l'agropyre. Pour éviter au maximum ce problème, il est préférable d'apporter une fertilisation azotée au cours du stade d'implantation de la culture afin de faciliter la mise en place du Kernza (Li et al., 2020).

## 2.6 Objectif du TFE

Ce travail de fin d'études regroupe plusieurs objectifs en vue d'améliorer la caractérisation de la culture d'agropyre intermédiaire dans nos régions. Une meilleure compréhension de celle-ci permettrait d'en optimiser sa gestion.

Tout d'abord, le premier objectif, plus général, de ce TFE consiste à valider ou non un modèle prédictif des valeurs fourragères du Kernza par spectrométrie infrarouge. Pour parvenir à cela, de nombreux échantillons ont été prélevés sur différents essais belges et français durant plusieurs années afin de regrouper des données sous forme d'une base de données. Au cours de ce TFE, des analyses chimiques ont été réalisées sur des échantillons prélevés en 2022 afin d'enrichir cette base de données pour rendre le modèle plus robuste. Une étape de calibration et de validation du modèle a été réalisée sur base de ces données pour pouvoir ensuite prédire les valeurs fourragères de l'ensemble des échantillons prélevés au cours de l'année 2023 (année du TFE).

Ensuite, ce TFE a également pour but d'évaluer le potentiel de repousse du Kernza sous différentes modalités de fauches lorsque celui-ci est associé à différentes légumineuses (Trèfle blanc, trèfle violet et luzerne). L'objectif est de comparer la qualité et la quantité du fourrage obtenu dans une gestion ne visant qu'une production fourragère par rapport à des gestions favorisant une double valorisation (production de grains en été accompagné d'une fauche printanière et/ou automnale). L'intérêt des

légumineuses dans cet essai est d'augmenter la qualité du fourrage produit. D'ailleurs, une hypothèse serait la production d'une biomasse de meilleure qualité, mais en plus faible quantité lorsque la culture est maintenue au stade végétatif. La seconde hypothèse, elle, serait une augmentation du contenu protéique du Kernza en présence de légumineuses. Enfin, un point d'attention est également mis sur une possible compétition entre l'agropyre et les légumineuses.

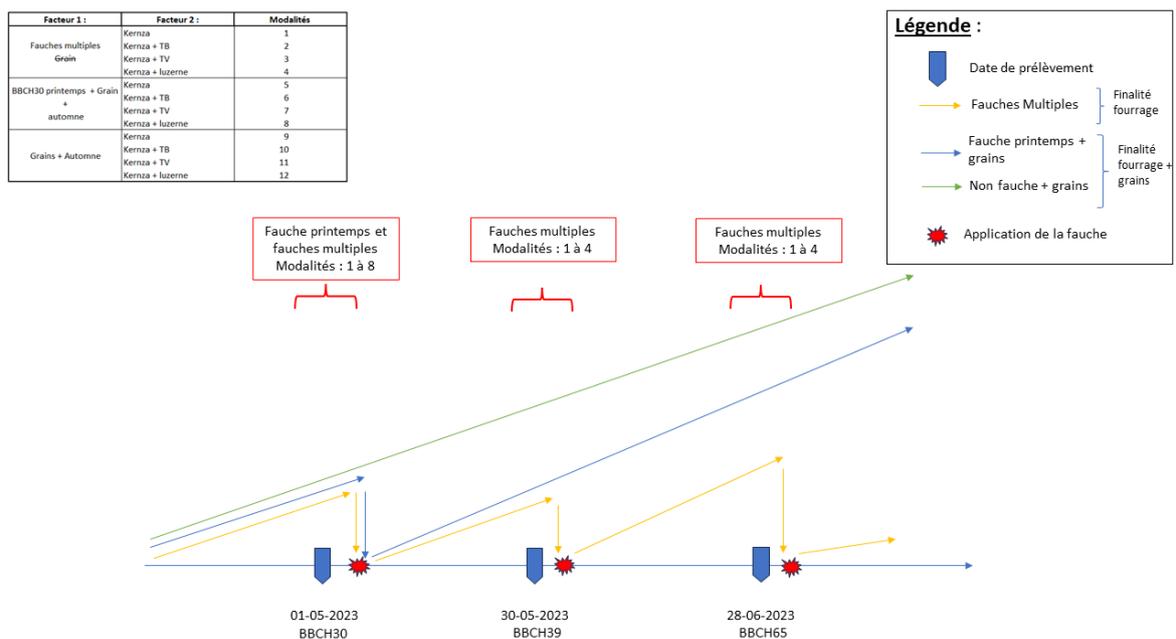
### 3 Matériel et méthode

#### 3.1 Sites expérimentaux

Pour mener à bien l'ensemble du projet de recherche dédié à l'agropyre intermédiaire, des échantillons provenant de différents sites expérimentaux ont été utilisés dans l'optique d'une validation et d'une calibration d'un modèle prédictif des valeurs fourragères du Kernza par spectrométrie infrarouge. Ces sites ont été choisis pour prélever les biomasses aériennes à différents stades de développement et au cours de différentes années, comme indiqué dans le Tableau 2.

Dans le cadre de cette étude, l'essai K21 implanté à Gembloux (Annexe 1) sera également suivi au cours de la saison 2023. L'objectif de ce travail réalisé sur l'essai K21 est de caractériser le potentiel fourrager du Kernza lorsque celui-ci est implanté en association avec différentes légumineuses et sous différentes modalités de fauches. Les légumineuses associées au Kernza sont le trèfle blanc (TB), le trèfle violet (TV) et la Luzerne (L). La 4<sup>e</sup> modalité du facteur association est l'implantation du Kernza en culture pure (K). Trois modalités de fauches distinctes sont également utilisées dans cet essai : il y a tout d'abord deux modalités de fauches dont l'objectif est une double valorisation du Kernza avec une production de grains estivale accompagnée de coupe(s) fourragère(s). La première est une modalité visant la production de grains en été, suivie d'une récolte fourragère en automne (Fauche 0) alors que la seconde modalité correspond à une fauche printanière et automnale complémentaire à la récolte de grains en été (Fauche 1). Enfin, la troisième modalité appliquée à cet essai ne vise que la production fourragère avec de multiples fauches réalisées au cours du développement de la culture (Fauche 3). Pour ce travail, seules trois fauches auront été réalisées pour cette modalité. Ces fauches ont été appliquées après les récoltes d'échantillons réalisées aux stades BBCH30, BBCH39 et BBCH65 des modalités visant la production du grains. La culture a donc conservé un stade végétatif et non reproductif. C'est pourquoi, pour la modalité visant la production fourragère, le terme « nombre de coupes » sera employé pour comparer les fauches réalisées aux différents stades. La Figure 1 représente le déroulement de l'essai dans le temps selon les différents facteurs alors que les opérations culturales réalisées pour cet essai sont reprises en Annexe 2. Les différentes caractéristiques du site expérimental et des échantillons analysés sont reprises dans le Tableau 2.

**Figure 1** : Schéma du déroulement de l'essai selon les différents facteurs



**Tableau 2 : caractéristiques du site expérimental et des échantillons analysés**

Site code	Experimental sites					
	K17	K19	K21	F2	F3	F4
<b>Location</b>						
Country	Belgium			France		
GPS Long. (DD)	47 063	47 052	47 091	51 251	50 920	5 143
GPS Lat. (DD)	50.5664	50.5659	50.5652	45.4250	45.2746	45.3323
<b>Soil type</b>	Clay loam			Loam	Sandy-loam (stony)	Sandy-loam
<b>Climate</b>						
Average annual rainfall (mm)	852			881	984	983
Average annual min temperature (°C)	7			7.8	6.3	6.3
Average annual max temperature (°C)	14.2			16.5	16.1	16.1
<b>Type of experiment</b>	Research station (microplots). Randomized split-plot design  (4 replicates)			On-farm experiment Strips design  (3 replicates)		
<b>Implementation</b>						
Sowing date	22-09-2017	15-05-2019 23-08-2019	09-09-2021	20-09-2017	15-09-2018	05-09-2017
Seed population	Third selection cycle of The Land Institute (TLI-C3)		Fifth selection cycle of The Land Institute (TLI-C5)	Third selection cycle of The Land Institute (TLI-C3)		
Seeding rate (kg/ha)	20		12	18		
Interrow spacing (cm)	25	12,5 or 25	28	25	12	20
<b>Field management</b>						
N fertilization (kg N/ha)	50		50	50	50	50
BBCH30	0 or 100		50	50	50	50
BBCH39	0 or 50		0	0	0	0
Fall	0 or 0		50	0	0	0
Weeding	Chemical + mechanical		Mechanical	/	/	/
Crop protection	/					
Post-harvest residue management	Chipping or mowing at 5cm from the ground					
<b>Growing season for data collection</b>	2020 (only fall vegetative stage) 2021	2019 (only fall vegetative stage of may), 2020, 2021 (without fall vegetative stage)	2022	2021	2021	2021
<b>Growing stages for data collection (BBCH scale)</b>	Fall vegetative stage, BBCH30, BBCH39, BBCH65, BBCH89			Spring vegetative stage (BBCH25+), BBCH30, BBCH65	Spring vegetative stage (BBCH25+), BBCH30	Spring vegetative stage (BBCH25+), BBCH30, BBCH65

### 3.2 Prélèvements de la biomasse aérienne

La biomasse aérienne sur les différents sites expérimentaux a été prélevée à l'aide d'un quadra de 50x50cm et coupée à 5 cm du sol. Seule la biomasse aérienne totale a été prélevée lors de ces échantillons. Ces derniers ont été réalisés à différents stades de développement selon l'échelle BBCH des céréales. Le premier prélèvement a été réalisé au stade de redressement (BBCH30), le second au stade de dernière feuille (BBCH39) et le troisième à la floraison (BBCH65). Une précision est cependant nécessaire concernant la modalité multifauche dans laquelle la culture, fauchée à plusieurs reprises, conserve un état végétatif et ne suit donc pas un développement normal selon l'échelle BBCH. Néanmoins, les échantillons ont été prélevés au même moment que les deux autres modalités. C'est pourquoi nous conservons le stade de prélèvement (BBCH30, BBCH39 et BBCH65) des autres modalités comme facteur caractéristique de chaque échantillon, y compris pour la multifauche. Les dates de prélèvement sont précisées dans le Tableau 3. En ce qui concerne les modalités composées d'un mélange d'agropyre et de légumineuses, ces dernières ont été séparées de la biomasse de *Th. intermedium* afin d'évaluer la proportion de chaque espèce dans le mélange. Dans l'essai K21-01, les épis ont été séparés du reste de la biomasse quand ceux-ci étaient présents et ont été dénombrés ainsi que les tiges présentes. Les échantillons ont été pesés en frais, mis à l'étuve pendant 72 h à 60 °C et ensuite pesés pour obtenir la matière sèche (MS60).

**Tableau 3** : Dates de prélèvement des échantillons

	<b>Stade BBCH</b>	<b>Date</b>
<b>Redressement</b>	Z30	01-05-23
<b>Dernière feuille</b>	Z39	30-05-23
<b>Floraison</b>	Z65	28-06-23

### 3.3 Variables observées

Différentes variables ont été étudiées afin de caractériser le développement du Kernza et celui des légumineuses au cours de cet essai. Dans un premier temps, la biomasse du Kernza ainsi que celle des légumineuses ont été analysées séparément à chaque stade. Ensuite, la biomasse totale du mélange Kernza-légumineuses a elle aussi été observée à chaque stade. De plus, pour caractériser le potentiel de rendement du Kernza, les densités de talles (Nombre de talles) et les densités d'épis (nombres d'épis) ont été analysées respectivement aux stades BBCH30, BBCH39 et BBCH65 pour les talles et uniquement au stade BBCH65 pour les épis. Afin de comparer les différentes modalités de fauche, la biomasse totale produite au cours de l'essai a également été étudiée. Pour ce faire, la biomasse totale cumulée du Kernza au stade BBCH65 a été analysée ainsi que la biomasse totale cumulée des légumineuses. La biomasse totale cumulée du mélange Kernza-légumineuses a été analysée afin de caractériser la production totale de matière sèche produite pour chaque modalité. Enfin, la proportion (%) de Kernza et de légumineuses au sein du mélange a été analysée en fonction du facteur association et du facteur fauche. Cette dernière variable se base sur la matière sèche totale cumulée au stade BBCH65 afin de calculer la proportion de chaque constituant du mélange.

### 3.4 Mouture des échantillons

Pour réaliser les analyses chimiques et mesurer l'absorbance au spectromètre infrarouge, les échantillons récoltés et séchés ont été broyés à 1 mm. Les tiges, les feuilles et les épis ont été mélangés avant d'être broyés à l'aide d'un équipement de type FOSS Tecator Cyclotec 1093.

### 3.5 Analyses chimiques

L'ensemble des analyses chimiques ne seront que brièvement citées dans la suite de ce travail. Celles-ci ont précédemment été décrites dans le travail réalisé par Dufrane (2021).

#### 3.5.1 Matière sèche analytique

Les résultats obtenus des différentes analyses citées ci-dessous sont exprimés en pourcentage de matière sèche analytique.

#### 3.5.2 Teneur en cendres totales

La teneur en cendres totales représente la partie de l'échantillon inorganique et contenant des matières minérales. Afin de déterminer cette teneur de manière efficace, la quantité de cendres a été mesurée sur le même échantillon que celui utilisé pour mesurer la matière sèche analytique.

#### 3.5.3 Matières azotées totales (MAT)

La catégorie des matières azotées totales comprend toutes les molécules qui contiennent au moins un atome d'azote. Cela regroupe donc les matières protéiques ainsi que les non protéiques. La méthode de Kjeldahl est utilisée pour mesurer la quantité d'azote dans l'échantillon, et cette mesure est ensuite utilisée pour calculer la teneur en matières azotées totales (MAT). Pour ce faire, la teneur en azote est multipliée par un facteur de 6,25, en supposant que les MAT sont exclusivement composées de

protéines contenant 16 % d'azote. C'est en raison de cette méthode de calcul que les MAT portent le nom de protéines brutes.

#### 3.5.4 Dosage des constituants pariétaux

L'évaluation de la teneur des constituants pariétaux est essentielle afin d'évaluer de manière précise les valeurs alimentaires d'un fourrage. Ainsi, pour effectuer cette évaluation, trois analyses différentes ont été effectuées. La première réalisée est la teneur en résidus des parois cellulaires (NDF) afin de déterminer la proportion de cellulose, hémicellulose et de lignine contenue dans les membranes cellulaires. Ensuite, l'analyse ADF permet de calculer le pourcentage de cellulose et de lignine. La différence entre le NDF et l'ADF est également réalisée pour fournir la fraction d'hémicellulose uniquement. Enfin, l'analyse ADL permet de quantifier la proportion de lignine contenue au sein des parois cellulaires des échantillons. Les analyses NDF et ADF ont été menées grâce à la méthode de Van Soest et al. (1991) et l'analyse des ADL a été analysée selon la méthode Van Soest (1963). Enfin, l'analyse de la CB a également été réalisée selon Weende (Duchenne et al., 2006).

#### 3.5.5 Digestibilité de la matière organique

L'analyse de la digestibilité par voie enzymatique de la matière organique des échantillons de Kernza a été faite selon la méthode de de Boever et al. (1986).

### 3.6 Spectrométrie proche infrarouge

Les échantillons ont été collectés et réduits en fragments de 1 mm avant d'être soumis à l'analyse au spectromètre XDS Monochromator Type XM-1000 FOSS. L'absorbance a été mesurée sur une plage de longueurs d'onde allant de 400 à 2500 nm avec un pas de mesure de 2 nm. L'utilisation de la spectrométrie proche infrarouge permet, une fois la calibration du modèle faite, une rapidité et une simplicité de réalisation (Eylenbosch et al., 2018).

### 3.7 Modèle prédictif des valeurs fourragères – Prédiction et Validation

En utilisant les spectres infrarouges ainsi que les analyses chimiques réalisées sur nos différents échantillons, une calibration a été effectuée pour développer un modèle capable de prédire les valeurs nutritionnelles du Kernza. Cette étape a été réalisée en utilisant le logiciel MatLab R2018a. Dans un premier temps, il est nécessaire d'appliquer des prétraitements aux spectres. La fonction SNV (Standard Normal Variate) de Matlab a été utilisée afin de réduire les interférences résultant de la dispersion et de la taille des particules dans l'échantillon (Eylenbosch, 2018). Ensuite, la fonction detrend a été utilisée afin de réduire la courbure et le décalage des spectres (Murphy et al., 2022). L'algorithme de Savitzky-Golay a finalement été appliqué pour lisser la courbe et éliminer le bruit de fond (Eylenbosch, 2018). Ensuite, une régression PLS avec une variance fixée à 50 % a été réalisée. Les coefficients standards ( $\beta$ -coefficients) de la régression PLS ont permis d'identifier les longueurs d'onde les plus significatives. Finalement, la prédiction des valeurs chimiques est réalisée à l'aide d'une régression linéaire multiple appliquée sur ces mêmes longueurs d'onde (Dufrane, 2021).

Une validation interne a ensuite été réalisée. Deux groupes aléatoires de jeux de données ont donc été formés. L'un de ces groupes est utilisé pour calibrer le modèle alors que le second sert à le valider (Eylenbosch, 2018). 112 échantillons ont été analysés pour les différentes analyses chimiques (Cendres, CP, NDF, ADF, ADL, Cellulose et DMO). Ainsi, le modèle de prédiction pour les valeurs chimiques a utilisé 156 échantillons en calibration et 67 échantillons en validation, correspondant à un ration de 70/30 (%) en calibration/validation (Lee et al., 2019 ; Shen et al., 2022).

#### 3.7.1 Évaluation qualité du modèle prédictif :

7 critères sont utilisés pour évaluer la qualité du modèle employé. Ces derniers sont : le biais, le  $R^2$ , le SEC, le SEP, le RPD, le ND et le RMSE. Tout d'abord, le biais correspond à l'écart entre la moyenne des

valeurs prédites et la moyenne des valeurs chimiques.  $R^2$  est un coefficient de détermination utilisé pour représenter la variabilité entre la variable prédite et la variable chimique. Ensuite, il y a le SEC qui correspond à l'erreur standard de calibration utilisée lorsque le modèle est calibré à l'aide d'un set d'échantillons. Cette même erreur est appelée SEP (Erreur standard de Précision) lorsque la validation du modèle est réalisée sur un lot d'échantillons indépendants. Le RPD correspond au rapport entre l'écart-type des valeurs de référence de la base de données (SD) et le SEP (Murphy et al., 2022). Enfin, les deux derniers critères employés sont le ND (Coefficient de différence normalisée) qui correspond à un écart relatif moyen entre la somme des valeurs simulées et la somme des valeurs observées et le RMSE qui est une erreur quadratique moyenne.

Pour vérifier l'exactitude d'un modèle prédictif, les valeurs des différents paramètres doivent être vérifiées. Le biais doit avoir une valeur proche de 0 alors que le  $R^2$  doit être proche de 1 et que le RPD doit être supérieur à 3 (Minet et al., 2016). Le SEC doit être proche du SEP (SECV lorsque c'est une validation croisée qui est utilisée) tout en restant le plus petit possible. Le ND doit avoir un résultat proche de 0 en valeur absolue alors qu'une faible valeur du RMSE permet de caractériser les prédictions comme précises. Enfin, sachant que le  $R^2$  varie entre 0 et 1, une valeur supérieure à 0,9 démontre la véracité du modèle prédictif. Dans le cas d'un  $R^2$  compris entre 0,7 et 0,9, il est nécessaire d'ajouter des échantillons au set servant à calibrer le modèle ou bien alors, il faut ajuster certains paramètres (Genot et al., 2014).

### 3.8 Calcul des valeurs énergétiques et protéiques

Les équations du système belgo-hollandais, fournies par le réseau Requasud, ont servi à calculer les valeurs énergétiques et protéiques de l'agropyre intermédiaire et des légumineuses. Ainsi, à partir des valeurs chimiques obtenues à la suite du modèle prédictif ou bien de celles obtenues au laboratoire, les VEM, VEVI, DVE et OEB ont pu être calculées. Les équations utilisées sont réparties en trois catégories : herbes, foin et pailles. Concernant l'agropyre, les équations employées ont été sélectionnées selon la digestibilité de la matière organique des échantillons, leur teneur en protéines et en cellulose ainsi que leur teneur moyenne en fibres au cours des différents stades de développement. Grâce au précédent travail de Guillaume (2022), ces valeurs ont été calculées de manière spécifique à chaque stade à l'aide des équations fournies. En effet, une variabilité plus importante de ces valeurs a été constatée au niveau du stade de développement de la culture et non pas par rapport aux différents sites expérimentaux ou année de croissance. Les valeurs énergétiques et protéiques correspondantes au stade redressement (BBCH30) ont ainsi été calculés en employant les équations « herbe », alors que les équations « foin » ont été employées pour le stade « dernière feuille » (BBCH39). Concernant le stade floraison (BBCH65), les valeurs énergétiques et protéiques des modalités visant une production de grains (Fauche 0 et Fauche 1) ont été calculées en employant les équations « pailles » alors que celles pour la modalité à destination d'une production fourragère (Fauche 3) ont été calculées selon les équations « foin ». Concernant les légumineuses, leurs valeurs énergétiques et protéiques ont été prédites avec l'aide des équations herbes fournies par le réseau Requasud. Une fois les valeurs chimiques, énergétiques et protéiques de Th. intermedium et des différentes légumineuses obtenues, celles de leur mélange ont également été calculées. Une moyenne pondérée a été réalisée pour calculer les différentes valeurs des mélanges selon l'importance de chacune des deux espèces présentes dans le mélange.

### 3.9 Software et traitement statistique

Concernant la mise au point du modèle prédictif, sa calibration et sa validation, c'est le logiciel Matlab qui a été utilisé pour analyser la base de données des longueurs d'ondes infrarouges. Une fois les constituants fourragers prédits, ceux-ci ont été traités à l'aide du logiciel Rstudio.

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R studio version 4.3.0. Au sein des différentes ANOVA réalisées, des modèles mixtes ont été utilisés. L'association végétale (K, K + TB, K + TV et K + L), le stade de développement (BBCH30, BBCH39 et BBCH65) ainsi que la fauche (0, 1 ou 3)<sup>1</sup> ont été considérés comme des facteurs fixes tandis que le facteur bloc a été considéré comme facteur aléatoire. Dans le cas de cet essai, le test de Bartlett permettant de vérifier l'homogénéité de la variance ainsi que le test de Shapiro-Wilk permettant de vérifier la distribution normale des résidus n'ont pas été appliqués, car le nombre de répétitions (n = 4) était trop faible. Néanmoins, l'homogénéité de la variance et la normalité des résidus ont été présumées. Suivant les ANOVA, un test post-hoc Student-Newman-Keuls a été réalisé pour comparer les moyennes des traitements à un niveau de significativité fixé à 0,05.

### 3.9.1 Étude de l'effet du stade et de l'association

Concernant la matière sèche produite, pour chaque modalité de fauche, une ANOVA à deux facteurs (stade phénologique et association) a été réalisée. Quand une interaction était observée entre les deux facteurs fixes, des ANOVA à un facteur étaient réalisées pour chaque association séparément avec le stade phénologique comme facteur ainsi que pour chaque stade phénologique séparément avec l'association comme facteur. Les variables analysées étaient : la biomasse de Kernza, la biomasse des légumineuses, la biomasse totale du mélange Kernza-légumineuses, le nombre de talles de Kernza, le nombre d'épis de Kernza, la biomasse totale cumulée du Kernza, la biomasse totale cumulée des légumineuses, la biomasse totale cumulée du mélange Kernza-légumineuses ainsi que la proportion (%) de Kernza et de légumineuses dans le mélange.

Au niveau de la qualité du fourrage, des ANOVA à deux facteurs ont été réalisées ainsi que des ANOVA à un facteur lorsqu'il y avait interaction. Celles-ci ont été réalisées selon les mêmes facteurs que ceux précédemment cités. Cependant, ces analyses ANOVA ont été appliquées selon deux groupes de paramètres spécifiques : d'un côté, les constituants fourragers qui reprennent cendres, CP, NDF ADF, ADL, Cellulose, OMD, et de l'autre, les valeurs énergétiques et protéiques qui reprennent VEM, VEVI, DVE et OEB. De plus, les variables pour lesquelles ces paramètres ont été analysés étaient : la biomasse de Kernza, la biomasse des légumineuses, la biomasse totale du mélange Kernza-légumineuses, la biomasse totale cumulée du Kernza, la biomasse totale cumulée des légumineuses et la biomasse totale cumulée du mélange Kernza-légumineuses.

### 3.9.2 Étude de l'effet de la fauche

La fauche unique n'ayant été réalisée qu'après le stade BBCH30 et la fauche multiple qu'après le stade BBCH30, BBCH39 et BBCH65, ce facteur n'a été étudié qu'au stade BBCH65. À ce stade, une ANOVA à deux facteurs (Fauche et association) a été réalisée. Quand une interaction était observée entre les deux facteurs fixes, des ANOVA à un facteur ont été réalisées pour chaque association séparément avec la fauche comme facteur ainsi que pour chaque fauche séparément avec l'association comme facteur. Les variables analysées étaient : la biomasse totale cumulée du Kernza, la biomasse totale cumulée des légumineuses, la biomasse totale cumulée du mélange Kernza-légumineuses, la densité de talles, la densité d'épis et la proportion (%) de Kernza et de légumineuses dans le mélange.

---

<sup>1</sup> Fauche 0 = Grains + Automne, Fauche 1 = fauche printanière (BBCH30) + Grains + Automne et Fauche 3 = Fauches multiples.

## 4 Résultats

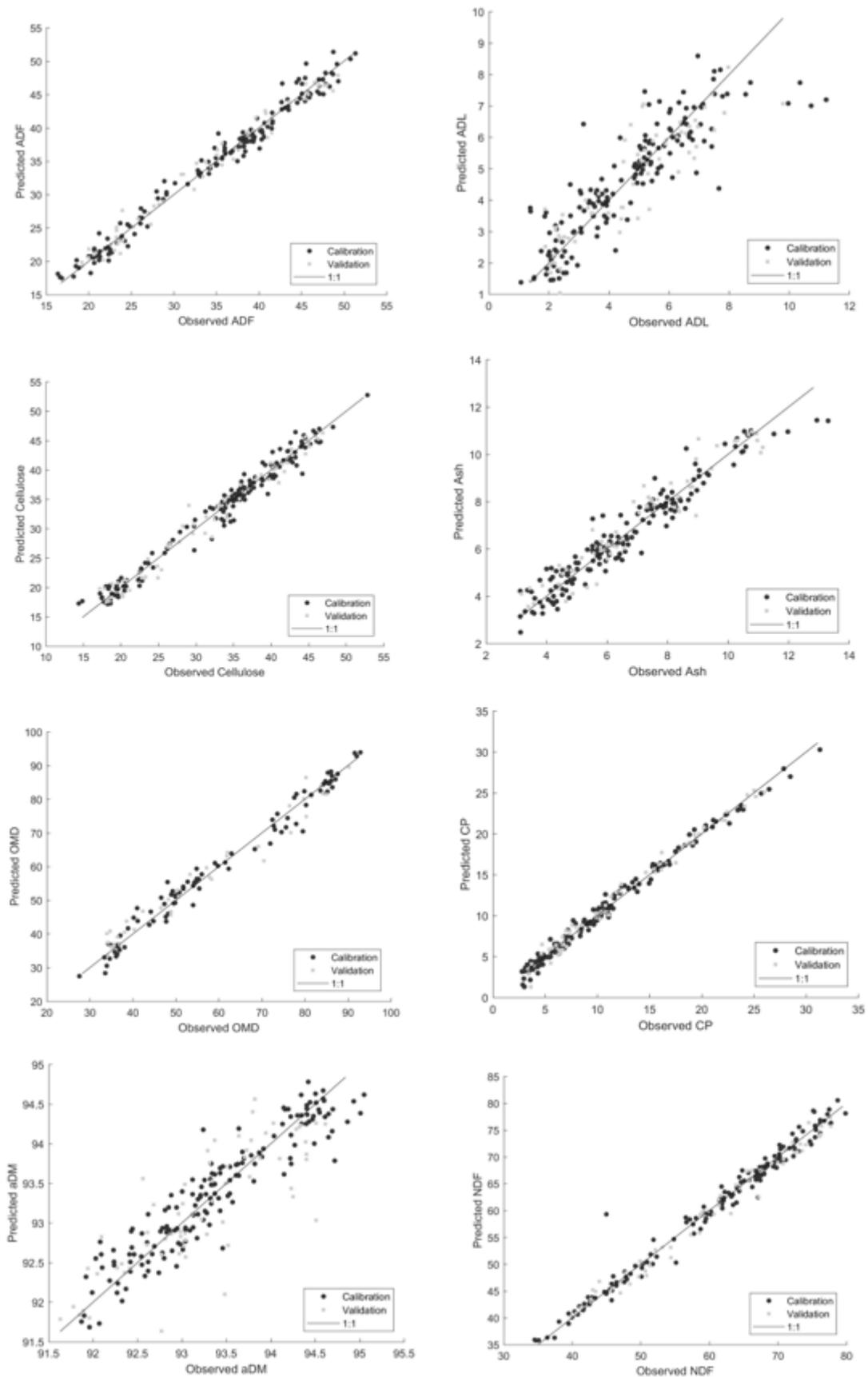
### 4.1 Spectrométrie infrarouge – Modèle prédictif

Le Tableau 4 reprend les différents paramètres sélectionnés afin d'évaluer la calibration et la validation du modèle prédictif mis au point au cours des dernières années. Pour la MSa, les SEC et SEP sont proches avec un biais égal à 0 et un ND s'en rapprochant. Cependant, le R<sup>2</sup> est inférieur à 0,9 et le RPD est lui inférieur à 3 pour la calibration et la validation, ce qui signifie que le modèle n'est pas optimal pour ce paramètre. Pour les cendres, le R<sup>2</sup> est supérieur à 0,9 et le RPD supérieur à 3 avec des valeurs de SEC et SEP proches l'une de l'autre. Le RMSE est faible, tout comme le biais et le ND, ce qui en fait un bon modèle prédictif pour ce paramètre. En ce qui concerne le NDF et l'ADF, les conclusions sont similaires. Ils possèdent un R<sup>2</sup> très proche de l'unité avec un RPD supérieur à 3, tout en ayant un RMSE relativement faible et des valeurs de SEC et SEP proches. Seul le biais du NDF est relativement élevé par rapport aux biais des autres paramètres, tout en restant acceptable. Les conclusions sont similaires pour le CP. Il s'agit donc d'un très bon modèle prédictif pour ces trois paramètres. Enfin, la Cellulose et le DMO sont eux aussi des paramètres pour lesquels le modèle prédictif est bon. Ils ont un R<sup>2</sup> inférieur à 0,9, un SEC et un SEP proche ainsi que le RPD supérieur à 3. Seul le DMO possède un RMSE et un biais légèrement supérieur à ceux des autres paramètres. Cependant, il faut préciser que dans le cadre de l'utilisation de ce modèle prédictif, c'est une validation interne qui a été réalisée. Cela explique les valeurs souvent proches ou égales à 0 concernant le biais. C'est lié au fait que les 67 échantillons utilisés pour la validation du modèle, même s'ils sont indépendants des 156 échantillons utilisés pour la calibration, font partie de la même base de données du modèle et sont donc liés entre eux. On peut donc en conclure que ce modèle est tout à fait solide pour prédire les valeurs de ces différents paramètres. Bien entendu, il peut encore être amélioré en ajoutant des valeurs dans la base de données pour rendre ce modèle plus robuste. Le Tableau 4 reprend les résultats des calibrations et validation qui sont également représentés au niveau de la Figure 2 alors que la Figure 3 représente pour chaque paramètre les longueurs d'onde sélectionnées à l'aide des  $\beta$ -coefficients.

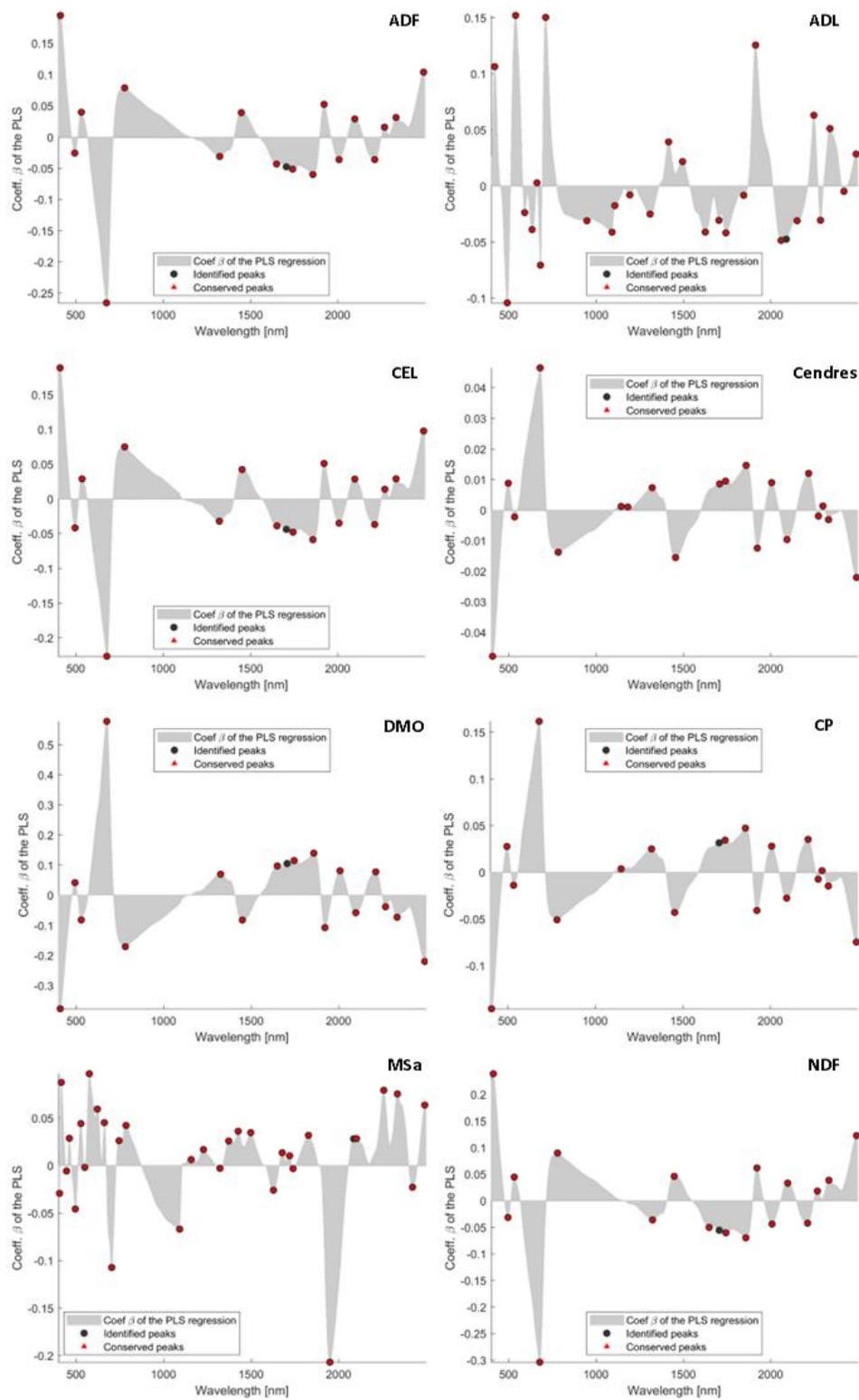
**Tableau 4** : Critères caractérisant les performances du modèle prédictif employé pour ce TFE

Méthode aléatoire								
Calibration								
Constituants	N	RMSE (%MS)	R <sup>2</sup>	ND	SD (%MS)	Biais	SEC (%MS)	RPD (SD/SEC)
MSa	156	0,29	0,87	0,00	0,81	0,00	0,29	2,83
Cendres	156	0,57	0,93	0,00	2,15	0,00	0,57	3,74
CP	156	0,65	0,99	0,00	6,28	0,00	0,66	9,57
NDF	156	1,75	0,98	0,00	12,08	0,00	1,75	6,89
ADF	156	1,31	0,98	0,00	9,53	0,00	1,31	7,27
ADL	156	1,00	0,76	0,00	2,06	0,00	1,01	2,05
Cellulose	156	1,43	0,97	0,00	8,95	0,00	1,43	6,26
DMO	156	2,73	0,98	0,00	19,12	0,00	2,75	6,95
Validation								
Constituants	N	RMSE (%MS)	R <sup>2</sup>	ND	SD (%MS)	Biais	SEP (%MS)	RPD (SD/SEP)
MSa	67	0,47	0,63	0,00	0,78	0,04	0,47	1,65
Cendres	67	0,63	0,92	0,02	2,22	-0,14	0,62	3,56
CP	67	0,73	0,99	0,01	6,50	-0,08	0,73	8,85
NDF	67	1,55	0,98	-0,01	11,50	0,50	1,48	7,78
ADF	67	1,31	0,98	0,00	9,33	-0,02	1,32	7,07
ADL	67	0,90	0,79	-0,02	1,97	0,09	0,90	2,18
Cellulose	67	1,49	0,97	0,00	8,90	0,15	1,50	5,95
DMO	67	3,48	0,96	0,01	18,45	-0,52	3,49	5,29

**Figure 2** : Représentation graphique des résultats de calibration et validation des 8 constituants sélectionnés



**Figure 3** : Longueurs d'onde sélectionnées à l'aide des  $\beta$ -coefficients afin de caractériser au mieux chaque constituant



## 4.2 Analyse de la matière sèche produite

### 4.2.1 Conduite pour la production de grains

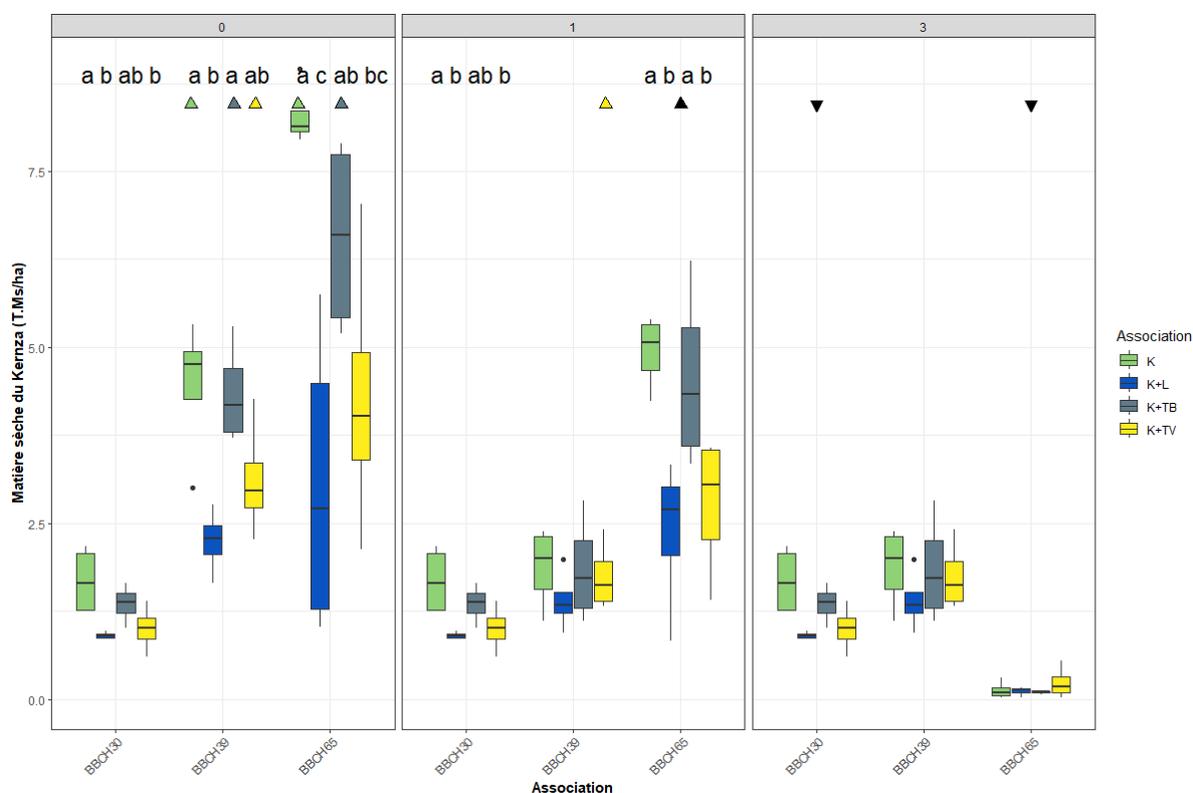
#### 4.2.1.1 Performance du Kernza

Le tableau repris en annexe (Annexe 3) reprend l'ensemble des résultats des ANOVA réalisées sur la matière sèche du Kernza (PS K ; étudiant l'effet du stade et de l'association voir section 3.9.1 M & M) et la matière sèche cumulée du Kernza (PS TOT K ; étudiant l'effet de la fauche et de l'association voir section 3.9.2 M & M). Les résultats des tests SNK sur le PS K sont présentés dans l'annexe 8, tandis que les résultats des tests SNK sur le PS TOT K sont présentés dans l'Annexe 12.

Un effet significatif ( $p\text{-value} < 0,05$ ) est observé pour le facteur stade avec une augmentation de la quantité de matière sèche tout au long de la saison culturale (Annexe 8 ; Figure 4). Lorsqu'aucune fauche n'est réalisée, une exception peut être mentionnée avec l'association du Kernza à la luzerne où aucune croissance significative de la matière sèche au cours du temps n'est observée.

Concernant l'effet de l'association, celui-ci est significatif aux différents stades de développement ( $p\text{-value} < 0,05$ ). On observe la plus faible production de matière sèche du Kernza avec les modalités associées à la luzerne ainsi qu'au trèfle violet, tandis que le Kernza pur et le Kernza associé au trèfle blanc produisent le plus de matière sèche. Lorsqu'une fauche printanière est réalisée, une exception au stade BBCH39 peut être mentionnée où aucune différence de production de matière sèche entre associations n'est observée (Annexe 8 ; Figure 4).

**Figure 4 :** Poids sec du Kernza au cours de son cycle de développement pour chaque association selon les trois traitements de fauche. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet association pour chaque stade de développement tandis que les triangles indiquent des moyennes significativement supérieures (vers le haut) ou inférieures (vers le bas) de l'effet stade pour chaque association. Un triangle noir représente la même tendance pour l'ensemble des associations. \*À la fauche 3, les stades indiqués sont ceux des modalités à vocation grains lorsque les fauches ont été réalisées



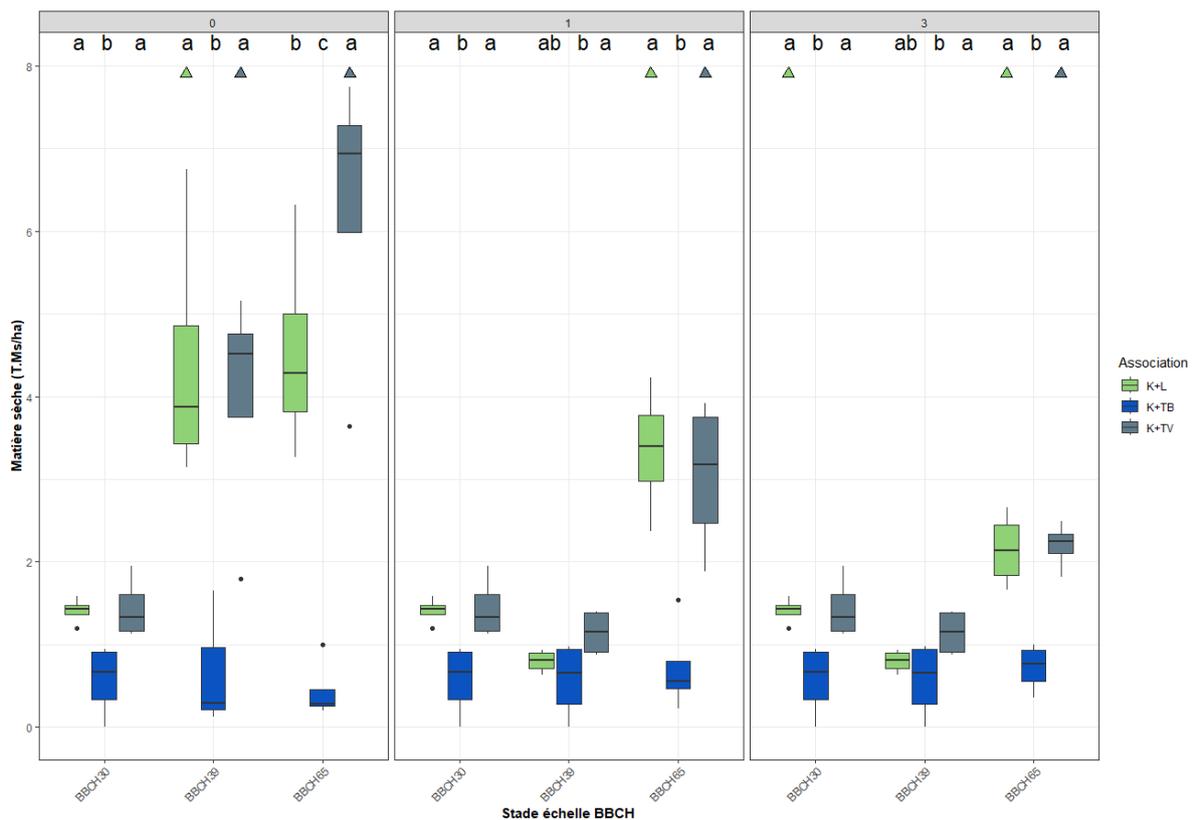
#### 4.2.1.2 Performance des légumineuses

Le tableau repris en annexe (Annexe 4) reprend l'ensemble des résultats des ANOVA réalisées sur la matière sèche des légumineuses (PS LEG ; étudiant l'effet du stade et de l'association voir section 3.9.1. M & M) et la matière sèche cumulée des légumineuses (PS TOT Leg ; étudiant l'effet de la fauche et de l'association voir section 3.9.2. M & M). Les résultats des tests SNK sur le PS leg sont présentés dans l'Annexe 9, tandis que les résultats des tests SNK sur le PS TOT leg sont présentés dans l'Annexe 13.

Un effet significatif du facteur association est observé ( $p$ -value<0,05) où le trèfle blanc produit le moins de matière sèche par rapport aux deux autres légumineuses (Annexe 9 ; Figure 5). Une exception peut être mentionnée, où lorsqu'une fauche printanière est réalisée au stade BBCH30, aucune différence entre associations n'est observée au stade BBCH39.

Concernant l'effet du stade de développement, celui-ci est significatif pour la luzerne et le trèfle violet ( $p$ -value<0,05). La matière sèche de ces deux légumineuses est en augmentation tout au long de la saison culturale avec les valeurs les plus élevées au stade BBCH65 (Annexe 9). En revanche, la matière sèche du trèfle blanc reste constante tout au long de la saison culturale ( $p$ -value>0,05 ; Figure 5).

**Figure 5 :** Poids sec des légumineuses à chaque stade et pour chaque association selon les trois traitements de fauche. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet association tandis que les triangles indiquent des moyennes significativement supérieures (vers le haut) ou inférieures (vers le bas) du stade de développement. \*À la fauche 3, les stades indiqués sont ceux des modalités à vocation grains lorsque les fauches ont été réalisées



#### 4.2.1.3 Performance du mélange Kernza-légumineuses

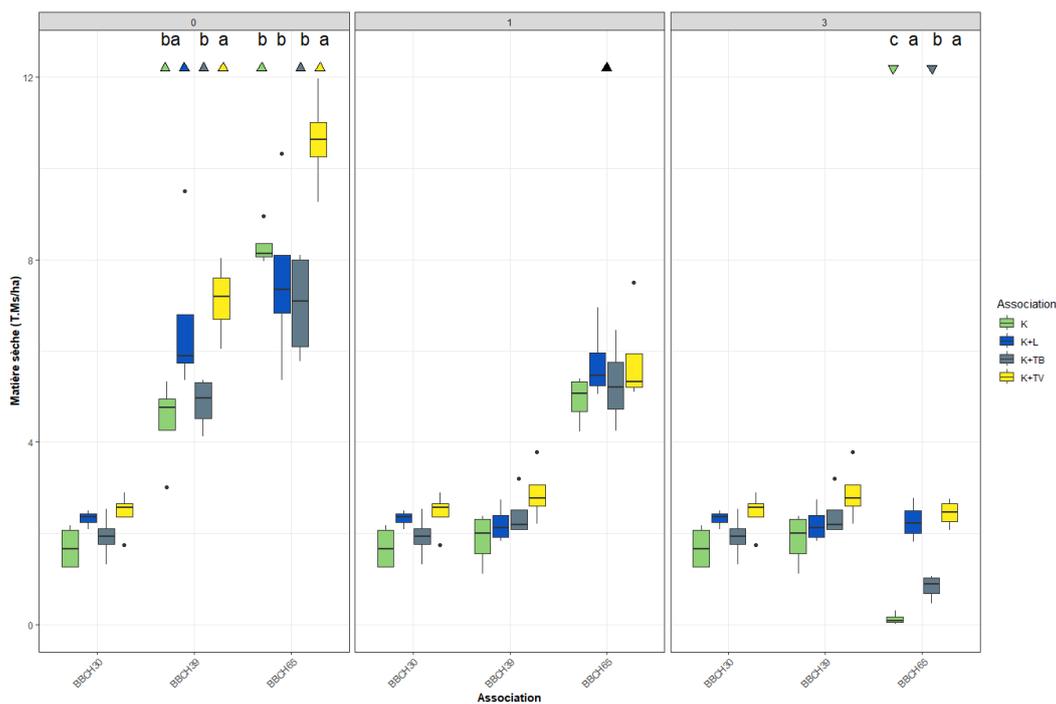
Le tableau repris en annexe (Annexe 5) reprend l'ensemble des résultats des ANOVA réalisées sur la matière sèche du mélange Kernza-légumineuses (PS mélange ; étudiant l'effet du stade et de l'association voir section 3.9.1. M & M) et la matière sèche cumulée du mélange Kernza-légumineuses (PS TOT mélange ; étudiant l'effet de la fauche et de l'association voir section 3.9.2. M & M). Les résultats des tests SNK sur le PS mélange sont présentés dans l'Annexe 10 et l'Annexe 11, tandis que

les résultats des tests SNK sur le PS TOT mélange Kernza-légumineuses sont présentés dans le Tableau 5.

Concernant la matière sèche totale du mélange Kernza-légumineuses, un effet significatif de l'association est observé (Annexe 5). L'association du Kernza au trèfle violet produit le plus de matière sèche. Lorsqu'aucune fauche n'est appliquée, l'association du Kernza à la luzerne produit également le plus de matière sèche au stade BBCH39. Lorsqu'une fauche est appliquée, le Kernza pur produit la plus faible quantité de matière sèche (Annexe 10 ; Annexe 11 ; Figure 6).

L'effet du stade est significatif ( $p\text{-value} < 0,01$ ) avec une augmentation de la quantité de matière sèche produite pendant la phase de développement. Lorsqu'aucune fauche n'est appliquée, la production augmente entre le stade BBCH30 et BBCH65, une exception peut être mentionnée avec l'association du Kernza à la luzerne où on n'observe pas d'augmentation entre le stade BBCH39 et BBCH65 (Annexe 10 ; Figure 6). Lorsqu'une fauche printanière est appliquée, l'augmentation n'est observée que du stade BBCH39 au BBCH65 (Annexe 11 ; Figure 6).

**Figure 6 :** Poids sec du mélange Kernza-légumineuses à chaque stade de développement et pour chaque association selon les trois traitements de fauche. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet association tandis que les triangles indiquent des moyennes significativement supérieures (vers le haut) ou inférieures (vers le bas) pour le stade de développement. Un triangle noir représente la même tendance pour l'ensemble des associations. \*À la fauche 3, les stades indiqués sont ceux des modalités à vocation grains lorsque les fauches ont été réalisées



#### 4.2.1.4 Composantes de rendement du Kernza

##### 4.2.1.4.1 Densité de talles

Concernant la densité de talles de Kernza, un effet significatif de l'association ( $p\text{-value} < 0,05$ ) et du stade ( $p\text{-value} < 0,01$ ) est observé (Annexe 7). Pour chaque régime de fauche, l'effet de l'association illustre une densité de talles plus importante pour le Kernza pur ou associé au trèfle blanc et plus faible pour le Kernza associé à la luzerne ou au trèfle violet. De son côté, l'effet du facteur stade indique, pour chaque régime de fauche, une baisse de densité au cours du cycle de développement (Annexe 14 ; Figure 7).

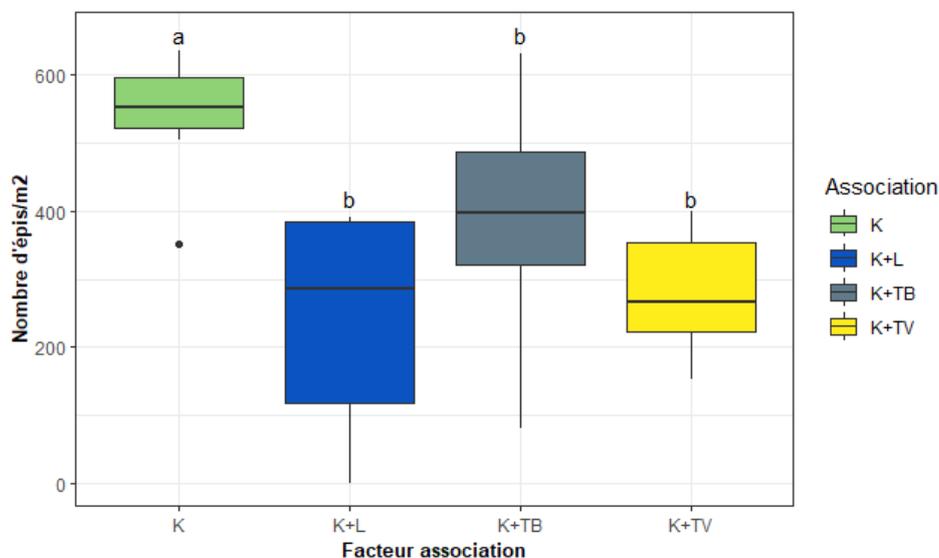
Dans cet essai, l'effet de la fauche a pu être comparé au stade BBCH39 et BBCH65 où on observe une disparition du Kernza au stade BBCH65 lorsque trois fauches sont réalisées alors qu'aucune différence statistiquement significative n'est visible au niveau du nombre de talles entre les trois modalités de fauche au stade BBCH39. Au stade BBCH30 et BBCH39, le Kernza pur et l'association du Kernza au trèfle blanc sont les deux modalités où le nombre de talles est le plus élevé. Au stade BBCH65, seul le Kernza pur possède le plus de talles (Annexe 14). Cependant, une différence est bien visible entre les deux modalités visant une production de grains. En effet, on observe une augmentation du nombre de talles entre la fauche 0 et la fauche 1 lorsque le Kernza est associé au trèfle violet ou à la luzerne alors que cette tendance n'est pas observée pour le Kernza pur ou associé au trèfle blanc. Au stade BBCH65, le nombre de talles par hectare passe de 291 à 378 entre la fauche 0 et 1 pour l'association au trèfle violet et de 227 à 383 pour l'association à la luzerne (Annexe 14).

#### 4.2.1.4.2 Densité d'épis

Un effet significatif ( $p$ -value $<0,01$ ) est révélé pour le facteur Association (Annexe 6). La densité d'épis du Kernza pur est plus élevée par rapport aux modalités en association avec des légumineuses (Annexe 15 ; Figure 7).

Concernant, l'effet des fauches, seules les modalités sans fauche et fauche printanière ont pu être comparées, la modalité fauche multiple n'a pas pu conduire la culture jusqu'au stade floraison. Aucune différence entre fauches n'a été observée ( $p$ -value $>0,05$  ; Annexe 6).

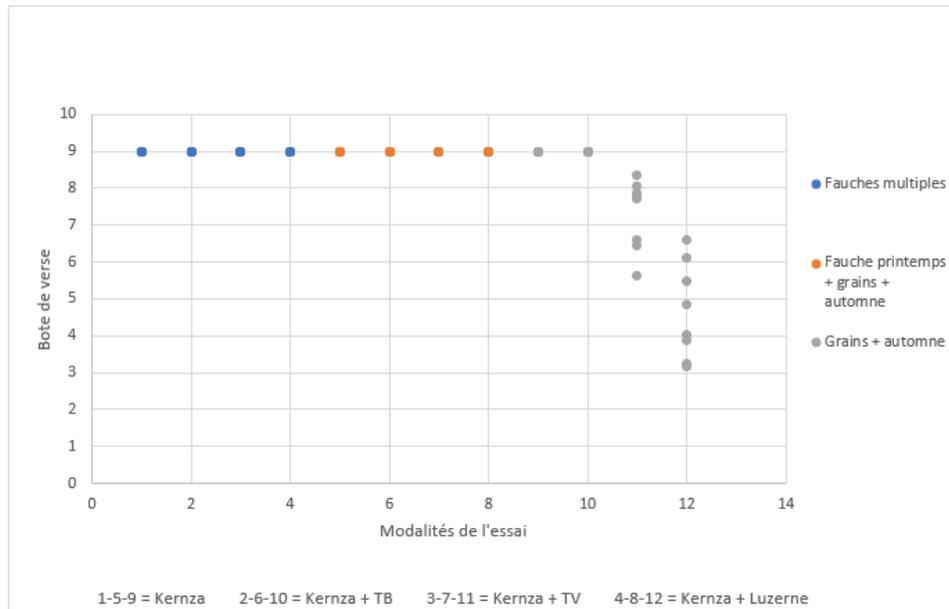
**Figure 7 :** Nombre d'épis/m<sup>2</sup> du Kernza pour chaque association au stade BBCH65. Les lettres représentent les résultats du test SNK pour l'effet association



#### 4.2.1.5 Impact de la verse sur l'essai

Quelques jours avant le prélèvement des échantillons au stade BBCH65, de fortes pluies ont eu comme conséquence l'apparition de verse sur certaines parcelles de l'essai. Une cotation verse a donc été réalisée le 26 juin 2023 (CRA-W, June -26-2023). La graduation de cette cotation va de 0 à 9 avec la totalité de la parcelle versée pour une cotation de 0 et une parcelle sans la moindre trace de verse pour une cotation de 9. La Figure 8 représente les résultats de cette cotation et démontre bien que toutes les parcelles touchées par la verse faisaient partie de la modalité pour laquelle aucune fauche n'a été réalisée (production grains + fourrage en automne). De plus, seules les modalités d'association du Kernza au trèfle violet (modalité 11) et à la luzerne (modalité 12) présentaient de la verse.

**Figure 8 :** Cotation de la verse réalisée sur l'ensemble des parcelles de l'essai K21-01 le 26/06/2023



## 4.2.2 Conduite pour la production de fourrage

### 4.2.2.1 Performance du Kernza

Seul un effet significatif ( $p$ -value < 0,001) est observé pour le facteur stade (Annexe 3). Comme montré par la Figure 4 et décrit sur l'Annexe 8, la production la plus importante de Kernza est réalisée au stade BBCH39, suivie par le stade BBCH30. En revanche, la production est quasi nulle au stade BBCH65 où 3 fauches consécutives ont été réalisées avec une moyenne de  $0,15 \pm 0,03$  t de MS ha<sup>-1</sup>.

### 4.2.2.2 Performance des légumineuses

L'analyse de la modalité fauche 3 est identique à celle de la fauche 1 avec pour seule distinction, une différence significativement plus importante entre les stades au niveau de l'association « K + L ». En effet, c'est au stade BBCH65 que la quantité de matière sèche est la plus élevée alors qu'elle est la plus faible au stade 39BBCH. Le stade BBCH30 se trouve à un niveau intermédiaire entre ceux-ci (Annexe 9).

### 4.2.2.3 Performance du mélange Kernza-légumineuses

Seul un effet significatif ( $p$ -value < 0,001) du facteur association est observé au stade BBCH65 sur la production de matière sèche du mélange Kernza-légumineuses, avec les valeurs les plus élevées pour l'association du Kernza au trèfle violet et à la luzerne. Tandis qu'une très faible production du Kernza pur est observée à ce stade (Annexe 10 ; Figure 6).

Concernant le facteur stade, un effet significatif est seulement observé pour le Kernza pur ou associé au trèfle blanc, la quantité de matière sèche produite est similaire entre le stade BBCH30 et BBCH39 et chute ensuite au stade BBCH65. La production reste constante pendant la phase de développement pour l'association du Kernza au trèfle violet et à la luzerne (Annexe 10 ; Figure 6).

## 4.2.3 Composition et production totale cumulée au stade BBCH65

### 4.2.3.1 Biomasse totale cumulée du Kernza

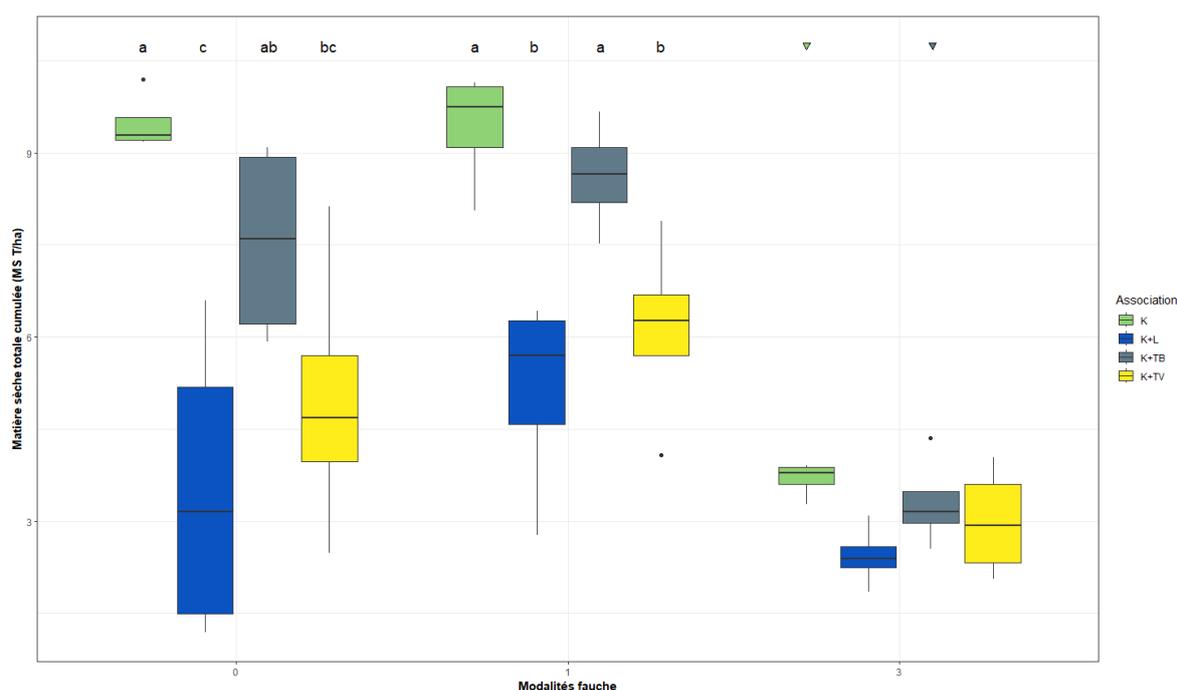
La biomasse cumulée au cours du cycle de développement du Kernza a été calculée au stade BBCH65 pour les différentes fauches réalisées.

Concernant le facteur association, un effet significatif est observé pour les modalités visant la production de grain (pas de fauche et fauche printanière) ( $p$ -value < 0,01 ; Annexe 3). Comme illustré

par la Figure 9 et décrit sur l'Annexe 12, les productions les plus importantes ont été obtenues avec le Kernza pur et associé au trèfle blanc, tandis que le Kernza associé à la luzerne et au trèfle violet a produit le moins de matières sèches.

L'effet de la fauche est significatif pour l'association « K » et « K+TB » ( $p\text{-value} < 0,001$  ; Annexe 3) où la fauche multiple ne visant que la production fourragère possède une production de matière sèche plus faible que les autres modalités visant la production de grain (Figure 9 ; Annexe 12).

**Figure 9** : Matière sèche totale cumulée du Kernza au Stade BBCH65 pour chaque association selon les trois modalités de fauche. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet association tandis que les triangles vers le bas indiquent une moyenne significativement inférieure par rapport aux autres stades. \*À la fauche 3, les stades indiqués sont ceux des modalités à vocation grains lorsque les fauches ont été réalisées



#### 4.2.3.2 Biomasse totale cumulée des légumineuses

Pour la matière sèche totale cumulée des légumineuses, un effet très hautement significatif ( $p\text{-value} < 0,001$  ; Annexe 4) est présent pour le facteur association. Le trèfle violet est la légumineuse qui produit le plus de matière sèche, suivie par la luzerne.

Un effet hautement significatif ( $p\text{-value} < 0,01$ ) de la fauche a été observé pour la production du trèfle blanc. Contrairement à la luzerne et au trèfle violet, la fauche printanière ainsi que la fauche multiple augmentent la production totale du trèfle blanc (Annexe 13). Concernant l'association, la luzerne et le trèfle violet sont les légumineuses qui produisent le plus de matière sèche.

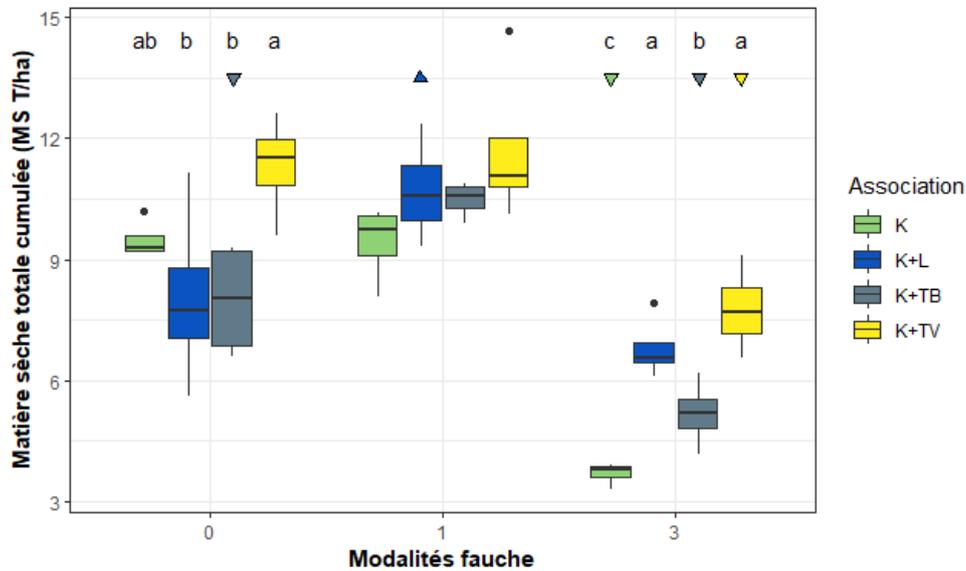
#### 4.2.3.3 Biomasse totale cumulée du mélange Kernza-légumineuses

Un effet significatif ( $p\text{-value} < 0,05$ ) du facteur association est observé pour le régime sans fauche ainsi que le régime multifauche, contrairement à la fauche printanière où la production totale du mélange est similaire entre les différentes associations ( $p\text{-value} > 0,05$  ; Figure 10). Le régime sans fauche possède la plus importante production de matière sèche avec du Kernza associé avec du trèfle violet suivi par le Kernza pur. Concernant le régime multifauche, c'est l'association du Kernza au trèfle violet ou à la luzerne qui produit le plus de matière sèche (Annexe 11 ; Figure 10 ; Tableau 5).

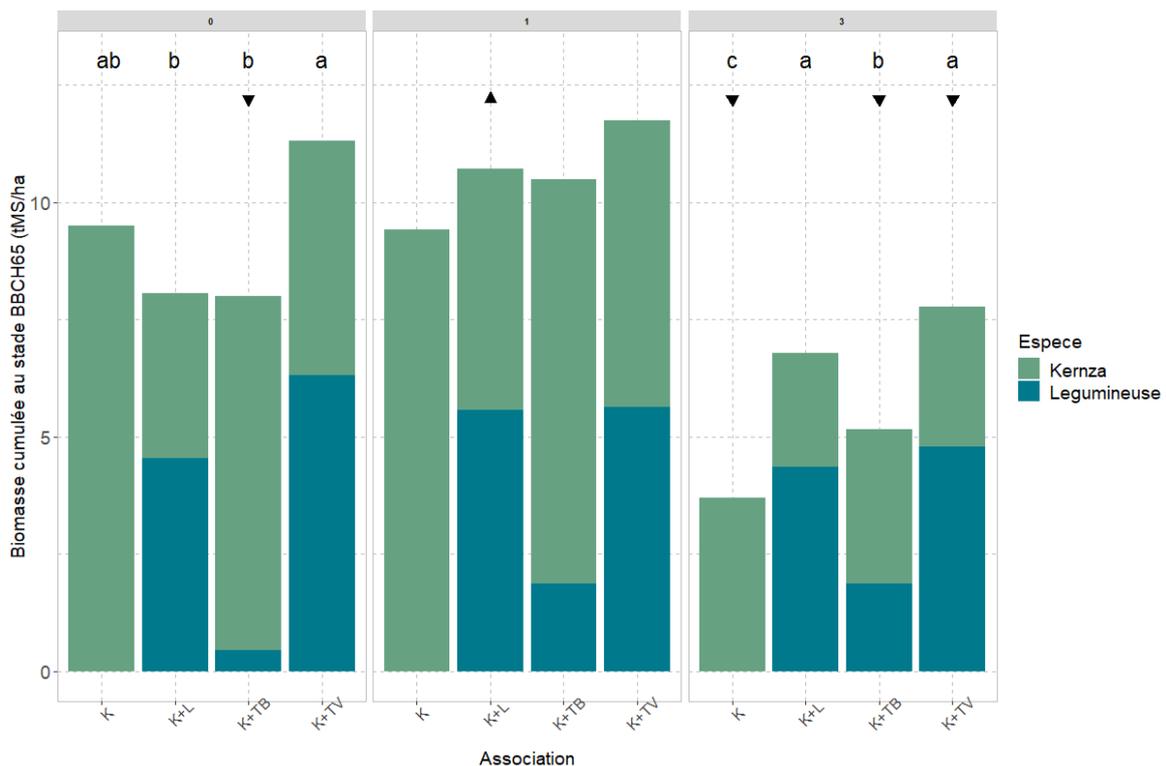
Concernant le facteur fauche, un effet significatif est observé ( $p\text{-value} < 0,05$ ). Le régime multifauche produit le moins de matière sèche totale pour le mélange Kernza-légumineuses. Globalement, la

fauche printanière produit le plus de biomasses, bien que les quantités de matière sèche produite entre un régime sans fauche et une fauche printanière soient similaires pour le Kernza pur et associé au trèfle violet (Annexe 11 ; Figure 10 ; Tableau 5).

**Figure 10 :** Matière sèche totale cumulée du mélange Kernza-légumineuses au stade BBCH65 pour chaque association selon les trois modalités de fauche. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet association tandis que les triangles indiquent des moyennes significativement supérieures (vers le haut) ou inférieures (vers le bas) de la fauche. \*À la fauche 3, les stades indiqués sont ceux des modalités à vocation grains lorsque les fauches ont été réalisées



**Figure 11 :** Répartition de la matière sèche totale cumulée au stade BBCH65 selon le type de culture (Kernza ou Légumineuse) pour les trois modalités de fauche. Les lettres minuscules représentent le résultat des tests SNK du facteur association alors que les triangles noirs indiquent des moyennes significativement supérieures (vers le haut) ou inférieures (vers le bas) de la fauche. \*À la fauche 3, les stades indiqués sont ceux des modalités à vocation grains lorsque les fauches ont été réalisées



**Tableau 5** : Moyennes de la matière sèche totale cumulée des mélanges de Kernza-légumineuses au stade BBCH65 pour les facteurs association et fauche. Les lettres minuscules correspondent au facteur association alors que les lettres majuscules en gras caractérisent le facteur fauche

Association	BBCH65								
	PS TOT mélange								
	Fauche 0			Fauche 1			Fauche 3		
K	9,49 ± 0,24	ab	<b>A</b>	9,42 ± 0,48	a	<b>A</b>	3,69 ± 0,14	c	<b>B</b>
K + TB	7,99 ± 0,72	b	<b>B</b>	10,49 ± 0,22	a	<b>A</b>	5,17 ± 0,42	b	<b>C</b>
K + TV	11,31 ± 0,64	a	<b>A</b>	11,74 ± 1,00	a	<b>A</b>	7,77 ± 0,54	a	<b>B</b>
K + L	8,06 ± 1,15	b	<b>B</b>	10,71 ± 0,65	a	<b>A</b>	6,79 ± 0,40	a	<b>B</b>

#### 4.2.3.4 Proportion de Kernza et de légumineuses dans le mélange

Concernant la proportion de Kernza et de légumineuses au sein du mélange au stade BBCH65, le Tableau 6 reprend les résultats de l'analyse ANOVA ainsi que les valeurs moyennes pour chacun des deux facteurs association et stade.

Pour le facteur association, la modalité « K + TB » présente le pourcentage le plus élevé de Kernza au sein du mélange après le Kernza pur (p-value < 0,01 ; Tableau 6 ; Figure 11).

Concernant le facteur fauche, les modalités visant la production de grain (i.e., pas de fauche ou fauche printanière) présentent le pourcentage le plus élevé de Kernza alors que la modalité multifauche a une moyenne plus faible. Cependant, les trois modalités de fauche ont un pourcentage de Kernza supérieur à 50 %. (Tableau 6 ; Figure 11).

**Tableau 6** : Analyse ANOVA et tableau des moyennes du pourcentage de Kernza et de légumineuses présent au sein du mélange au stade BBCH65. Les lettres représentent les résultats des tests SNK. Les \* indiquent les niveaux de significativité. «\*\*\* : p-valeur < 0,001, \*\* : p-valeur < 0,01, \* p-valeur < 0,05, « . » < 0,1. Df = Degré de liberté, PS = Poids sec

AV2 : Association*Fauche				
Stade BBCH65				
	% Kernza		% Legumineuse	
	Df	p-valeur	Df	p-valeur
Association (A)	3	***	3	***
Fauche (F)	2	**	2	**
Blocs	1		1	
A*F	6	.	6	.
Residus	35		35	

AV2 : Association*Fauche				
Stade BBCH65				
Moyennes facteur association				
	% Kernza		% Legumineuse	
	K	100 ± 0,00	a	0 ± 0,00
K + TB	79,86 ± 4,07	b	20,14 ± 4,07	b
K + TV	44,56 ± 3,88	c	55,44 ± 3,88	a
K + L	41,22 ± 4,13	c	58,78 ± 4,13	a

Moyenne facteur fauche				
0	69,5 ± 7,84	<b>A</b>	30,5 ± 7,84	<b>B</b>
1	70,42 ± 5,92	<b>A</b>	29,58 ± 5,92	<b>B</b>
3	59,31 ± 6,80	<b>B</b>	40,69 ± 6,80	<b>A</b>

### 4.3 Analyse de la qualité de la matière sèche

Les tableaux repris en annexe (Annexe 16, Annexe 17 et Annexe 18) présentent l'ensemble des résultats des ANOVA réalisées sur les paramètres chimiques, énergétiques et protéiques du Kernza, des légumineuses et de leurs mélanges (voire section 3.9.1. M & M décrivant les paramètres sélectionnés). Les résultats des tests SNK en découlant sont présentés en Annexe 19 pour le Kernza, en Annexe 20 et Annexe 21 pour les légumineuses ainsi qu'en Annexe 22 et Annexe 23 pour le mélange Kernza-légumineuses.

### 4.3.1 Conduite pour la production de grains

#### 4.3.1.1 Qualité du Kernza

##### 4.3.1.1.1 Constituants du fourrage

Concernant les modalités visant la production de grains (Fauche 0 et 1), un effet très hautement significatif ( $p$ -value $<0,001$  ; Annexe 16) est observé pour le facteur stade sur l'ensemble des constituants fourragers sélectionnés. Les teneurs en cendres, CP et OMD diminuent tout au long de la saison culturale alors que les teneurs en NDF, ADF, ADL et CEL sont minimales au redressement et augmentent ensuite jusqu'à la floraison (Annexe 19).

Concernant l'effet de l'association, celui-ci est uniquement significatif ( $p$ -value $<0,05$  ; Annexe 16) pour l'ADL lorsqu'aucune fauche n'est réalisée ainsi que pour la cellulose lors de la réalisation d'une fauche printanière. Globalement, l'effet de l'association ne modifie pas les constituants du fourrage de Kernza (Annexe 19).

##### 4.3.1.1.2 Valeurs énergétiques et protéiques

Un effet très hautement significatif ( $p$ -value $<0,001$  ; Annexe 16 ; Annexe 18) est observé pour le facteur stade où les valeurs de VEM, VEVI, DVE sont maximales en début de saison avant de diminuer jusqu'à la floraison (Annexe 19). Ces dernières chutent principalement entre le stade BBCH39 et BBCH65. Concernant les valeurs d'OEB, celles-ci sont négatives et chutent entre le stade BBCH30 et BBCH39 avant de remonter au stade BBCH65.

Concernant le facteur association, un effet significatif ( $p$ -value $<0,05$  ; Annexe 18) est observé sur les valeurs de DVE uniquement au stade BBCH65 lorsqu'aucune fauche n'est réalisée. Des valeurs plus élevées pour l'association du Kernza à de la luzerne sont observées (Annexe 19).

#### 4.3.1.2 Qualité des légumineuses

##### 4.3.1.2.1 Constituant du fourrage

Pour les modalités visant la production de grains, un effet significatif ( $p$ -value $<0,05$  ; Annexe 16 ; Annexe 17) du facteur stade est révélé pour les sept constituants du fourrage (i.e., cendres, CP, NDF, ADF, ADL, CEL, DMO). Seul le taux d'ADL ne présente pas de différence significative pour le trèfle blanc lorsqu'aucune fauche n'est réalisée. De manière générale, les taux de cendres, de CP et d'OMD des légumineuses diminuent au cours de la saison culturale alors que les taux d'NDF, d'ADF, d'ADL et de CEL augmentent au cours de la saison. Cette réduction de CP et d'OMD couplée à la hausse des contenus en fibres semble plus prononcée pour le trèfle violet et la luzerne que pour le trèfle blanc (Annexe 20).

Concernant l'effet de l'association, celui-ci est significatif ( $p$ -value $<0,05$  ; Annexe 16 ; Annexe 17) pour tous les constituants sélectionnés hormis pour la teneur en CP au stade BBCH65 et la teneur en ADL au stade BBCH30. Au niveau des quatre constituants fibreux (NDF, ADF, ADL et CEL), globalement la luzerne possède le taux de fibres le plus élevé alors que le trèfle blanc possède le plus faible taux (Annexe 20). Concernant la valeur d'OMD, le trèfle blanc possède la valeur la plus élevée et la luzerne la valeur la plus faible. Le trèfle violet se situe entre ces deux extrêmes. Concernant les cendres, le trèfle blanc a les valeurs les plus élevées à chaque stade de développement. Enfin pour les teneurs en CP le trèfle blanc et la luzerne ont les valeurs les plus élevées, excepté au stade BBCH65 où seul le trèfle blanc possède le contenu en protéines le plus élevé. (Annexe 20).

##### 4.3.1.2.2 Valeurs énergétiques et protéiques

Un effet hautement significatif ( $p$ -value $<0,01$  ; Annexe 16 ; Annexe 17) du facteur stade est observé pour les quatre valeurs analysées : VEM, VEVI, DVE et OEB. En effet, pour les modalités visant la production de grains, on observe une diminution de ces valeurs au cours du développement de la

culture (Annexe 21). Au niveau des légumineuses, les valeurs d'OEB sont positives contrairement au Kernza.

Concernant le facteur association, un effet significatif ( $p$ -value $<0,05$  ; Annexe 16 ; Annexe 17) est également observé pour toutes les valeurs énergétiques et protéiques. Le trèfle blanc est celui possédant les valeurs de VEM, VEVI et DVE les plus élevées tout au long du cycle de développement. À la fin du cycle de développement, ces valeurs sont les plus faibles pour la luzerne. Le trèfle violet présente une situation intermédiaire. Enfin, la luzerne et le trèfle blanc ont les teneurs les plus élevées d'OEB lorsqu'aucune fauche n'est réalisée. Lorsqu'une fauche est réalisée, l'OEB de la luzerne est supérieure aux valeurs des autres espèces (Annexe 21).

#### 4.3.1.3 *Qualité du mélange Kernza-légumineuses*

##### 4.3.1.3.1 *Constituant du fourrage*

Concernant l'effet du stade, un effet hautement significatif ( $p$ -value $<0,01$  ; Annexe 16 ; Annexe 18) est observé pour tous les constituants du fourrage. Les teneurs en cendres, CP et DMO diminuent au cours de la saison culturale. En revanche, pour les constituants NDF, ADF, ADL et CEL, leurs teneurs augmentent au cours du cycle de développement de la culture (Annexe 22).

Un effet significatif ( $p$ -value $<0,05$  ; Annexe 16) de l'association est observé pour les teneurs en cendres, CP, NDF, ADF et OMD. En revanche la teneur en ADL et CEL semble moins variable, avec un effet de l'association uniquement observé à certains stades des différentes modalités de fauche (i.e., fauche 0 et 1) ( $p$ -value $<0,05$  ; Annexe 16 ; Annexe 18). Globalement la teneur en cendres est la plus faible avec le Kernza pur et la plus élevée lorsqu'il est associé à la luzerne. Concernant la teneur en CP, celle-ci augmente particulièrement en association avec de la luzerne ou du trèfle violet (Annexe 22). Bien qu'une différence statistique ait été obtenue pour l'OMD, celui-ci ne semble pas être modifié avec l'association. Finalement, l'association du Kernza au trèfle violet ou la luzerne semble légèrement diminuer les valeurs en fibres (NDF, ADF, CEL).

##### 4.3.1.3.2 *Valeurs énergétiques et protéiques*

L'effet du stade est significatif pour les modalités visant la production de grains ( $p$ -value $<0,05$  ; Annexe 16 ; Annexe 18). Seule la valeur d'OEB pour l'association du Kernza au trèfle blanc ne montre pas d'effet significatif entre les différents stades lorsqu'une fauche printanière est réalisée. En revanche, les valeurs de VEM, VEVI et DVE diminuent au cours de la saison culturale pour l'ensemble des modalités du facteur association (Annexe 22). Concernant l'OEB, pour le Kernza pur, celui-ci diminue au stade BBCH39 avant d'atteindre la valeur la plus élevée au stade BBCH65. En revanche, lorsque le Kernza est associé à une légumineuse, l'OEB chute au stade BBCH39 et reste ensuite constant jusqu'à la floraison.

Concernant l'effet de l'association, celui-ci est significatif aux différents stades de développement ( $p$ -value $<0,05$  ; Annexe 16 et Annexe 18). Ces valeurs sont augmentées par l'association du Kernza à différentes légumineuses et particulièrement avec le trèfle violet et la luzerne. Une tendance est observée au niveau des VEM, VEVI et DEV pour les modalités de fauche 0 et 1. Aux stades BBCH30 et 39, les trois légumineuses présentent des valeurs statistiquement semblables alors qu'au stade BBCH65, les valeurs pour l'association K+TB sont statistiquement identiques à celles du Kernza pur. En revanche les valeurs des associations K+TV et K+L restent semblables entre elles, mais significativement supérieures aux deux autres (Annexe 23).

## 4.3.2 Conduite pour la production de fourrage

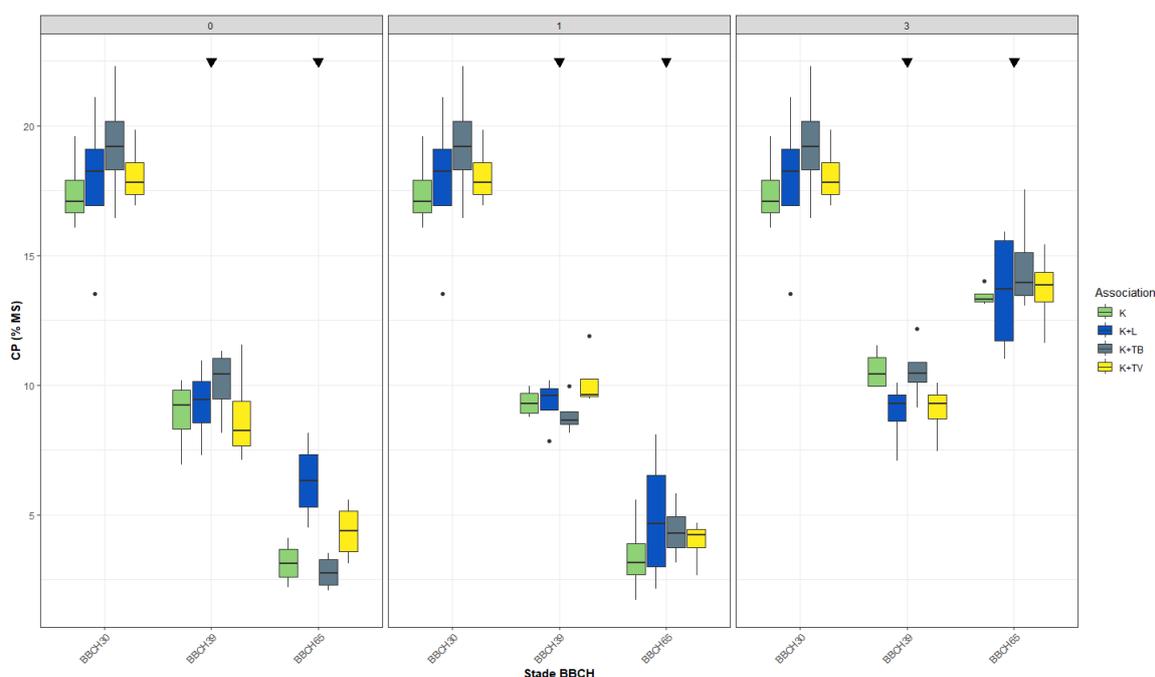
### 4.3.2.1 Qualité du Kernza

#### 4.3.2.1.1 Constituants du fourrage

Un effet très hautement significatif ( $p$ -value $<0,001$  ; Annexe 16) est observé pour le facteur nombre de coupes au niveau de la modalité ne visant que la production fourragère. Les taux de NDF, ADF, ADL et de CEL augmentent au cours des différentes coupes alors que la digestibilité (OMD) du Kernza diminue. De plus, par rapport aux modalités visant la production de grains, les teneurs en CP et les cendres évoluent différemment au cours de la saison culturale. Comme illustré par la figure A pour la CP et décrit dans l'Annexe 19, les teneurs en CP et cendres chutent au moment de la 2<sup>e</sup> coupe (i.e., réalisée au stade BBCH39 des modalités visant la production de grains) avant d'augmenter à nouveau lors de la 3<sup>e</sup> coupe (i.e., réalisée au stade BBCH65 des modalités visant la production de grains) (Figure 12).

En revanche, aucun effet significatif n'est observé concernant le facteur association (Annexe 16).

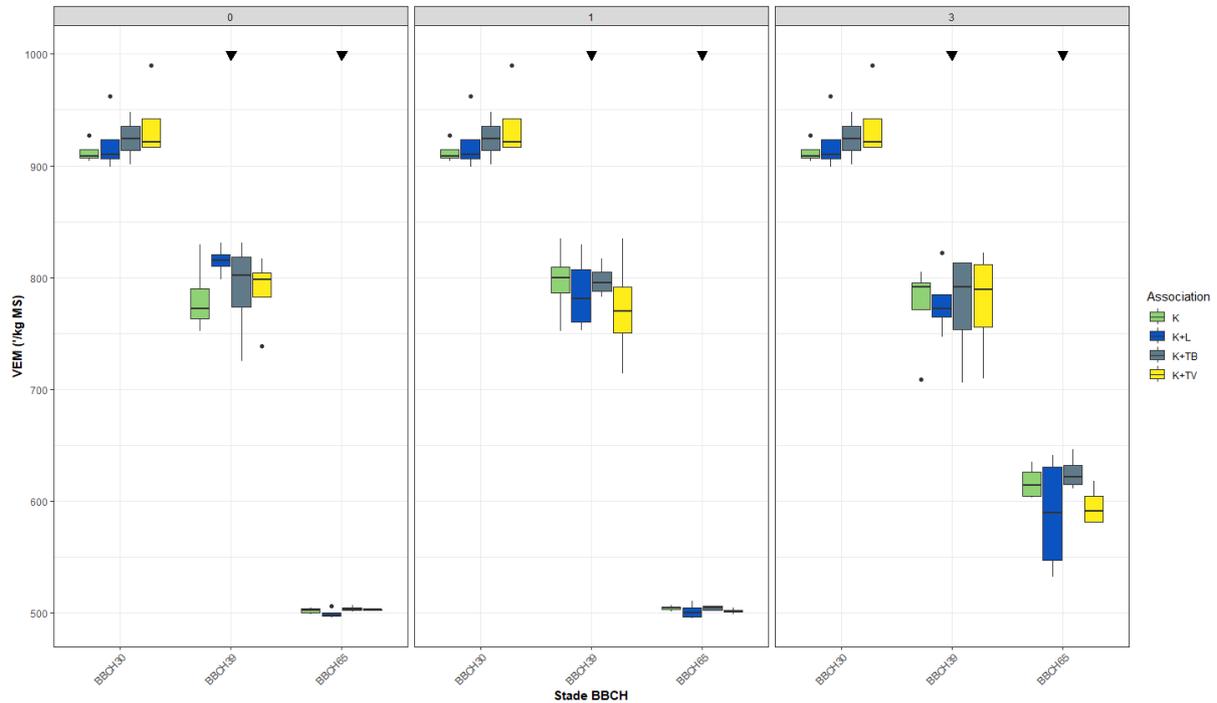
**Figure 12** : Évolution des teneurs en protéines (CP) du Kernza au cours de la saison culturale selon les trois modalités de fauche. Les triangles noirs vers le bas indiquent une diminution significative pour le facteur stade de l'ensemble des modalités du facteur association. \*À la fauche 3, les stades indiqués sont ceux des modalités à vocation grains lorsque les fauches ont été réalisées



#### 4.3.2.1.2 Valeurs énergétiques et protéiques

L'analyse des valeurs énergétiques et protéiques montre un effet très hautement significatif du facteur nombre de coupes ( $p$ -value $<0,001$ ), contrairement au facteur association où aucun effet n'est observé (Annexe 16). Les valeurs VEM, VEVI, DVE diminuent d'une coupe à l'autre (Annexe 19 ; Figure 13). Les valeurs d'OEB sont assez négatives lors des deux premières coupes et un peu plus élevées pour la dernière coupe réalisée (i.e., réalisée au moment du stade BBCH65 pour les modalités à vocations grains).

**Figure 13** : Évolution de la quantité de VEM du Kernza au cours de la saison culturale selon les trois modalités de fauche. Les triangles noirs vers le bas indiquent une diminution significative du facteur stade pour l'ensemble des modalités du facteur association. \*À la fauche 3, les stades indiqués sont ceux des modalités à vocation grains lorsque les fauches ont été réalisées



#### 4.3.2.2 Qualité des légumineuses

##### 4.3.2.2.1 Constituant du fourrage

Un effet significatif ( $p\text{-value} < 0,05$ ) est révélé pour le facteur nombre de coupes (Annexe 16 et Annexe 17). Les valeurs des paramètres fibreux (NDF, ADF, ADL et cellulose) augmentent au cours du nombre de coupes jusqu'à la 3<sup>e</sup> coupe (i.e., réalisée au stade BBCH65 pour les modalités à production de grains) où elles sont les plus élevées. En revanche, les teneurs en cendres, CP et OMD diminuent au cours du nombre de coupes (Annexe 20). Toutefois, cette tendance semble moins marquée pour la luzerne dont les différents paramètres semblent relativement constants d'une coupe à l'autre.

Concernant l'effet de l'association, celui-ci est significatif ( $p\text{-value} < 0,05$  ; Annexe 16 et Annexe 17) aux différents stades de coupes pour tous les constituants du fourrage à l'exception de la teneur en ADL lors des deux premières coupes. Globalement, la luzerne est celle qui possède le taux de CP le plus élevé aux trois coupes. Lors de la première coupe, le trèfle blanc a des teneurs en CP élevées et similaires à la luzerne. Concernant les paramètres fibreux, la luzerne possède globalement les teneurs les plus élevées, excepté pour l'ADL où la gamme de variations semble plus faible. Concernant la teneur en cendre, les teneurs du trèfle violet sont les plus faibles. Enfin, la valeur d'OMD est la plus élevée pour le trèfle blanc et la plus faible pour la luzerne (Annexe 20).

##### 4.3.2.2.2 Valeurs énergétiques et protéiques

Un effet significatif ( $p\text{-value} < 0,05$  ; Annexe 16 et Annexe 17) du facteur nombre de coupes est observé avec une diminution des valeurs (VEM, VEVI, DVE et OEB) lors des différentes coupes réalisées (Annexe 20). Bien que significative cette réduction dans les valeurs de VEM et VEVI est limitée, contrairement à la diminution du nombre de DVE et d'OEB. On peut également mentionner que la diminution du nombre d'OEB de la luzerne avec le nombre de coupes est très faible.

Concernant le facteur association, un effet hautement significatif ( $p$ -value $<0,01$  ; Annexe 16 et Annexe 17) est également observé pour les quatre valeurs énergétiques et protéiques, excepté la teneur en DVE lors de la deuxième et troisième coupe (i.e., stades BBCH39 et BBCH65 des modalités à production de grain ; Annexe 20). Les teneurs en VEM, VEVI et DVE (pour la première coupe) sont les plus élevées pour le trèfle blanc. En revanche, lors de la première coupe, ce sont la luzerne et le trèfle blanc qui montrent les teneurs en OEB les plus élevées et pour les fauches suivantes, seule la luzerne conserve la valeur d'OEB la plus élevée (i.e., stades BBCH39 et BBCH65) (Annexe 21).

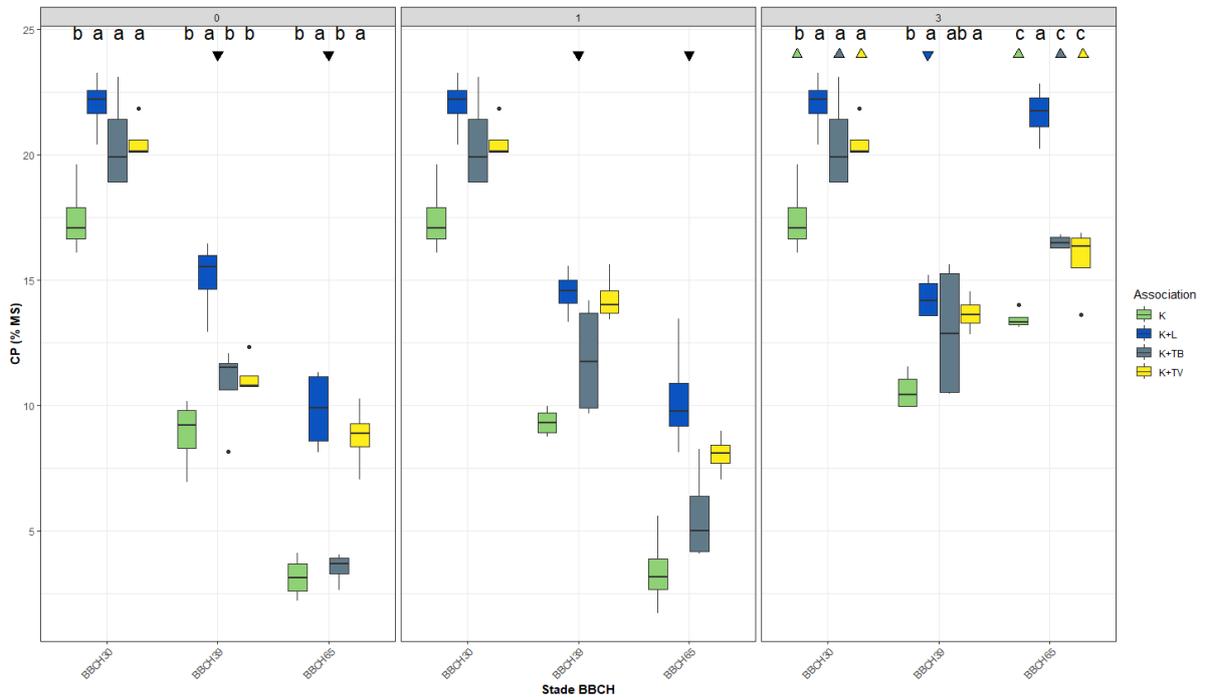
#### 4.3.2.3 Qualité du mélange Kernza-légumineuses

##### 4.3.2.3.1 Constituant du fourrage

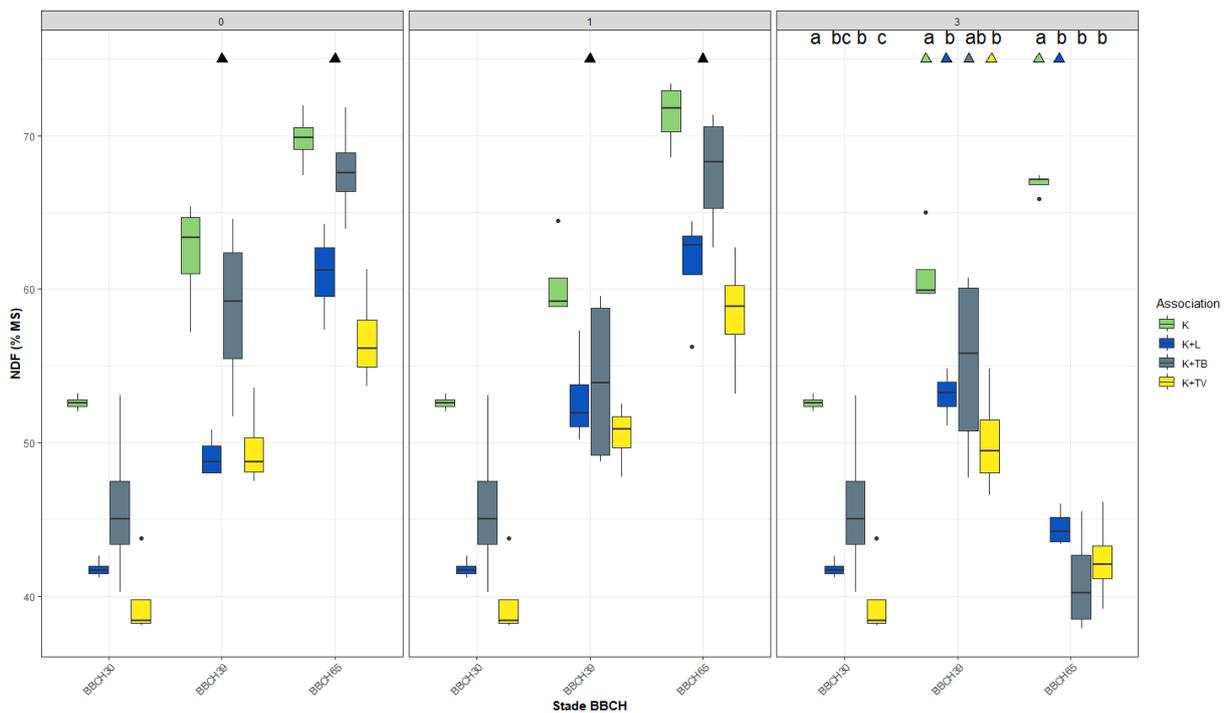
Un effet significatif du facteur nombre de coupes ( $p$ -value $<0,05$  ; Annexe 16, Annexe 18) est observé pour tous les constituants sélectionnés. Concernant la teneur en cendres, celle-ci est peu variable, mais semble généralement plus faible lors de la deuxième coupe (i.e., BBCH39) sauf pour l'association au trèfle violet ou elle semble plus élevée à la première coupe (Annexe 22). Le taux de protéines (CP) est le plus élevé lors de la première coupe et le plus faible lors de la 2<sup>e</sup> coupe (Annexe 22 ; Figure 14). Concernant les teneurs d'ADF et d'ADL, celles-ci augmentent avec la succession des coupes. Les teneurs en NDF sont les plus faibles pour les modalités associées et les plus élevées pour la modalité Kernza pur (Figure 15). La teneur en cellulose est, elle, la plus élevée lors de la 2<sup>e</sup> coupe. Enfin, la digestibilité est la plus élevée lors de la première coupe. Pour les modalités associées, la digestibilité est similaire entre la 2<sup>e</sup> et la 3<sup>e</sup> coupe, tandis qu'elle chute d'une coupe à l'autre pour la modalité de Kernza pur (Annexe 22 ; Figure 16).

Concernant l'effet de l'association, celui-ci est significatif ( $p$ -value $<0,05$  ; Annexe 18) pour tous les constituants du fourrage sauf lors de la deuxième coupe pour les teneurs en cendres, ADF, ADL et OMD. Les teneurs en CP sont les plus faibles pour le Kernza pur pour les deux premières coupes par rapport aux modalités associées. Lors de la 3<sup>e</sup> coupe, l'association du Kernza à la luzerne montre le plus haut taux de CP par rapport aux trois autres modalités qui sont similaires entre elles (Annexe 22 ; Figure 14). Comme illustré par la Figure 15 pour le NDF et décrit dans l'Annexe 22, le Kernza pur possède la teneur en fibres (i.e., cellulose et NDF) la plus élevée à chaque coupe, tandis qu'elle est la plus élevée pour l'ADL et l'ADF lors de la 3<sup>e</sup> coupe. Enfin, concernant la digestibilité (DMO), aucune différence entre associations n'est observée pour les deux premières coupes. Lors de la 3<sup>e</sup> coupe, l'association au trèfle blanc montre la digestibilité la plus élevée, tandis que le Kernza pur a le plus faible taux de digestibilité (Figure 16).

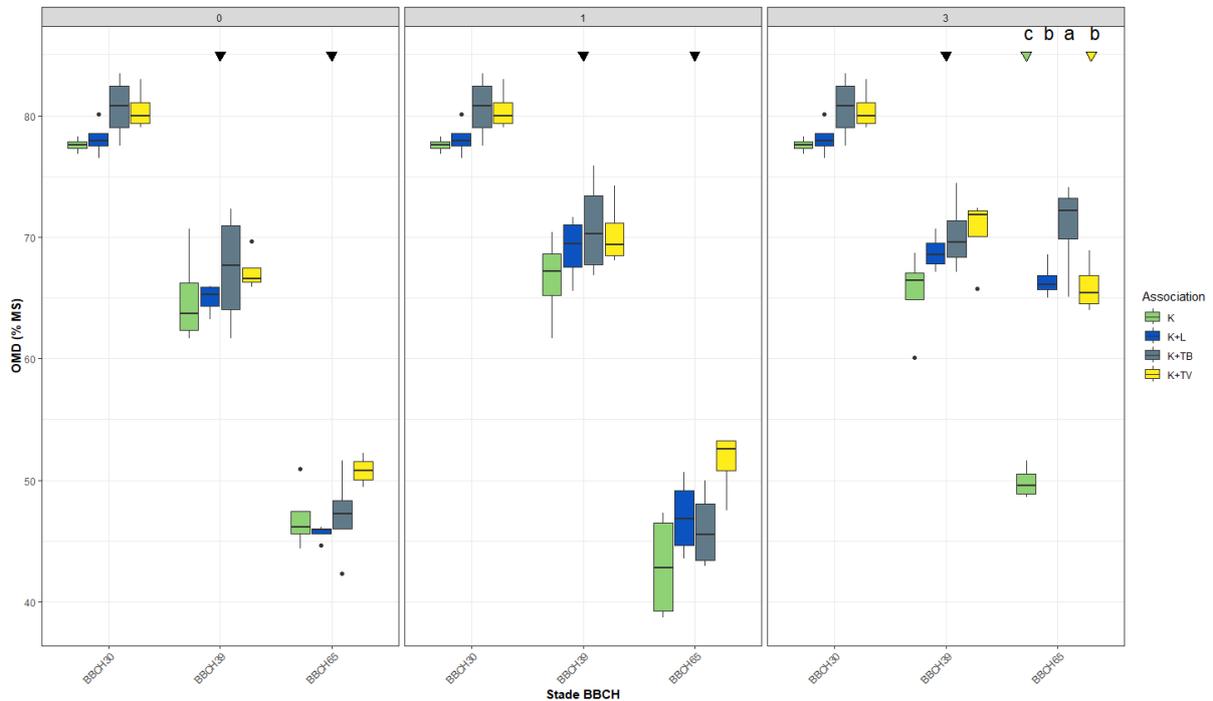
**Figure 14** : Évolution du taux de protéines (CP) du mélange Kernza-légumineuses au cours de la saison culturale selon les trois modalités de fauche. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet association tandis que les triangles vers le haut (bas) indiquent une moyenne significativement supérieure (inférieure) par rapport aux autres stades. Un triangle noir représente la même tendance pour l'ensemble des associations. \*À la fauche 3, les stades indiqués sont ceux des modalités à vocation grains lorsque les fauches ont été réalisées



**Figure 15** : Évolution du taux d’NDF du mélange Kernza-légumineuses au cours de la saison culturale selon les trois modalités de fauche. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l’effet association tandis que les triangles vers le haut indiquent une moyenne significativement supérieure par rapport aux autres stades. Un triangle noir représente la même tendance pour l’ensemble des associations. \*À la fauche 3, les stades indiqués sont ceux des modalités à vocation grains lorsque les fauches ont été réalisées



**Figure 16** : Évolution du taux d'OMD du mélange Kernza-légumineuses au cours de la saison culturale selon les trois modalités de fauche. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet association tandis que les triangles vers le bas indiquent une moyenne significativement inférieure par rapport aux autres stades. Un triangle noir représente la même tendance pour l'ensemble des associations. \*À la fauche 3, les stades indiqués sont ceux des modalités à vocation grains lorsque les fauches ont été réalisées

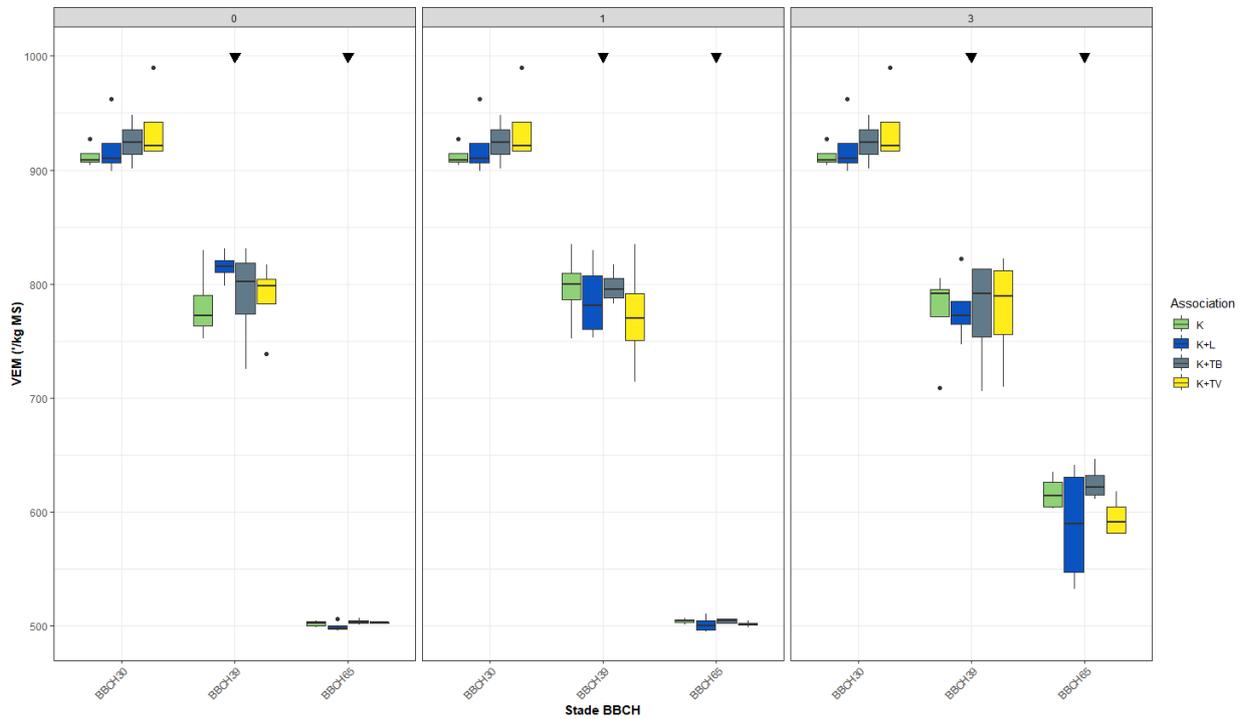


#### 4.3.2.3.2 Valeurs énergétiques et protéiques

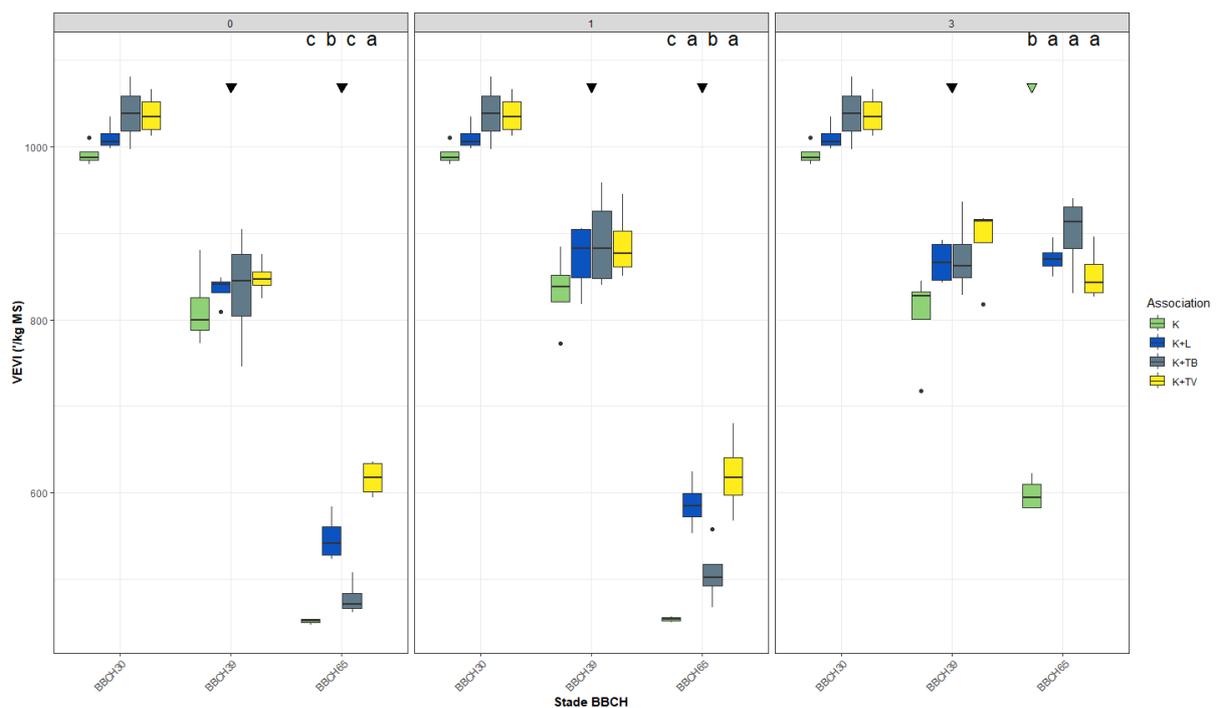
Un effet hautement significatif du facteur nombre de coupes ( $p$ -value $<0,01$  ; Annexe 18) est observé pour l'ensemble des valeurs énergétiques et protéiques. Les valeurs de VEM, VEVI et DVE du Kernza pur diminuent avec le nombre de coupes. En revanche, lorsque le Kernza est associé, ces valeurs diminuent uniquement lors de la 2<sup>e</sup> coupe pour ensuite remonter lors de la 3<sup>e</sup> coupe (Annexe 23 ; Figure 16 ; Figure 18). Au niveau des valeurs de DVE, celles-ci diminuent au stade BBCH39 et augmentent à nouveau au stade BBCH65 pour l'association du Kernza au trèfle blanc et à la luzerne alors qu'elles restent constantes pour l'association au trèfle violet (Figure 19). Concernant les valeurs d'OEB, celles-ci sont les plus élevées à la 3<sup>e</sup> coupe et pour les modalités associées aux légumineuses, elles sont les plus faibles lors de la 2<sup>e</sup> coupe (Annexe 23 ; Figure 20).

Concernant l'effet du facteur association, celui-ci est significatif ( $p$ -value $<0,05$  ; Annexe 18) pour les quatre données analysées à l'exception de la valeur VEVI lors des deux premières coupes. Globalement, ces valeurs sont plus faibles pour le Kernza pur par rapport aux modalités associées (Annexe 23 ; Figure 17 ; Figure 18 ; Figure 19). Enfin, les valeurs d'OEB semblent plus élevées lorsque le Kernza est associé à la luzerne (Figure 20).

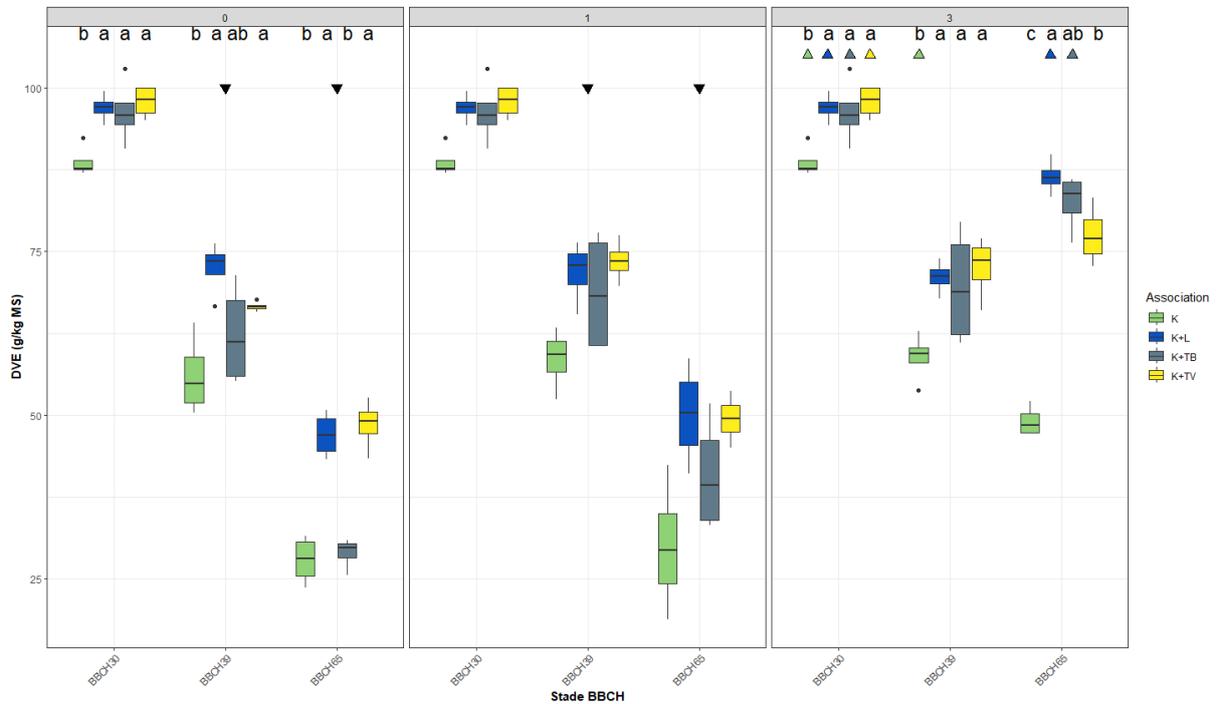
**Figure 17 :** Évolution de la quantité de VEM du mélange Kernza-légumineuses au cours de la saison culturale selon les trois modalités de fauche. Les triangles noirs indiquent une moyenne significativement inférieure pour l'ensemble des associations par rapport aux autres stades. \*À la fauche 3, les stades indiqués sont ceux des modalités à vocation grains lorsque les fauches ont été réalisées



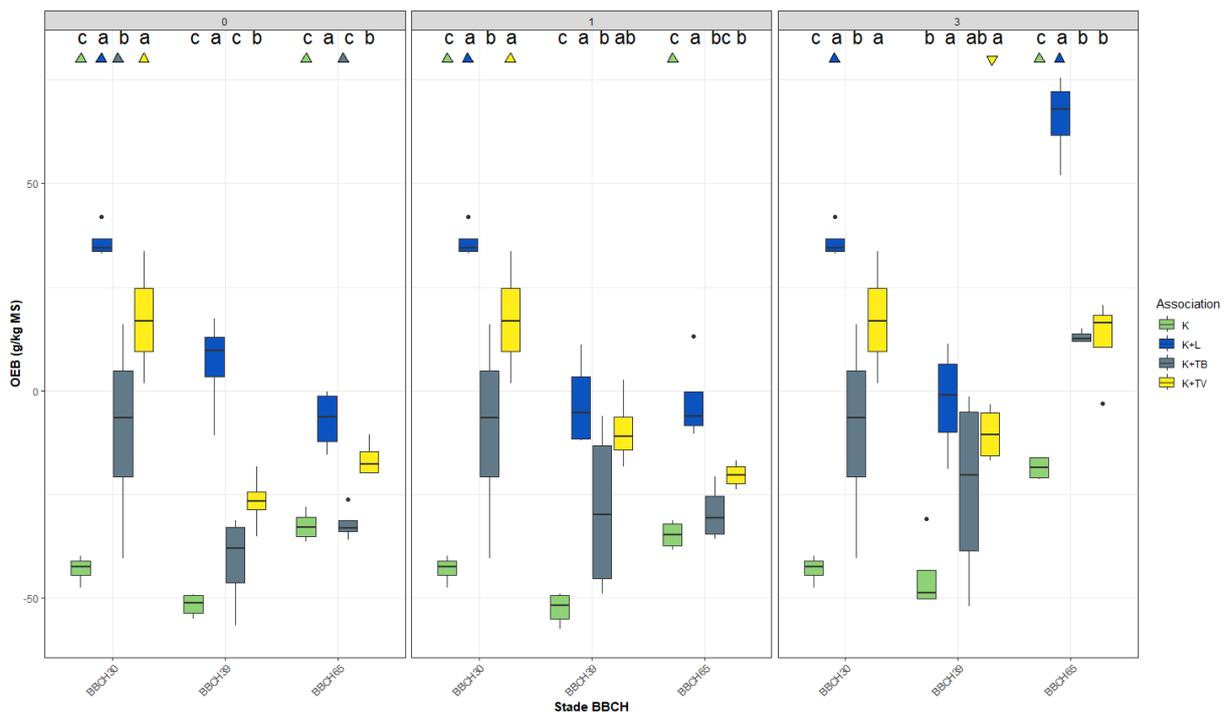
**Figure 18 :** Évolution de la quantité de VEVI du mélange Kernza-légumineuses au cours de la saison culturale selon les trois modalités de fauche. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet association tandis que les triangles vers le bas indiquent une moyenne significativement inférieure par rapport aux autres stades. Un triangle noir représente la même tendance pour l'ensemble des associations. \*À la fauche 3, les stades indiqués sont ceux des modalités à vocation grains lorsque les fauches ont été réalisées



**Figure 19** : Évolution de la quantité de DVE du mélange Kernza-légumineuses au cours de la saison culturale selon les trois modalités de fauche. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet association tandis que les triangles vers le bas (vers le haut) indiquent une moyenne significativement inférieure (supérieure) par rapport aux autres stades. Un triangle noir représente la même tendance pour l'ensemble des associations. \*À la fauche 3, les stades indiqués sont ceux des modalités à vocation grains lorsque les fauches ont été réalisées



**Figure 20** : Évolution de la quantité d'OEB du mélange Kernza-légumineuses au cours de la saison culturale selon les trois modalités de fauche. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet association tandis que les triangles vers le bas (vers le haut) indiquent une moyenne significativement inférieure (supérieure) par rapport aux autres stades. Un triangle noir représente la même tendance pour l'ensemble des associations. \*À la fauche 3, les stades indiqués sont ceux des modalités à vocation grains lorsque les fauches ont été réalisées



#### 4.4 Gestion des adventices

Lors de l'échantillonnage au stade BBCH65, les adventices ont également été prélevées afin de comparer la pression de ces dernières entre les différentes modalités de fauches. C'est dans gestion visant une production fourragère (multifauche) que les adventices sont les moins présentes avec une moyenne de 118,4 kg ha<sup>-1</sup> alors que pour les modalités visant une production grains, les quantités sont plus importantes avec 508,63 kg ha<sup>-1</sup> pour la modalité avec une fauche et 454,75 kg ha<sup>-1</sup> pour la gestion sans aucune fauche.

## 5 Discussion

### 5.1 Spectrométrie proche infrarouge – Modèle prédictif

Comme observé dans le Tableau 4, les critères de qualité du modèle sont bons pour l'ensemble des paramètres chimiques, à l'exception de la MSa et de l'ADL où le  $R^2$  est en dessous de 0,9 et le RPD est inférieur à 3. Concernant la MSa, cela peut s'expliquer par sa gamme de variation qui est très réduite (allant de 91 % à 95 % dans le cas du Kernza). Cela s'observe d'ailleurs au niveau de la Figure 2 (predicted ADL et Predicted aDM) sur laquelle on peut constater que les points ne se répartissent pas parfaitement le long de la bissectrice et que la graduation des axes x et y est fortement restreinte (91,5 % à 95,5 %). Il est donc difficile d'obtenir un  $R^2$  supérieur à 0,9 pour ce paramètre (Virginie Decruyenaere, communication personnelle). En revanche, pour l'ADL, certains critères ne sont pas respectés. En effet, même si le RMSE, le biais et le ND sont faibles, le  $R^2$  est inférieur à 0,9 et le RPD est inférieur à 3. L'une des raisons de l'écart de cette valeur est la faible répétabilité de son analyse chimique en laboratoire. La Figure 2 illustre également cette tendance avec des points s'éloignant également de la bissectrice. De plus, l'ADL est un constituant difficile à doser pour lequel la variabilité et la répétabilité sont plus élevées que d'autres paramètres, provoquant une probabilité d'erreur plus conséquente. Celle-ci se répercute sur la prédiction des valeurs avec une erreur ( $R^2$ ) également plus importante (Virginie Decruyenaere, communication personnelle).

### 5.2 Quantité de fourrage produite

Concernant les rendements de Kernza obtenus au printemps (BBCH30), ceux-ci varient de 0,91 à 1,69 T de MS  $ha^{-1}$  et sont globalement similaires à ce qu'on observe dans la littérature ((Pugliese, 2017 ; Fagnant et al., 2018 ; Favre et al., 2019 ; Hunter et al., 2020 ; Tableau 1). En revanche, nos résultats ne représentent pas la production totale annuelle. Ils ne comprennent que la matière sèche cumulée jusqu'à la floraison, sans comprendre une possible fauche automnale et la totalité de la matière sèche produite lors de la récolte estivale à la maturité des grains. Cependant, la biomasse totale de Kernza récoltée au stade BBCH65 varie de 2,43 à 3,69 T de MS  $ha^{-1}$  pour la multicoûpe (visant une unique production de fourrage), se rapproche ainsi des résultats présentés par Lee et al. (2009) et Clément et al. (2022). Pour les modalités destinées à la production de grains (i.e., Fauche 0 et fauche 1), la production totale varie entre 3,52 et 9,49 T de MS  $ha^{-1}$  ce qui nous laisse penser que la production totale annuelle augmentera légèrement pour atteindre des valeurs s'approchant de celles présentées par d'autres auteurs repris dans le Tableau 1. Concernant la production des légumineuses au sein des mélanges, la luzerne produit des valeurs similaires (3,67 à 4,35 T de MS  $ha^{-1}$ ) aux valeurs présentées par Tautges et al. (2018) dans le cadre d'une association Kernza-luzerne. Cependant, nos valeurs concernant la luzerne sont inférieures aux valeurs d'une monoculture de luzerne comme présentées dans le travail de Clément et al. (2022) (Tableau 1). La matière sèche produite par le trèfle violet en été au cours de notre essai (4,78 à 6,32 T de MS  $ha^{-1}$ ) est légèrement inférieure aux valeurs présentées par Favre et al. (2019) étant de 7,42 T de MS  $ha^{-1}$ .

#### 5.2.1 Conduite pour la production de grains

Lorsqu'on analyse uniquement la matière sèche pure du Kernza produite lors d'une gestion à finalité grains (i.e. fauche 0 et fauche 1), le Kernza seul ou associé à du trèfle blanc produit le plus de matière sèche tout au long de la saison culturale. En revanche, les associations à de la luzerne et du trèfle violet produisent le moins de matière sèche pure de Kernza. Cela démontre la concurrence exercée par la luzerne et le trèfle violet sur le Kernza. Cette compétition est mise en évidence pour la luzerne lorsqu'aucune fauche n'est réalisée. En effet, alors que toutes les autres associations montrent une augmentation de la production de Kernza à partir du stade BBCH39, l'association à la luzerne est la seule modalité pour laquelle la matière sèche du Kernza n'augmente pas de manière significative. Des résultats similaires d'une compétition entre la luzerne et le Kernza ont été démontrés par Dick et al.

(2018) et Li et al. (2020). Ces derniers ont montré une supériorité de la luzerne avec un développement plus agressif et une production de matière sèche supérieure à celle du Kernza. Pourtant, l'application d'azote est connue pour augmenter la compétitivité du Kernza (Li et al., 2020). Dans notre essai, nous avons mis 50 unités d'azote, mais cela n'a pas permis de réduire suffisamment l'agressivité de la luzerne.

Concernant la production pure des différentes légumineuses, le trèfle blanc semble être dominé par le Kernza avec une faible production variant de 0,44 à 1,86 T de MS ha<sup>-1</sup>. Ceci explique la production élevée du Kernza lorsqu'il est en association avec du trèfle blanc. Lorsqu'on compare la matière sèche totale cumulée des légumineuses en fin de saison, c'est le trèfle violet qui produit le plus de matière sèche avec 6,32 T de MS ha<sup>-1</sup> pour la fauche 0 et 5,62 T de MS ha<sup>-1</sup> pour la fauche 1 contre respectivement 4,54 T de MS ha<sup>-1</sup> et 5,56 T de MS ha<sup>-1</sup> pour la luzerne (Annexe 13).

Lorsqu'on analyse la matière sèche totale cumulée produite par le mélange Kernza-légumineuses au stade BBCH65, c'est l'association du Kernza au trèfle violet qui produit le plus de matière sèche totale avec une moyenne de 11,53 T de MS ha<sup>-1</sup> indépendamment de la fauche réalisée. Lorsqu'aucune fauche n'est réalisée, le Kernza pur (9,49 T de MS ha<sup>-1</sup>) est le second à produire le plus de matière sèche, suivie par les mélanges K+L (8,08 T de MS ha<sup>-1</sup>) et K+TB (7,99 T de MS ha<sup>-1</sup>). En revanche, lorsqu'une fauche est appliquée, même si l'association K+TV produit légèrement plus de matière sèche que les autres associations, toutes les modalités d'association ont une production totale semblable allant de 9,42 T de MS ha<sup>-1</sup> pour le Kernza pur à 11,74 T de MS ha<sup>-1</sup> pour K+TV (Tableau 5). Cependant, la composition des mélanges varie en fonction du type d'association. En effet, la matière sèche récoltée dans les mélanges K+L et K+TV comprend une part importante de légumineuses (Figure 11). À l'inverse, l'association au trèfle blanc produit moins de matière sèche totale, mais le mélange est principalement composé de Kernza. Le Tableau 6 reprend les proportions de Kernza et de légumineuses au stade BBCH65. Le trèfle blanc ne représente que 20 % du fourrage total produit par son association au Kernza alors que le trèfle violet et la luzerne composent tous deux plus de 50 % du mélange.

Enfin, nous partageons le même constat que Pugliese (2017) qui précise qu'une coupe printanière peut potentiellement réduire le rendement fourrager de la récolte estivale sans nécessairement réduire la production fourragère totale réalisée par une gestion à double valorisation. Lorsqu'on compare la matière sèche produite au stade BBCH65, c'est la modalité sans fauche qui possède les valeurs les plus élevées par rapport à la modalité comprenant une fauche printanière. En revanche, lorsqu'on analyse la matière sèche totale cumulée des mélanges Kernza-légumineuses, c'est l'inverse. La matière sèche totale produite est plus élevée pour les modalités associées à des légumineuses (K+TB, K+TV et K+L) lorsqu'une fauche printanière est réalisée. Seul le Kernza pur produit la même quantité de matière sèche pour ces deux modalités de fauche (Tableau 5).

### 5.2.2 Conduite pour la production de fourrage

Lorsqu'on analyse uniquement la biomasse de Kernza produite dans une optique de production fourragère (i.e., multicoûpe), celle-ci est la plus importante à la première et à la deuxième coupe (i.e., correspondant aux stades BBCH30 et BBCH39) avant d'être quasiment nulle lors de la troisième coupe (Figure 4). En effet, après la réalisation d'une seconde coupe fin mai, une disparition de la culture de Kernza est observée. En revanche, les légumineuses n'ont pas démontré cet effet et ont été capables de reprendre leur cycle de développement (Figure 5 ; Figure 21). Très vite après cette seconde coupe, la luzerne et le trèfle violet ont pris le dessus sur le Kernza. Une troisième coupe a tout de même été réalisée afin de quantifier la production des légumineuses ainsi que pour donner de la lumière et de l'espace au Kernza. Cependant, cela n'a pas permis au Kernza de relancer sa croissance. Le Kernza et les légumineuses (i.e., trèfle violet et luzerne) ont donc des cycles qui ne sont pas compatibles en

association dans une gestion multicutée. L'effet plus compétitif du trèfle violet et de la luzerne sur le Kernza s'exprime de manière plus importante dans une gestion à plusieurs coupes. En revanche, cette gestion est favorable au trèfle blanc, car elle lui permet de s'exprimer et de produire 1,87 T de MS ha<sup>-1</sup> en sommant les trois coupes contre seulement 0,44 T de MS ha<sup>-1</sup> lorsqu'il n'est pas fauché (Annexe 13). Le constat est différent pour la luzerne et le trèfle violet puisque leur production totale diminue avec trois coupes par rapport aux modalités visant une production en grains (i.e., fauche 0 et fauche 1). La matière sèche totale de la luzerne passe de 5,56 T de MS ha<sup>-1</sup> avec une coupe à 4,36 T de MS ha<sup>-1</sup> avec trois coupes alors que celle du trèfle violet passe de 5,62 T de MS ha<sup>-1</sup> avec une coupe à 4,78 T de MS ha<sup>-1</sup> avec trois coupes (Annexe 13).

Concernant la biomasse totale produite par les mélanges Kernza-légumineuses au stade BBCH65, ce sont les associations de Kernza au trèfle violet et à la luzerne qui produisent le plus de matière sèche avec respectivement 7,77 T de MS ha<sup>-1</sup> et 6,79 T de MS ha<sup>-1</sup>. Ceci s'explique par une production importante des légumineuses contrairement au Kernza, ainsi qu'une proportion plus importante du trèfle violet et de la luzerne dans le mélange et une absence de Kernza lors du troisième échantillonnage (Figure 11). Enfin, le Kernza pur ou le Kernza associé au trèfle blanc sont les modalités qui produisent le moins de matière sèche totale, respectivement 3,69 T MS ha<sup>-1</sup> et 5,17 T de MS ha<sup>-1</sup> (Tableau 5 ; Figure 11).

**Figure 21** : État des parcelles de chaque association pour la modalité visant une production fourragère peu de temps après la troisième fauche réalisée le 28 juin 2023. Photo prise le 16 juillet 2023. En haut à gauche : association Kernza - trèfle blanc, en haut à droite : association Kernza - trèfle violet, en bas à gauche : association Kernza - luzerne et en bas à droite : Kernza pur



### 5.3 Qualité du fourrage produite

Globalement, dans le cas des modalités visant une production de grains (i.e., fauche 0 et fauche 1), les teneurs en CP, NDF et ADF obtenues pour le Kernza lors de notre essai sont similaires aux valeurs rencontrées dans la littérature concernant une récolte printanière et estivale (Fagnant et al., 2018 ; Favre et al., 2019 ; Barriball Spencer, 2020 ; Hunter et al., 2020 ; Locatelli et al., 2022).

#### 5.3.1 Conduite pour la production de grains

Tout d'abord, il est nécessaire de préciser que les données de matières sèches utilisées dans ce travail ne représentent pas exactement les valeurs qui seraient obtenues dans un cas concret à l'échelle d'une exploitation. En effet, les données sont prises à partir d'un fourrage vert simplement séché dans une étuve et n'ayant donc pas subi d'étapes de conservation comme le serait un foin ou un ensilage. Cela représente donc des valeurs purement théoriques. En pratique, les valeurs sont moins élevées que celles obtenues dans ce travail. Lors du séchage d'un fourrage, celui-ci voit sa qualité diminuer en fonction de certains facteurs tels que les conditions météorologiques, le type de fourrage ou bien les actions mécaniques utilisés pour la récolte et le séchage. Pour le séchage d'un foin au sol, les pertes en MS et en VEM peuvent aller respectivement de 20-25 % et 30-35 % par temps sec à 25-35 % et 45-65 % en présence de pluie. En revanche, pour l'ensilage, les pertes varient de 5 à 30 % pour la MS et de 10 à 50 % pour les VEM en fonction que l'ensilage soit bien ou mal réalisé (Crémer, 2012).

De manière générale, la qualité du fourrage diminue au cours du temps avec une baisse des teneurs en cendres, CP, OMD ainsi que des valeurs énergétiques et protéiques (VEM, VEVI, DVE et OEB) alors que les paramètres fibreux (NDF, ADF, ADL, CEL) ont tendance à augmenter. Cette tendance est la même pour le Kernza, les mélanges Kernza-légumineuses et les légumineuses. Comme Jungers et al. (2018) et Barriball Spencer (2020) l'ont démontré, ces tendances s'expliquent par une baisse de la proportion des feuilles ainsi qu'une augmentation de la proportion de tiges au cours du cycle de croissance de la culture. Concernant uniquement l'analyse de la matière sèche du Kernza, aucune différence n'est observée entre les différentes associations au niveau des fauches 0 et 1. L'association aux légumineuses ne permet pas d'améliorer les valeurs nutritives du Kernza, contrairement aux résultats de Favre et al. (2019) qui présentaient une augmentation de la teneur en protéines brutes des résidus d'été dans le cas d'une association K+TV. À titre de comparaison, la teneur en CP du Kernza est inférieure à celles d'autres graminées de prairie aux trois stades d'échantillonnage. Au stade de redressement, le ray-grass anglais, le dactyle, la fétuque des prés (*Festuca pratensis*) et la fléole (*Phleum pratense*) ont une teneur respective en CP de 22,3 %, 24,5 %, 23,5 % et 20,2 % alors que celle du Kernza est de 18,16%. Au stade dernière feuille, ces mêmes graminées ont respectivement des teneurs de 15,5 %, 19,3 %, 15,8 % et 9,9 % alors que celle du Kernza est de 9,25 %. Enfin, à la floraison, le Kernza a encore une teneur en CP inférieure (4,15 %) à celles de ces graminées qui ont une teneur respective de 9,6 %, 9,8 %, 11,3 % et 7,2 % (INRA, 2018). Une tendance particulière pour l'OEB se dégage au niveau du Kernza pur et des mélanges Kernza-légumineuses qui montrent une diminution des teneurs en OEB entre le stade BBCH30 et BBCH39 avant d'augmenter à nouveau au stade BBCH65. Pour pouvoir comprendre cette variation, il faut tout d'abord comprendre la signification de ce paramètre. L'OEB s'exprime sous la forme d'une différence entre l'apport d'azote dans le rumen (N fermentescible) et l'énergie fermentescible de l'aliment. L'azote et l'énergie sont donc les deux facteurs qui ont un impact important sur ce paramètre. De ce fait, la chute de l'OEB entre le stade BBCH30 et BBCH39 s'explique par une forte diminution des protéines sans grandes différences au niveau de l'OMD. En revanche, l'augmentation de l'OEB entre le stade BBCH39 et BBCH65 est expliquée par une augmentation de la teneur en lignine qui a pour effet de diminuer les teneurs en OMD du fourrage (Professeur Yves Beckers, communication personnelle). De plus, aucune différence entre la modalité non fauchée (i.e., Fauche 0) et la modalité comprenant une fauche (i.e., Fauche 1) n'est observée pour l'ensemble des paramètres du Kernza. Au stade de redressement, les taux de CP

et de VEM du trèfle blanc sont similaires à ceux présentés par Decruyenaere et al. (2008), mais par la suite, nos valeurs diminuent de manière plus importante jusqu'au stade de la floraison. Au niveau des légumineuses utilisées en association, c'est le trèfle blanc qui possède la meilleure qualité avec les taux de fibres les plus faibles ainsi que les taux d'OMD, CP, VEM, VEVI et DVE les plus élevés. En revanche, c'est la luzerne qui contient le plus de fibres et des taux d'OEB, VEM, VEVI et DVE plus faibles. Seul son taux de protéines est du même ordre de grandeur que le trèfle blanc. La teneur moyenne en CP des légumineuses passe de 23,86 % au stade BBCH30 à 13,47 % au stade BBCH65 pour la modalité fauche 0 (Annexe 20). Concernant les VEM, celles du trèfle blanc passent de 1060 VEM au stade BBCH30 à 878 VEM au stade BBCH65 alors que pour le trèfle violet, elles passent respectivement de 993 VEM à 778 VEM et que pour la luzerne, elles passent de 974 VEM à 666 VEM (Annexe 21).

Les légumineuses ont donc des paramètres chimiques, énergétiques et protéiques supérieurs à ceux du Kernza. Cependant, même si le trèfle blanc est la légumineuse présentant les meilleures qualités fourragères, il produit le moins de matière sèche, contrairement au trèfle violet et à la luzerne. Ces derniers, même en ayant une qualité légèrement inférieure au trèfle blanc, améliorent significativement la qualité du mélange grâce à la quantité élevée de matière sèche qu'ils produisent. Cela s'observe surtout au niveau des valeurs énergétiques et protéiques au stade BBCH65. En effet, ce sont les associations au trèfle violet et à la luzerne qui possèdent les teneurs les plus élevées en CP, VEM, VEVI et DVE alors que celles de l'association K+TB sont semblables à celles du Kernza pur. Par exemple, pour le Kernza pur, les teneurs en CP passent de 17,46 % au stade BBCH30 à 3,14 % au stade BBCH65 et celles de l'association K+TB passent respectivement de 20,45 % à 3,51 %. En revanche, les teneurs en CP des associations K+TV et K+L passent en moyenne de 21 % au stade BBCH30 à 8,79 % au stade BBCH65 (Annexe 22). Concernant les valeurs de VEM, elles passent de 912 VEM au stade BBCH30 à 504 VEM au stade BBCH65 pour le Kernza et de 959 VEM à 525 VEM pour l'association K+TB. Pour les associations K+TV et K+L, les valeurs du mélange passent en moyenne de 962 VEM au stade BBCH30 à 623 VEM au stade BBCH65, soit 100 unités de plus que les modalités K et K+TB (Annexe 23). À titre de comparaison, les résultats des valeurs énergétiques et protéiques du Kernza au stade de redressement sont semblables aux valeurs d'une herbe pâturée présentées par Decruyenaere et al. (2008) (i.e., 12,6 à 18,8 % de CP/kg MS, 75 à 95 g de DVE/kg MS et 870 à 980 VEM/kg MS).

### 5.3.2 Conduite pour la production de fourrage

Précédemment, nous avons observé que la modalité multicoupe produisait significativement moins de matière sèche par rapport aux modalités visant une production de grains (à l'exception du trèfle blanc), en revanche, elle permet de conserver un stade végétatif plus jeune qui maintient de meilleures valeurs fourragères, énergétiques et protéiques. En effet, malgré une baisse des teneurs en cendres, CP, VEM, VEVI et DVE lors de la seconde coupe, ces dernières restent constantes ou augmentent même à nouveau lors de la troisième coupe (en restant cependant inférieures à la première coupe). Concernant les paramètres fibreux, le taux de NDF et CEL augmentent à la deuxième coupe avant de diminuer à la troisième. Lorsqu'on compare les différentes associations, le Kernza pur possède les taux de cendres, CP, VEM, VEVI, DVE et OEB les plus faibles et les taux de fibres les plus élevés pour chaque coupe. En revanche, l'association du Kernza aux légumineuses permet d'améliorer la qualité du fourrage produit par le mélange. Il est difficile de sélectionner la légumineuse la plus avantageuse lorsqu'on se focalise uniquement sur la qualité du fourrage produit. La gestion multicoupe maintient les teneurs des différents paramètres relativement semblables entre les légumineuses. Un avantage peut cependant être accordé à la luzerne avec des teneurs en cendres, CP, DVE significativement supérieures pour le mélange Kernza-luzerne. Au stade BBCH65, celle-ci permet de maintenir des teneurs en protéines de l'ordre de 21,64 %, des teneurs en lignine de 4,76 %, en NDF de 44,44 % et une valeur de DVE de 86,40. Comme présenté au niveau de la conduite pour la production de grains,

les résultats des valeurs énergétiques et protéiques du Kernza au stade de redressement sont semblables aux valeurs d'une herbe pâturée présentées par Decruyenaere et al. (2008).

#### 5.4 Composante du rendement du Kernza

Concernant la densité de talles du Kernza, l'association a impacté celle-ci en la réduisant au stade BBCH30 et BBCH39. En effet, l'association du Kernza au trèfle violet et à la luzerne présente une densité inférieure de talles par rapport au Kernza pur et associé au trèfle blanc. Cela reflète encore une fois la compétition exercée par ces deux légumineuses sur le Kernza. Au niveau de la densité d'épis, c'est également le Kernza pur qui produit le plus d'épis au stade BBCH65. On émet donc l'hypothèse que le rendement en grains restera inchangé lors de la récolte. Dans l'étude d'Hunter et al. (2020), l'application d'une fauche printanière a également augmenté la quantité de talles produites (Annexe 14). Néanmoins, selon ces mêmes auteurs, une production de talles plus importante n'est pas un facteur maximisant le rendement en paille. Au contraire il peut être négatif pour le rendement en réduisant le poids de chaque talle en raison d'une compétition plus importante entre les talles de Kernza. Contrairement à nos résultats, au cours de leur essai, Hunter et al. (2020) ont obtenu une densité d'épis par talles qui a augmenté en 2016 suite à l'application d'une fauche, alors qu'elle a diminué en 2018. Notre augmentation de talles sans augmentation du nombre d'épis peut s'expliquer par un effet de dilution de la vigueur du Kernza entre les talles plus nombreuses (Hunter et al., 2020).

#### 5.5 Comparaison des trois modalités de fauche

Lorsqu'on compare les deux types de gestion (Production de fourrage ou de grains), c'est la gestion multicoupe qui produit le moins de fourrage total cumulé parmi les trois modalités de fauche. Dans certains cas (Kernza pur et associé au trèfle blanc), la production est même réduite de moitié par rapport à la modalité fauche 1, produisant le plus de MS (Tableau 5). En revanche, c'est la modalité qui produit le fourrage le plus qualitatif au niveau des paramètres chimiques, énergétiques et protéiques.

Pour les modalités visant la production de grains, la matière sèche totale est la plus élevée lorsqu'une fauche est réalisée par rapport à la modalité ne comportant pas de fauche printanière, sans qu'il n'y ait réellement de différence au niveau de la qualité du fourrage produit. La matière sèche totale cumulée produite par le Kernza pur ou associé au trèfle violet est similaire entre la fauche 0 et la fauche 1 alors que pour l'association du Kernza au trèfle blanc et à la luzerne, la matière sèche produite augmente lorsqu'une fauche est réalisée. Une gestion visant la production de grains associée à une production de fourrage (double valorisation) est donc le meilleur compromis. Cette conclusion est partagée par Pugliese (2017) qui précise que s'il n'y a pas de différence au niveau de la production en grains lors d'une double valorisation, alors autant maximiser les gains du producteur en optimisant la production de fourrage additionnel à la production de grains. Pugliese (2017) ajoute que la production totale obtenue lors d'un double usage de la culture dépend énormément de la production fourragère estivale, mais aussi des conditions météorologiques saisonnières. Enfin, de la verse a pu être observée pour les modalités non fauchées comprenant de la luzerne ou du trèfle violet. La forte compétition entre le Kernza et ces légumineuses peut pousser ces dernières à chercher à se développer en hauteur afin de maximiser leur exposition à la lumière, rendant ainsi le mélange plus sensible à la verse. L'application d'une fauche printanière réduit ce risque de verse.

Concernant la proportion de Kernza et de légumineuses au sein des mélanges, on constate qu'avec l'application de 3 coupes, la proportion de Kernza dans le mélange a tendance à diminuer en passant de 70 % aux deux premières coupes à 59 % à la troisième coupe, alors que la proportion de légumineuses augmente dans le mélange (Tableau 6). D'ailleurs, les associations du Kernza au trèfle violet et à la luzerne sont les deux seules pour lesquelles le mélange contient plus de légumineuses que de Kernza (55 % pour le trèfle violet et 59 % pour la luzerne).

## 5.6 Gestion des adventices

Les mauvaises herbes peuvent aussi avoir un effet négatif sur la production de matière sèche. Elles étaient très présentes au sein de nos parcelles. En effet, comme le précise Locatelli et al. (2022), une coupe printanière importante peut permettre de réduire l'établissement des mauvaises herbes alors que des coupes réalisées en été ou en automne pourraient favoriser d'autres adventices en leurs permettant de s'établir à nouveau. Lors du premier prélèvement au stade BBCH30, une quantité non négligeable de mauvaises herbes a été récoltée alors qu'au stade BBCH39, après la première fauche, celles-ci étaient beaucoup moins présentes. La fauche printanière a donc bien permis de réduire la pression des adventices, comme avancé par Locatelli et al. (2022). La fauche printanière réduit donc la pression des mauvaises herbes à court terme, mais celles-ci sont capables de reprendre suite à une faible concurrence de la culture. En revanche, lors du troisième échantillonnage (après deux coupes réalisées pour la fauche multiple), la modalité fauchemultiple présentait de faibles quantités de mauvaises herbes alors que les modalités fauche 0 et fauche 1 présentaient une quantité plus importante de mauvaises herbes. La modalité fauchemultiple a donc permis de réduire significativement la pression des adventices dans le cas d'un essai mal implanté, contrairement aux autres modalités 0 et 1 fauche. Ceci est donc différent de ce qui était avancé par Locatelli et al. (2022).

## 6 Conclusion et perspectives

La spectrométrie proche infrarouge (SPIR) s'avère un outil prometteur pour évaluer la qualité des fourrages, facilitant ainsi la démarche en rendant le processus beaucoup plus rapide et moins coûteux. Cependant, des limites sont observées pour certains paramètres chimiques comme la MSa et l'ADL. Néanmoins, les résultats obtenus offrent des perspectives intéressantes pour améliorer la prédiction des valeurs fourragère du Kernza. Il serait intéressant de continuer à enrichir la base de données du modèle de calibration et validation afin d'améliorer la précision de ce dernier.

Concernant l'association de légumineuses à la culture de Kernza, même si elles permettent d'augmenter la production de fourrage, l'utilisation de la luzerne ou du trèfle violet comme association est à éviter en raison d'une trop forte compétition avec le Kernza, limitant sa production. Au final, l'association perd tout son sens, car le Kernza devient minoritaire dans le mélange. En revanche, le trèfle blanc est une bonne alternative malgré sa faible production de matière sèche. En effet, il permet de maintenir une couverture végétale sans exercer de concurrence au Kernza tout en apportant un volume supplémentaire de matière sèche. De plus, l'association bénéficie ainsi des avantages d'une légumineuse. Une perspective de recherche serait de trouver d'autres légumineuses pouvant être associées au Kernza sans exercer de compétition trop importante sur ce dernier. Pour limiter la compétition des légumineuses, un interligne spécifique avait été mis en place mais cela n'a finalement pas eu de réel impact positif. Les légumineuses sont encore trop nombreuses et trop compétitrices.

Ensuite, la gestion fourragère (i.e., multicoûpe) n'est pas recommandée. La culture n'est pas adaptée physiologiquement pour subir plusieurs coupes au cours d'une courte période de temps. Certes, cette gestion permet de maintenir une qualité relativement bonne du fourrage, cependant, les quantités produites sont significativement inférieures aux autres modes de gestion. En revanche, comme cela a de nombreuses fois été avancé dans la littérature, une gestion visant une double valorisation accompagnée d'une fauche printanière n'augmente pas de manière significative la qualité du fourrage, mais permet d'augmenter le rendement fourrager tout en conservant une production céréalière, surtout quand il est en association avec une légumineuse.

Concernant la qualité du fourrage, le trèfle blanc présente des qualités nutritionnelles supérieures à la luzerne et au trèfle violet, mais produit significativement moins de matière sèche que ceux-ci. Néanmoins, même si la luzerne et le trèfle violet peuvent très vite devenir trop compétitifs, ce sont ceux qui améliorent le plus la qualité du fourrage. Ils possèdent des teneurs plus élevées en protéines et en énergie ainsi que des teneurs en fibres plus faibles que le Kernza, accompagné d'une production de matière sèche significativement supérieure compensant la qualité inférieure du Kernza.

Ce travail a étudié les qualités théoriques du fourrage, mais il serait intéressant de les étudier lorsque le Kernza est soumis à un processus de conservation couramment utilisé (Récolte, séchage et conservation) afin d'obtenir les valeurs finales qu'un agriculteur obtiendrait une fois les pertes de qualité prises en compte. Dans la même lignée, une étude de l'appétence du fourrage de Kernza et sa digestibilité in vivo par différentes catégories animales serait intéressante.

De plus, le Kernza est une culture très attrayante pour l'agriculture de demain, mais qui nécessite encore de nombreuses sélections afin d'améliorer ses caractéristiques. Le rendement est l'un des facteurs les plus importants à améliorer, surtout à partir de la seconde année de culture où celui-ci chute énormément. Pour cela, les différentes composantes de rendement sont à améliorer : nombre de talles, fertilité des talles et nombres d'épis par m<sup>2</sup> ainsi que le nombre de grains par épis et la taille des grains. La hauteur de la culture est aussi un paramètre sur lequel il faut se pencher afin de réduire la sensibilité à la verse. Les sélectionneurs devraient essayer de développer différentes variétés distinguant ainsi la gestion fourragère de la gestion céréalière.

Pour conclure, il serait intéressant de réaliser un essai au cours duquel le Kernza serait implanté seul en automne et où les légumineuses seraient sursemées à l'automne suivant. Cela éviterait donc la compétition entre les deux cultures lors de l'implantation et du développement du Kernza. L'objectif de cet essai serait de réaliser une production céréalière au cours des deux premières années (là où le Kernza est le plus productif) avant de passer à une production fourragère d'un mélange Kernza-légumineuses.

## 7 Contribution personnelle de l'étudiant

Ce travail de fin d'études s'insère dans un projet ayant débuté en 2019 et pour lequel des prélèvements de biomasse aérienne ont été réalisés chaque année. J'ai tout d'abord débuté par la réalisation d'analyses chimiques d'échantillons prélevés en 2022 ainsi que d'échantillons provenant de France afin de caractériser leurs valeurs alimentaires. Celles-ci permettant ensuite d'enrichir la base de données du modèle de prédiction spécifique au Kernza. J'ai également participé à la récolte de biomasse au champ au cours des différents stades de développement lors de la saison 2023. Par la suite, j'ai réalisé le traitement de ces échantillons et la préparation de ceux-ci (séchage, broyage, préparation de cupules) pour aller les analyser au CRA-W. En effet, je me suis rendu sur place afin de les passer au spectromètre infrarouge pour obtenir les absorbances de chaque échantillon. Ces absorbances ont ensuite été soumises au modèle prédictif. Enfin, j'ai également réalisé l'ensemble des analyses statistiques sur RStudio ainsi que rédigé ce rapport.

## 8 Bibliographie

- Barriball Spencer, 2020. Growth, development, and forage quality of Intermediate wheatgrass when grown for Kernza® perennial grain production.
- Cheng A., Mayes S., Dalle G., Demissew S. & Massawe F., 2017. Diversifying crops for food and nutrition security – a case of teff. *Biol. Rev.* **92**(1), 188–198, DOI:10.1111/brv.12225.
- Chiffres clés de l'agriculture 2022 | Statbel, March-5-2023. . <https://statbel.fgov.be/fr/chiffres-cles-de-lagriculture-2022>, (05/03/2023).
- Clément C., Sleiderink J., Svane S.F., Smith A.G., Diamantopoulos E., Desbrøll D.B. & Thorup-Kristensen K., 2022. Comparing the deep root growth and water uptake of intermediate wheatgrass (Kernza®) to alfalfa. *Plant Soil* **472**(1), 369–390, DOI:10.1007/s11104-021-05248-6.
- Cox T., Van Tassel D., Cox C. & DeHaan L., 2010. Progress in breeding perennial grains. *Crop Pasture Sci.* **61**, DOI:10.1071/CP09201.
- Cox T.S., Glover J.D., Van Tassel D.L., Cox C.M. & DeHaan L.R., 2006. Prospects for Developing Perennial Grain Crops. *BioScience* **56**(8), 649–659, DOI:10.1641/0006-3568(2006)56[649:PFDPGC]2.0.CO;2.
- CRA-W, June-26-2023. Métadonnées. *Agromet.* [https://agromet.cra.wallonie.be/fr/docu/metadonnees/#agg\\_rules](https://agromet.cra.wallonie.be/fr/docu/metadonnees/#agg_rules), (26/06/2023).
- Crémer S., 2012. La conservation des stocks fourragers. [https://www.fourragesmieux.be/Documents\\_telechargeables/Conservation\\_des\\_fourrages\\_Cremer\\_2012.pdf](https://www.fourragesmieux.be/Documents_telechargeables/Conservation_des_fourrages_Cremer_2012.pdf), (07/08/2023).
- Crist E., Mora C. & Engelman R., 2017. The interaction of human population, food production, and biodiversity protection. *Science* **356**(6335), 260–264, DOI:10.1126/science.aal2011.
- de Boever J.L., Cottyn B.G., Buysse F.X., Wainman F.W. & Vanacker J.M., 1986. The use of an enzymatic technique to predict digestibility, metabolizable and net energy of compound feedstuffs for ruminants. *Anim. Feed Sci. Technol.* **14**(3), 203–214, DOI:10.1016/0377-8401(86)90093-3.
- Decruyenaere V., Agneesens R., Toussaint B., Anceau C., Goffaux M. & Oger R., 2008. Qualité des fourrages en Région Wallonne. *Requasud* 1-32. <https://www.requasud.be/publications/>, (07/08/2023).
- Dewar J., 2007. Perennial Polyculture Farming: Seeds of Another Agricultural Revolution?
- Dick C., Cattani D. & Entz M., 2018. Kernza intermediate wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*) grain production as influenced by legume intercropping and residue management. *Can. J. Plant Sci.* **98**(6), 1376–1379, DOI:10.1139/cjps-2018-0146.
- Dietzel R., Jarchow M.E. & Liebman M., 2015. Above- and Belowground Growth, Biomass, and Nitrogen Use in Maize and Reconstructed Prairie Cropping Systems. *Crop Sci.* **55**(2), 910–923, DOI:10.2135/cropsci2014.08.0572.
- Duchene O., Dumont B., Cattani D.J., Fagnant L., Schlautman B., DeHaan L.R., Barriball S., Jungers J.M., Picasso V.D., David C. & Celette F., 2021. Process-based analysis of *Thinopyrum intermedium* phenological development highlights the importance of dual induction for reproductive

- growth and agronomic performance. *Agric. For. Meteorol.* **301–302**, 108341, DOI:10.1016/j.agrformet.2021.108341.
- Duchenne Q. & Demeuse F., 2006. Analyse Des Fourrages de Ferme - Province Du Brabant Wallon | PDF | Glucide | Lignine.
- Dufrane C., 2021. Étude du potentiel fourrager du Kernza® (*Thinopyrum intermedium*), une culture céréalière pérenne.
- Eylenbosch D., 2018. Évaluation des potentialités de l'imagerie hyperspectrale proche infrarouge et de la chimométrie dans l'étude de systèmes racinaires.
- Eylenbosch D., Dumont B., Baeten V., Bodson B., Delaplace P. & Pierna J., 2018. Quantification of leghaemoglobin content in pea nodules based on near infrared hyperspectral imaging spectroscopy and chemometrics. *J. Spectr. Imaging* **a9**, DOI:10.1255/jsi.2018.a9.
- Fagnant L., Duchêne O., Celette F., David C., Bindelle J. & Dumont B., 2023. Learning about the growing habits and reproductive strategy of *Thinopyrum intermedium* through the establishment of its critical nitrogen dilution curve. *Field Crops Res.* **291**, 108802, DOI:10.1016/j.fcr.2022.108802.
- Fagnant L. & Tech U. de L. > G.A.-B., 2018. Kernza (*Thinopyrum Intermedium*), une culture céréalière pérenne : Evaluation de ses performances sous différentes nutritons azotées en Belgique.
- FAOSTAT, March-11-2023. . <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>, (11/03/2023).
- Favre J.R., Castiblanco T.M., Combs D.K., Wattiaux M.A. & Picasso V.D., 2019. Forage nutritive value and predicted fiber digestibility of Kernza intermediate wheatgrass in monoculture and in mixture with red clover during the first production year. *Anim. Feed Sci. Technol.* **258**, 114298, DOI:10.1016/j.anifeedsci.2019.114298.
- Foley J.A., Ramankutty N., Brauman K.A., Cassidy E.S., Gerber J.S., Johnston M., Mueller N.D., O'Connell C., Ray D.K., West P.C., Balzer C., Bennett E.M., Carpenter S.R., Hill J., Monfreda C., Polasky S., Rockström J., Sheehan J., Siebert S., Tilman D. & Zaks D.P.M., 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature* **478**(7369), 337–342, DOI:10.1038/nature10452.
- Genot V., Bock L., Dardenne P. & Colinet G., 2014. L'intérêt de la spectroscopie proche infrarouge en analyse de terre (synthèse bibliographique). *Biotechnol. Agron. Société Environ.* **18**(2).
- Glover J.D., Reganold J.P., Bell L.W., Borevitz J., Brummer E.C., Buckler E.S., Cox C.M., Cox T.S., Crews T.E., Culman S.W., DeHaan L.R., Eriksson D., Gill B.S., Holland J., Hu F., Hulke B.S., Ibrahim A.M.H., Jackson W., Jones S.S., Murray S.C., Paterson A.H., Ploschuk E., Sacks E.J., Snapp S., Tao D., Van Tassel D.L., Wade L.J., Wyse D.L. & Xu Y., 2010. Increased Food and Ecosystem Security via Perennial Grains. *Science* **328**(5986), 1638–1639, DOI:10.1126/science.1188761.
- Guillaume A., 2022. Validation of a predictive model of the forage potential of Kernza® (*Thinopyrum intermedium*) and evaluation of the effects of its association with different legumes.
- Hunter M.C., Sheaffer C.C., Culman S.W. & Jungers J.M., 2020. Effects of defoliation and row spacing on intermediate wheatgrass I: Grain production. *Agron. J.* **112**(3), 1748–1763, DOI:10.1002/agj2.20128.

- Hunter M.C., Sheaffer C.C., Culman S.W., Lazarus W.F. & Jungers J.M., 2020. Effects of defoliation and row spacing on intermediate wheatgrass II: Forage yield and economics. *Agron. J.* **112**(3), 1862–1880, DOI:10.1002/agj2.20124.
- INRA, 2018. *Alimentations des ruminants*, Versailles, France, 728 p.
- Jensen E.S., Carlsson G. & Hauggaard-Nielsen H., 2020. Intercropping of grain legumes and cereals improves the use of soil N resources and reduces the requirement for synthetic fertilizer N: A global-scale analysis. *Agron. Sustain. Dev.* **40**(1), 5, DOI:10.1007/s13593-020-0607-x.
- Jungers J. m., Frahm C. s., Tautges N. e., Ehlke N. j., Wells M. s., Wyse D. I. & Sheaffer C. c., 2018. Growth, development, and biomass partitioning of the perennial grain crop *Thinopyrum intermedium*. *Ann. Appl. Biol.* **172**(3), 346–354, DOI:10.1111/aab.12425.
- Jungers J.M., DeHaan L.H., Mulla D.J., Sheaffer C.C. & Wyse D.L., 2019. Reduced nitrate leaching in a perennial grain crop compared to maize in the Upper Midwest, USA. *Agric. Ecosyst. Environ.* **272**, 63–73, DOI:10.1016/j.agee.2018.11.007.
- Jungers J.M., DeHaan L.R., Betts K.J., Sheaffer C.C. & Wyse D.L., 2017. Intermediate Wheatgrass Grain and Forage Yield Responses to Nitrogen Fertilization. *Agron. J.* **109**(2), 462–472, DOI:10.2134/agronj2016.07.0438.
- Lee D., Owens V.N., Boe A. & Koo B.-C., 2009. Biomass and seed yields of big bluestem, switchgrass, and intermediate wheatgrass in response to manure and harvest timing at two topographic positions. *GCB Bioenergy* **1**(2), 171–179, DOI:10.1111/j.1757-1707.2009.01008.x.
- Lee G., Kim W., Oh H., Youn B.D. & Kim N.H., 2019. Review of statistical model calibration and validation—from the perspective of uncertainty structures. *Struct. Multidiscip. Optim.* **60**(4), 1619–1644, DOI:10.1007/s00158-019-02270-2.
- Li S., Barreiro A., Jensen E.S., Zhang Y. & Mårtensson L.-M.D., 2020. Early interspecific dynamics, dry matter production and nitrogen use in *Kernza* (*Thinopyrum intermedium*) – alfalfa (*Medicago sativa* L.) mixed intercropping. *Acta Agric. Scand. Sect. B — Soil Plant Sci.* **70**(2), 165–175, DOI:10.1080/09064710.2019.1686164.
- Li S., Jensen E.S., Liu N., Zhang Y. & Dimitrova Mårtensson L.-M., 2021. Species Interactions and Nitrogen Use during Early Intercropping of Intermediate Wheatgrass with a White Clover Service Crop. *Agronomy* **11**(2), 388, DOI:10.3390/agronomy11020388.
- Locatelli A., Gutierrez L., Duchene O., Speranza P.R. & Picasso Risso V.D., 2022. Agronomic assessment of two populations of intermediate wheatgrass—*Kernza*® (*Thinopyrum intermedium*) in temperate South America. *Grassl. Res.* **1**(4), 262–278, DOI:10.1002/glr2.12032.
- Minet O., Ferber F., Jacob, L., Leclercq, B., Agneessens, R., Cugnon, T., Decruyenaere, V., Genot, V., Gofflot, S., Pitchugina, E., Planchon, V., Rennesson, M., Sinnaeve, G., & Wavreille, J., Dardenne, P. & Baeten, V., 2016. La spectrométrie proche infrarouge : une technologie rapide, précise et écologique pour déterminer la composition et la qualité des produits agricoles et alimentaires. *Gembloux ASBL Requasud Cell. Coord.* **32**.
- Murphy D.J., O’ Brien B., O’ Donovan M., Condon T. & Murphy M.D., 2022. A near infrared spectroscopy calibration for the prediction of fresh grass quality on Irish pastures. *Inf. Process. Agric.* **9**(2), 243–253, DOI:10.1016/j.inpa.2021.04.012.

- Pimentel D., Cerasale D., Stanley R.C., Perlman R., Newman E.M., Brent L.C., Mullan A. & Chang D.T.-I., 2012. Annual vs. perennial grain production. *Agric. Ecosyst. Environ.* **161**, 1–9, DOI:10.1016/j.agee.2012.05.025.
- Pugliese J.Y., 2017. Above- and Belowground Response to Managing Kernza (*Thinopyrum intermedium*) as a Dual-Use Crop for Forage and Grain.
- Pugliese J.Y., Culman S.W. & Sprunger C.D., 2019. Harvesting forage of the perennial grain crop kernza (*Thinopyrum intermedium*) increases root biomass and soil nitrogen cycling. *Plant Soil* **437**(1), 241–254, DOI:10.1007/s11104-019-03974-6.
- Shen H., Tolson B.A. & Mai J., 2022. Time to Update the Split-Sample Approach in Hydrological Model Calibration. *Water Resour. Res.* **58**(3), e2021WR031523, DOI:10.1029/2021WR031523.
- Sutherlin C.E., Brunsell N.A., de Oliveira G., Crews T.E., R. DeHaan L. & Vico G., 2019. Contrasting Physiological and Environmental Controls of Evapotranspiration over Kernza Perennial Crop, Annual Crops, and C4 and Mixed C3/C4 Grasslands. *Sustainability* **11**(6), 1640, DOI:10.3390/su11061640.
- Tautges N.E., Jungers J.M., DeHaan L.R., Wyse D.L. & Sheaffer C.C., 2018. Maintaining grain yields of the perennial cereal intermediate wheatgrass in monoculture v. bi-culture with alfalfa in the Upper Midwestern USA. *J. Agric. Sci.* **156**(6), 758–773, DOI:10.1017/S0021859618000680.
- The Land Institute, March-11-2023. Kernza. *Kernza*®. <https://kernza.org/>, (11/03/2023).
- U.N. Food and Agricultural Organization, 2009. How to Feed the World: Global Agriculture Towards 2050.
- Van Soest P.J., 1963. Use of Detergents in the Analysis of Fibrous Feeds. II. A Rapid Method for the Determination of Fiber and Lignin. *J. Assoc. Off. Agric. Chem.* **46**(5), 829–835, DOI:10.1093/jaoac/46.5.829.
- Van Soest P.J., Robertson J.B. & Lewis B.A., 1991. Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition. *J. Dairy Sci.* **74**(10), 3583–3597, DOI:10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2.

## 9 Annexes :

**Annexe 1 :** Plan expérimental + tableau reprenant les modalités de chaque facteur

		Facteur 1 :			Facteur 2 :			Modalités		
		Fauches multiples Grain			Kernza			1		
					Kernza + TB			2		
					Kernza + TV			3		
					Kernza + luzerne			4		
		BBCH30 printemps + Grain + automne			Kernza			5		
					Kernza + TB			6		
					Kernza + TV			7		
					Kernza + luzerne			8		
		Grains + Automne			Kernza			9		
					Kernza + TB			10		
					Kernza + TV			11		
					Kernza + luzerne			12		

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	
	5	5	4	4	12	12	6	6	4	4	12	12	
800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	
	7	7	3	3	11	11	5	5	2	2	9	9	
700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	
	6	6	1	1	9	9	7	7	1	1	10	10	
600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	
	8	8	2	2	10	10	8	8	3	3	11	11	
500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	
	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	
400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	
	4	4	8	8	12	12	10	10	8	8	3	3	
300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	
	3	3	7	7	11	11	9	9	6	6	1	1	
200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	
	2	2	6	6	10	10	11	11	5	5	4	4	
100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	
	1	1	5	5	9	9	12	12	7	7	2	2	

**Annexe 2 :** Opérations culturales réalisées sur l'essai K21-01

Dates	Opérations culturales
09-09-21	labour + herse rotative Semis wintersteiger :  .Dose TLI C5 : 200gr/m <sup>2</sup> , PMG =6,0, 12kg/ha .Dose Luzerne (variété galaxie et volga) : 8kg/ha .Dose trèfle violet (variété Agil et sangria) : 5kg/ha .Dose trèfle blanc géant (variété giga et merlin) : 3kg/ha .Bordures (B) : TLI C3 200gr/m <sup>2</sup> = 20kg/ha
09-09-21	semis au nodet du ray-grass
Mid/09/21	Herse étrille
nov-21	désherbage manuel : retrait des moutardes des champs
mars-21	Binage + désherbage manuel
24-03-22	Fertilisation tallage/redressement 50uN/ha
17-05-22	Désherbage manuel
16-08-22	Récolte Kernza
20-08-22	Broyage des résidus laissés après récolte
29-09-22	Fertilisation automne 50uN/ha
24-10-22	Fauche automne
17-03-23	Fertilisation tallage/redressement 50uN/ha
01-05-23	Echant. Redressement (BBCH30)
05-05-23	Fauche printemps modalités 1 à 8
30-05-23	Echant. Dernière feuille (BBCH39)
30-05-23	Fauche printemps modalités 1 à 4
28-06-23	Echant. Floraison (BBCH65)
28-06-23	Fauche floraison 1 à 4

**Annexe 3** : Synthèse des analyses ANOVA réalisées pour caractériser la biomasse sèche du Kernza (PS K et PS TOT K). Les \* indiquent les niveaux de significativité. «\*\*\* : p-valeur < 0,001, \*\* : p-valeur < 0,01, \* p-valeur < 0,05, ‘. ’ < 0,1. Df = Degré de liberté, PS = Poids sec

PS : K										
AV2 : Association*Stade_BBCH										
AV 2	Df	Fauche 0 p-valeur	Fauche 1 p-valeur	Fauche 3 p-valeur						
Association (A)	3	***	***	.						
Stade_BBCH (S)	2	***	***	***						
Bloc	1	.	.	.						
A*S	6	**	.	.						
Residuals	35									
AV1 : Stade_BBCH										
AV1	Df	Fauche 0			Fauche 1					
		BBCH30 p-valeur	BBCH39 p-valeur	BBCH65 p-valeur	BBCH30 p-valeur	BBCH39 p-valeur	BBCH65 p-valeur			
Association	3	.	**	**	3	.	.	*		
Bloc	1	.	.	.	1	.	.	.		
Residuals	11				11					
AV1 : Association										
AV1	Df	Fauche 0				Fauche 1				
		K p-valeur	K+TB p-valeur	K+TV p-valeur	K+L p-valeur	K p-valeur	K+TB p-valeur	K+TV p-valeur	K+L p-valeur	
Stade_BBCH	2	***	***	.	.	2	***	**	.	.
Bloc	1	.	.	.	.	1	.	.	.	*
Residuals	8					8				
PS TOT : K										
AV2 : Association*Fauche										
Stade : BBCH65										
AV 2	Df	p-valeur								
Association (A)	3	***								
Fauche (F)	2	***								
Bloc	1	.								
A*F	6	*								
Résidus	35									
AV1 : Fauche										
AV1	Df	Fauche 0	Fauche 1	Fauche 3						
		p-valeur	p-valeur	p-valeur						
Association	3	**	**	.						
Blocs	1	.	.	.						
Residus	11									
AV1 : Association										
AV1	Df	K	K+TB	K+TV	K+L					
		p-valeur	p-valeur	p-valeur	p-valeur					
Fauche	2	***	***	.	.					
Blocs	1	.	.	.	.					
Residus	8									

**Annexe 4** : Synthèse des analyses ANOVA réalisées pour caractériser la biomasse sèche des légumineuses (TB, TV et L). Les \* indiquent les niveaux de significativité. «\*\*\* : p-valeur < 0,001, \*\* : p-valeur < 0,01, \* p-valeur < 0,05, ‘. ’ < 0,1. Df = Degré de liberté, PS = Poids sec

PS : Leg													
AV2 : Association*Stade_BBCH													
AV2	DF	Fauche 0 p-valeur	Fauche 1 p-valeur	Fauche 3 p-valeur									
Association (A)	3	***	***	***									
Stade_BBCH (S)	2	***	***	***									
Bloc	1	.	.	.									
A*S	6	**	**	.									
Residuals	35												
AV1 : Stade_BBCH													
AV1	DF	Fauche 0			Fauche 1			Fauche 3					
		BBCH30 p-valeur	BBCH39 p-valeur	BBCH65 p-valeur	BBCH30 p-valeur	BBCH39 p-valeur	BBCH65 p-valeur	BBCH30 p-valeur	BBCH39 p-valeur	BBCH65 p-valeur			
Association	3	.	.	***	3	.	.	**	.	3	.	***	
Bloc	1	.	.	.	1	.	.	.	.	1	.	.	
Residuals	11				11					11			
AV1 : Association													
AV1	DF	Fauche 0			Fauche 1			Fauche 3					
		K+TB p-valeur	K+TV p-valeur	K+L p-valeur	K+TB p-valeur	K+TV p-valeur	K+L p-valeur	K+TB p-valeur	K+TV p-valeur	K+L p-valeur			
Stade_BBCH	2	.	**	.	2	.	**	***	.	2	.	**	***
Bloc	1	.	.	.	1	.	.	.	.	1	.	.	.
Residuals	8				8					8			
PS TOT Leg													
AV2 : Association*Fauche													
Stade : BBCH65													
AV2	Df	p-valeur											
Association (A)	3	***											
Fauche (F)	2	.											
Bloc	1	.											
A*F	6	.											
Résidus	35												

**Annexe 5 :** Synthèse des analyses ANOVA réalisées pour caractériser la biomasse sèche des mélanges Kernza-légumineuses. Les \* indiquent les niveaux de significativité. «\*\*\* : p-valeur < 0,001, \*\* : p-valeur < 0,01, \* p-valeur < 0,05, ' ' < 0,1. Df = Degré de liberté, PS = Poids sec

Mélange										
AV2 : Association*Stade_BBCH										
PS mélange										
AV 2	DF	Fauche 0 p-valeur	Fauche 1 p-valeur	Fauche 3 p-valeur						
Association (A)	3	***	*	***						
Stade_BBCH (S)	2	***	***	***						
Bloc	1									
A*S	6	*		**						
Residuals	35									
AV1 : Stade_BBCH										
AV1	DF	Fauche 0			Fauche 3			DF	p-valeur	p-valeur
		BBCH30 p-valeur	BBCH39 p-valeur	BBCH65 p-valeur	BBCH30 p-valeur	BBCH39 p-valeur	BBCH65 p-valeur			
Association	3	*	*	*	3	*	*	***		
Bloc	1	*			1	*	*			
Residuals	11				11					
AV1 : Association										
AV1	DF	Fauche 0				Fauche 3				
		K p-valeur	K+TB p-valeur	K+TV p-valeur	K+L p-valeur	K p-valeur	K+TB p-valeur	K+TV p-valeur	K+L p-valeur	
Stade_BBCH	2	***	***	***	**	2	**	**	p-valeur	p-valeur
Bloc	1					1				
Residuals	8					8				
PS TOT mélange										
AV2 : Association*Fauche										
Stade BBCH_65										
AV2	Df	p-valeur								
Association (A)	3	***								
Fauche (F)	2	***								
Bloc	1									
A*F	6	*								
Résidus	35									
AV1 : Fauche										
AV1	Df	Fauche 0 p-valeur	Fauche 1 p-valeur	Fauche 3 p-valeur						
Association	3	*		***						
Blocs	1									
Residus	11									
AV1 : Association										
AV1	DF	K p-valeur	K+TB p-valeur	K+TV p-valeur	K+L p-valeur					
Fauche	2	***	***	**	*					
Blocs	1									
Residus	8									

**Annexe 6 :** Synthèse des analyses ANOVA réalisées pour caractériser le nombre d'épis par mètre carré du Kernza au stade BBCH65. Les \* indiquent les niveaux de significativité. «\*\*\* : p-valeur < 0,001, \*\* : p-valeur < 0,01, \* p-valeur < 0,05, ' ' < 0,1. Df = Degré de liberté

AV2 Epis - Association*Fauche		
Epis/m2		
Stade BBCH65		
	Df	p-valeur
Fauche (F)	1	
Association (A)	3	**
Blocs	1	
F*A	3	
Résidus	23	

**Annexe 7 :** Synthèse des analyses ANOVA réalisées pour caractériser le nombre de talles par mètre carré du Kernza. Les \* indiquent les niveaux de significativité. «\*\*\* : p-valeur < 0,001, \*\* : p-valeur < 0,01, \* p-valeur < 0,05, ' ' < 0,1. Df = Degré de liberté

Nb talles/m2								
AV2 : Association*Stade_BBCH					AV2 : Fauche*Association			
	Fauche 0		Fauche 1	Fauche 3		BBCH30	BBCH39	BBCH65
	Df	p-valeur	p-valeur	p-valeur		Df	p-valeur	P-valeur
Association (A)	3	***	***	*	Fauche (F)	2		***
Stade_BBCH (S)	2	***	**	***	Association (A)	3	***	***
Blocs	1				Bloc	1	***	*
A*S	6				F*A	6		***
Residus	35				Résidus	35		

**Annexe 8 :** Moyennes du poids sec du Kernza au cours du cycle de développement de développement pour chaque association et stade. Lorsqu'aucune interaction entre le stade et l'association n'est pas observée, les données ont été moyennées par stade et par association. Les lettres minuscules représentent les résultats du test SNK du facteur association et les lettres majuscules en gras représentent les résultats du test SNK du facteur stade

PS K									
Fauche 0						AV2			
	BBCH30			BBCH39		BBCH65			
K	1,69 ± 0,24	a	C	4,46 ± 0,50	a	B	8,29 ± 0,22	a	A
K + TB	1,36 ± 0,14	ab	C	4,34 ± 0,36	a	B	6,57 ± 0,71	ab	A
K + TV	1,01 ± 0,16	b	B	3,12 ± 0,42	ab	A	4,3 ± 1,02	bc	A
K + L	0,91 ± 0,02	b	A	2,25 ± 0,23	b	A	3,05 ± 1,13	c	A
Fauche 1									
	BBCH30			BBCH39		BBCH65			
K	1,69 ± 0,24	a	B	1,88 ± 0,30	a	B	4,94 ± 0,27	a	A
K + TB	1,36 ± 0,14	ab	B	1,84 ± 0,39	a	B	4,56 ± 0,66	a	A
K + TV	1,01 ± 0,16	b	B	1,75 ± 0,25	a	AB	2,77 ± 0,51	b	A
K + L	0,91 ± 0,02	b	B	1,4 ± 0,22	a	B	2,38 ± 0,55	b	A
Fauche 3									
	BBCH30			BBCH39		BBCH65			
K	Intéraction dans l'AV2						1,23 ± 0,26	a	
K + TB	Intéraction dans l'AV2						1,1 ± 0,25	a	
K + TV	Intéraction dans l'AV2						1 ± 0,21	a	
K + L	Intéraction dans l'AV2						0,81 ± 0,17	a	
Moyennes	1,24 ± 0,11		B	1,72 ± 0,14		A	0,15 ± 0,03		C

**Annexe 9 :** Matière sèche moyenne des légumineuses pour chaque modalité du facteur Stade et du facteur Association. Les lettres minuscules représentent les résultats du test SNK du facteur Association et les lettres majuscules en gras représentent les résultats du test SNK du facteur Stade

Leg						
Fauche 0						
	BBCH30			BBCH39		BBCH65
K	-			-		-
K + TB	0,57 ± 0,22	b	A	0,69 ± 0,48	b	A
K + TV	1,44 ± 0,19	a	C	3,99 ± 0,75	a	B
K + L	1,41 ± 0,08	a	B	4,41 ± 0,81	a	A
K	0,44 ± 0,19	c	A	6,32 ± 0,91	a	A
K + L	1,41 ± 0,08	a	B	4,41 ± 0,81	a	A
K + L	4,54 ± 0,65	b	A			
Fauche 1						
	BBCH30			BBCH39		BBCH65
K	-			-		-
K + TB	0,57 ± 0,22	b	A	0,57 ± 0,23	b	A
K + TV	1,44 ± 0,19	a	B	1,14 ± 0,14	a	B
K + L	1,41 ± 0,08	a	B	0,8 ± 0,07	ab	B
K + L	3,35 ± 0,39	a	A			
Fauche 3						
	BBCH30			BBCH39		BBCH65
K	-			-		-
K + TB	0,57 ± 0,22	b	A	0,57 ± 0,23	b	A
K + TV	1,44 ± 0,19	a	B	1,14 ± 0,14	a	B
K + L	1,41 ± 0,08	a	B	0,8 ± 0,07	ab	C
K + L	2,15 ± 0,23	a	A			

**Annexe 10 :** Valeurs moyennes de la matière sèche produite par chaque mélange Kernza-légumineuses sous différentes modalités de fauche aux différents stades. Les lettres minuscules correspondent au facteur Association alors que les lettres majuscules en gras correspondent au facteur stade

PS mélange						
Fauche 0						
Association	BBCH30			BBCH39		BBCH65
K	1,69 ± 0,24	a	C	4,46 ± 0,50	b	B
K + TB	1,93 ± 0,25	a	C	4,86 ± 0,29	b	B
K + TV	2,44 ± 0,25	a	C	7,11 ± 0,42	a	B
K + L	2,32 ± 0,09	a	B	6,66 ± 0,96	a	A
K	8,29 ± 0,22	b	A	10,62 ± 0,55	a	A
K + TB	7,01 ± 0,60	b	A			
K + TV	10,62 ± 0,55	a	A			
K + L	7,59 ± 1,02	b	A			
Fauche 3						
Association	BBCH30			BBCH39		BBCH65
K	1,69 ± 0,24	a	A	1,88 ± 0,30	a	A
K + TB	1,93 ± 0,25	a	A	2,41 ± 0,27	a	A
K + TV	2,44 ± 0,25	a	A	2,89 ± 0,33	a	A
K + L	2,32 ± 0,09	a	A	2,2 ± 0,20	a	A
K	0,13 ± 0,06	c	B	0,82 ± 0,14	b	B
K + TB	0,82 ± 0,14	b	B			
K + TV	2,44 ± 0,15	a	A			
K + L	2,26 ± 0,21	a	A			

**Annexe 11** : Moyennes de la matière sèche produite par les mélanges Kernza-légumineuses pour les facteurs association et stade pour la modalité fauche 1. Les lettres minuscules correspondent au facteur Association alors que les lettres majuscules en gras correspondent au facteur stade

PS mélange		
AV2 : Association*Stade_BBCH		
Fauche 1		
Association		
K	2,83 ± 0,47	b
K + TB	3,21 ± 0,48	ab
K + TV	3,72 ± 0,50	a
K + L	3,42 ± 0,51	ab
Stade_BBCH		
BBCH30	2,1 ± 0,13	<b>B</b>
BBCH39	2,35 ± 0,16	<b>B</b>
BBCH65	5,44 ± 0,22	<b>A</b>

**Annexe 12** : Matière sèche totale cumulée du Kernza pour chaque association en fonction des trois modalités de fauche. Les lettres minuscules représentent les résultats du test SNK du facteur Association et les lettres majuscules en gras représentent les résultats du test SNK du facteur fauche

Association	BBCH 65								
	PS TOT K								
	Fauche 0			Fauche 1			Fauche 3		
K	9,49 ± 0,24	a	<b>A</b>	9,42 ± 0,48	a	<b>A</b>	3,69 ± 0,14	a	<b>B</b>
K + TB	7,55 ± 0,83	ab	<b>A</b>	8,63 ± 0,45	a	<b>A</b>	3,3 ± 0,38	a	<b>B</b>
K + TV	4,99 ± 1,17	bc	<b>A</b>	6,12 ± 0,78	b	<b>A</b>	2,99 ± 0,46	a	<b>A</b>
K + L	3,52 ± 1,29	c	<b>A</b>	5,15 ± 0,84	b	<b>A</b>	2,43 ± 0,25	a	<b>A</b>

**Annexe 13** : Tableau synthétique reprenant l'ANOVA 1 de la matière sèche totale des légumineuses pour chaque modalité du facteur fauche. Les résultats du test SNK y sont également repris

Stade : BBCH65										
AV1 : Association										
AV1	Df	K + L p-valeur	K + TB p-valeur	K + TV p-valeur	AV1	Df	Fauche 0 p-valeur	Fauche 1 p-valeur	Fauche 3 p-valeur	
Fauche	2			**	Association	2	***	**	***	
Bloc	1				Bloc	1				
Residus	8				Residus	8				
Resultats test SNK										
PS TOT Leg										
AV1 : Association										
		K + L		K + TB		K + TV				
Fauche 0	4,54	± 0,65	a	<b>A</b>	0,44 ± 0,19	b	<b>B</b>	6,32 ± 0,91	a	<b>A</b>
Fauche 1	5,56	± 0,47	a	<b>A</b>	1,86 ± 0,30	a	<b>B</b>	5,62 ± 0,77	a	<b>A</b>
Fauche 3	4,36	± 0,25	a	<b>A</b>	1,87 ± 0,12	a	<b>B</b>	4,78 ± 0,37	a	<b>A</b>

**Annexe 14** : Nombre moyen de talles de Kernza par mètre carré selon les différents facteurs. Le premier tableau représente les moyennes des facteurs association et stade pour chaque modalité de fauche (Lettres minuscules pour le facteur association et lettres majuscules en gras pour le facteur stade) alors que le second tableau indique les résultats SNK des facteurs association et fauche pour chaque stade (Lettres minuscules pour le facteur association et lettres majuscules en gras pour le facteur fauche)

AV2 : Association*Stade_BBCH					
Nb talles/m2					
Moyennes association					
	Fauche 0	Fauche 1	Fauche 3		
K	768,33 ± 54,84 a	774,33 ± 43,42 a	495 ± 113,07 a		
K + TB	601,67 ± 55,19 b	606,33 ± 76,03 b	453 ± 110,44 ab		
K + TV	415,33 ± 46,00 c	469,33 ± 39,11 b	343,33 ± 79,32 b		
K + L	376,33 ± 58,26 c	476 ± 34,81 b	348,33 ± 348,33 b		
Moyenne Stade_BBCH					
BBCH30	689,75 ± 47,34 A	689,75 ± 47,34 A	689,75 ± 47,34 A		
BBCH39	458,75 ± 45,64 B	540 ± 40,38 B	540 ± 40,38 B		
BBCH65	472,75 ± 68,65 B	514,75 ± 61,11 B	0 ± 0,00 C		
AV2 : Fauche*Association					
BBCH30					
	Fauche 0	Fauche 1	Fauche 3	Moyennes	
K				824 ± 55,00 a	
K + TB				777 ± 50,33 a	
K + TV				571 ± 37,37 b	
K + L				587 ± 26,41 b	
Moyennes	689,75 ± 47,34 A	689,75 ± 47,34 A	689,75 ± 47,34 A		
BBCH39					
	Fauche 0	Fauche 1	Fauche 3	Moyennes	
K				652,00 ± 37,27 a	
K + TB				555,33 ± 61,27 a	
K + TV				434,00 ± 28,67 b	
K + L				410,33 ± 29,01 b	
Moyennes	458,75 ± 45,64 A	540 ± 40,38 A	540 ± 40,38 A		
BBCH65					
	Fauche 0	Fauche 1	Fauche 3	Moyennes	
K	847 ± 54,27 a A	838 ± 24,52 a A	0 B		
K + TB	526 ± 27,83 b A	460 ± 145,96 b A	0 B		
K + TV	291 ± 53,92 c A	378 ± 48,92 b A	0 B		
K + L	227 ± 94,05 c A	383 ± 50,45 b A	0 B		
Moyennes					

**Annexe 15** : Nombre moyen d'épis de Kernza par mètre carré pour chaque modalité du facteur Fauche et du facteur Association. Les lettres minuscules représentent les résultats du test SNK du facteur Association et les lettres majuscules en gras représentent les résultats du test SNK du facteur Fauche

AV2 Epis - Association*Fauche		
Epis/m2		
Moyenne Association		
K	540,5 ± 87,52	a
K + TB	396 ± 170,28	b
K + TV	278 ± 94,20	b
K + L	245,5 ± 149,77	b
Moyenne Fauche		
Fauche 0	363,25 ± 179,04	<b>A</b>
Fauche 1	366,75 ± 168,07	<b>A</b>

**Annexe 16 :** Synthèse des analyses ANOVA (AV2) réalisées pour caractériser les constituants fourragers ainsi que les valeurs énergétiques et protéiques du Kernza, des légumineuses et des mélanges Kernza-légumineuses. Les \* indiquent les niveaux de significativité. «\*\*\* : p-valeur < 0,001, \*\* : p-valeur < 0,01, \* p-valeur < 0,05, ' ' < 0,1. Df = Degré de liberté, PS = Poids sec

Kernza												Légumineuses										Mélange Kernza - Légumineuses														
AV2 : Association*Stade_BBCH																																				
Fauche 0																																				
	Df	Cendres	CP	NDF	ADF	ADL	Cellulose	OMD	VEM	VEVI	DVE	OEB	Cendres	CP	NDF	ADF	ADL	Cellulose	OMD	VEM	VEVI	DVE	OEB	Cendres	CP	NDF	ADF	ADL	Cellulose	OMD	VEM	VEVI	DVE	OEB		
Association (A)	3					*					**		***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	*	***	***	***	***	***
Stade_BBCH (S)	2	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
Bloc	1	*	*			*						*																								
A*S	6	-	.	-	-	.	-	-	-	-	**	-	***	*	**	**	***	**	**	**	**	**	**	*		**			***	*		***	***	***	***	***
Residuals	35																																			
Fauche 1																																				
	Df	Ash	CP	NDF	ADF	ADL	Cellulose	OMD	VEM	VEVI	DVE	OEB	Ash	CP	NDF	ADF	ADL	Cellulose	OMD	VEM	VEVI	DVE	OEB	Ash	CP	NDF	ADF	ADL	Cellulose	OMD	VEM	VEVI	DVE	OEB		
Association (A)	3					*							***	***	***	***	*	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	**	***	***	***	***	***
Stade_BBCH (S)	2	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
Bloc	1	.		*	*	**	*	.			.	*												*					**							
A*S	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	.		*		.	**	**	*	*	.	.	.							**	**				**
Residuals	35																																			
Fauche 3																																				
	Df	Ash	CP	NDF	ADF	ADL	Cellulose	OMD	VEM	VEVI	DVE	OEB	Ash	CP	NDF	ADF	ADL	Cellulose	OMD	VEM	VEVI	DVE	OEB	Ash	CP	NDF	ADF	ADL	Cellulose	OMD	VEM	VEVI	DVE	OEB		
Association (A)	3												***	***	***	***		***	***	***	***	**	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
Stade_BBCH (S)	2	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
Bloc	1	***	**	.	*	*		*	*	*		***												***	**	*			.							
A*S	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**	**		*	***						*	**	**	**	***	***	***		***	***	***	***	***	**
Residuals	35																																			

**Annexe 17** : Synthèse des analyses ANOVA (AV1) réalisées pour caractériser les constituants fourragers ainsi que les valeurs énergétiques et protéiques des légumineuses. Les \* indiquent les niveaux de significativité. «\*\*\* : p-valeur < 0,001, \*\* : p-valeur < 0,01, \* p-valeur < 0,05, ' . ' < 0,1. Df = Degré de liberté, PS = Poids sec

Légumineuses																																		
AV1 : Association																																		
Fauche 0																																		
	Df	Cendres			CP			NDF			ADF			ADL			Cellulose			OMD			VEM			VEVI			DVE			OEB		
		K+TB	K+TV	K+L	K+TB	K+TV	K+L	K+TB	K+TV	K+L	K+TB	K+TV	K+L	K+TB	K+TV	K+L	K+TB	K+TV	K+L	K+TB	K+TV	K+L	K+TB	K+TV	K+L	K+TB	K+TV	K+L	K+TB	K+TV	K+L			
Stade_BBCH	2	*	***	***	***	***	***	**	***	***	***	***	***	**	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***			
Bloc	1																																	
Residuals	8																																	
Fauche 1																																		
	Df	NDF			Cellulose			OMD			VEM			VEVI																				
		K+TB	K+TV	K+L	K+TB	K+TV	K+L	K+TB	K+TV	K+L	K+TB	K+TV	K+L	K+TB	K+TV	K+L																		
Stade_BBCH	2	*	***	***	*	***	***	**	***	***	**	***	***	**	***	***																		
Bloc	1																																	
Residuals	8																																	
Fauche 3																																		
	Df	Cendres			CP			ADF			ADL			DVE			OEB																	
		K+TB	K+TV	K+L	K+TB	K+TV	K+L	K+TB	K+TV	K+L	K+TB	K+TV	K+L	K+TB	K+TV	K+L	K+TB	K+TV	K+L															
Stade_BBCH	2	***	***	*	***	**	**	*	***	*	**	***	***	**	***	***	***	**	*															
Bloc	1																																	
Residuals	8																																	
AV1 : Stade_BBCH																																		
Fauche 0																																		
	Df	Cendres			CP			NDF			ADF			ADL			Cellulose			OMD			VEM			VEVI			DVE			OEB		
		BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65			
Association	2	***	***	***	*	***	***	***	***	**	***	***	**	***	***	**	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***			
Bloc	1	.			*	*	.	*	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.			
Residuals	7																																	
Fauche 1																																		
	Df	NDF			Cellulose			OMD			VEM			VEVI																				
		BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65																		
Association	2	***	***	***	***	***	***	***	**	***	***	**	***	***	**	***																		
Bloc	1			*			*			*			*		*																			
Residuals	7																																	
Fauche 3																																		
	Df	Cendres			CP			ADF			ADL			DVE			OEB																	
		BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65															
Association	2	***	**	***	*	**	***	***	***	*		***	***	*	.	.	**	***	***															
Bloc	1	.			*		.	.	.	.	.	.	.	*	.	*	.	.	.															
Residuals	7																																	

**Annexe 18 :** Synthèse des analyses ANOVA (AV1) réalisées pour caractériser les constituants fourragers ainsi que les valeurs énergétiques et protéiques du Kernza et des mélanges Kernza-légumineuses. Les \* indiquent les niveaux de significativité. «\*\*\* : p-valeur < 0,001, \*\* : p-valeur < 0,01, \* p-valeur < 0,05, ' ' < 0,1. Df = Degré de liberté, PS = Poids sec

Mélange Kernza-Légumineuse																																									
AV1 : Association																																									
Fauche 0																																									
	Df	CP				ADL				Cellulose				VEM				VEVI				DVE				OEB															
Stade_BBCH		K	K+TB	K+TV	K+L	K	K+TB	K+TV	K+L	K	K+TB	K+TV	K+L	K	K+TB	K+TV	K+L	K	K+TB	K+TV	K+L	K	K+TB	K+TV	K+L	K	K+TB	K+TV	K+L												
2		***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***												
Bloc	1																																								
Residuals	8																																								
Fauche 1																																									
	Df	VEM				VEVI				OEB																															
Stade_BBCH	2	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***												
Bloc	1																																								
Residuals	8																																								
Fauche 3																																									
	Df	Cendres				CP				NDF				ADF				ADL				OMD				VEM				VEVI				DVE				OEB			
Stade_BBCH	2	**		***	**	***	**	***	***	***	*	**	***	***	**	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***					
Bloc	1			*																																					
Residuals	8																																								
AV1 : Stade_BBCH																																									
Fauche 0																																									
	Df	CP				ADL				Cellulose				VEM				VEVI				DVE				OEB															
Association	3	**	***	***	*	***		***		*	***	***	***	***	**	**	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***						
Bloc	1	*			*		**																																		
Residual	11																																								
Fauche 1																																									
	Df	VEM				VEVI				OEB																															
Association	3	*		***		***	***	***	**	***		***																													
Bloc	1																																								
Residual	11																																								
Fauche 3																																									
	Df	Cendres				CP				NDF				ADF				ADL				OMD				VEM				VEVI				DVE				OEB			
Association	3	***		***	**	*	***	***	*	***	***	***	***	***	*	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***					
Bloc	1	*			*									*																											
Residual	11																																								
Kernza																																									
DVE																																									
Fauche 0																																									
AV1 : Association										AV1 : Stade_BBCH																															
Stade_BBCH	Df	K	K+TB	K+TV	K+L	Association	Df	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Association	Df	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Association	Df	BBCH30	BBCH39	BBCH65																					
2	2	***	***	***	***	3	3			**	3	3			**	3	3																								
Bloc	1					Bloc	1				Bloc	1				Bloc	1																								
Residual	8					Residual	11				Residual	11				Residual	11																								

**Annexe 19** : Moyennes des constituants fourragers et des valeurs énergétiques et protéiques du Kernza pour chaque association et stade selon les trois modalités de fauche. Lorsqu'aucune interaction entre le stade et l'association n'est observée, les données ont été moyennées par stade et par association. Les lettres minuscules représentent les résultats du test SNK du facteur association et les lettres majuscules représentent les résultats du test SNK du facteur stade

Valeurs fourragères						Valeurs énergétiques et protéiques								
Kernza						Kernza								
	Fauche 0	Fauche 1	Fauche 3			Fauche 0	Fauche 1	Fauche 3						
Cendres	K	6,62 ± 0,29 a	6,50 ± 0,33 a	7,75 ± 0,20 a	VEM	K	732,00 ± 51,84 a	737,67 ± 52,04 a	767,75 ± 37,14 a	VEM	K	732,00 ± 51,84 a	737,67 ± 52,04 a	767,75 ± 37,14 a
	K + TB	6,78 ± 0,36 a	6,59 ± 0,36 a	8,12 ± 0,30 a		K + TB	739,4 ± 53,45 a	742,17 ± 53,20 a	775,08 ± 37,81 a		K + TB	739,4 ± 53,45 a	742,17 ± 53,20 a	775,08 ± 37,81 a
	K + TV	6,74 ± 0,36 a	6,82 ± 0,33 a	7,76 ± 0,30 a		K + TV	742,9 ± 54,85 a	737,25 ± 54,90 a	770,17 ± 43,24 a		K + TV	742,9 ± 54,85 a	737,25 ± 54,90 a	770,17 ± 43,24 a
	K + L	6,82 ± 0,29 a	6,78 ± 0,35 a	7,87 ± 0,31 a		K + L	744,9 ± 54,11 a	736,08 ± 53,11 a	762,17 ± 42,33 a		K + L	744,9 ± 54,11 a	736,08 ± 53,11 a	762,17 ± 42,33 a
	BBCH30	7,97 ± 0,12 A	7,97 ± 0,12 A	7,97 ± 0,12 B		BBCH30	923,6 ± 6,11 A	923,63 ± 6,11 A	923,63 ± 6,11 A		BBCH30	923,6 ± 6,11 A	923,63 ± 6,11 A	923,63 ± 6,11 A
BBCH39	6,56 ± 0,17 B	6,56 ± 0,12 B	6,89 ± 0,15 C	BBCH39	793,7 ± 8,30 B	788,25 ± 8,42 B	776,50 ± 10,00 B	BBCH39	793,7 ± 8,30 B	788,25 ± 8,42 B	776,50 ± 10,00 B			
BBCH65	5,69 ± 0,13 C	5,49 ± 0,17 C	8,77 ± 0,15 A	BBCH65	502,1 ± 0,77 C	503 ± 0,98 C	606,25 ± 7,85 C	BBCH65	502,1 ± 0,77 C	503 ± 0,98 C	606,25 ± 7,85 C			
CP	K	9,83 ± 1,81 a	10,06 ± 1,77 a	13,83 ± 0,89 a	VEVI	K	751,8 ± 68,20 a	759,5 ± 68,46 a	798,17 ± 49,34 a	VEVI	K	751,8 ± 68,20 a	759,5 ± 68,46 a	798,17 ± 49,34 a
	K + TB	10,71 ± 2,08 a	10,83 ± 1,93 a	14,82 ± 1,19 a		K + TB	761,4 ± 70,31 a	765,17 ± 70,03 a	807,75 ± 50,13 a		K + TB	761,4 ± 70,31 a	765,17 ± 70,03 a	807,75 ± 50,13 a
	K + TV	10,41 ± 1,77 a	10,73 ± 1,77 a	13,60 ± 1,17 a		K + TV	766,1 ± 72,31 a	758,33 ± 72,30 a	801,33 ± 57,31 a		K + TV	766,1 ± 72,31 a	758,33 ± 72,30 a	801,33 ± 57,31 a
	K + L	11,12 ± 1,58 a	10,66 ± 1,74 a	13,43 ± 1,26 a		K + L	768,9 ± 71,29 a	757,42 ± 69,97 a	791,25 ± 791,25 a		K + L	768,9 ± 71,29 a	757,42 ± 69,97 a	791,25 ± 791,25 a
	BBCH30	18,16 ± 0,53 A	18,16 ± 0,53 A	18,16 ± 0,53 A		BBCH30	1006 ± 8,21 A	1006,1 ± 8,21 A	1006,1 ± 8,21 A		BBCH30	1006 ± 8,21 A	1006,1 ± 8,21 A	1006,1 ± 8,21 A
BBCH39	9,25 ± 0,38 B	9,40 ± 0,24 B	9,78 ± 0,33 C	BBCH39	829,9 ± 11,21 B	822,75 ± 11,26 B	807,31 ± 13,25 B	BBCH39	829,9 ± 11,21 B	822,75 ± 11,26 B	807,31 ± 13,25 B			
BBCH65	4,15 ± 0,44 C	4,15 ± 0,41 C	13,83 ± 0,42 B	BBCH65	450,2 ± 0,90 C	451,44 ± 1,12 C	585,44 ± 10,20 C	BBCH65	450,2 ± 0,90 C	451,44 ± 1,12 C	585,44 ± 10,20 C			
NDF	K	61,56 ± 2,21 a	61,46 ± 2,39 a	60,20 ± 1,82 a	DVE	K	-	59,08 ± 7,43 a	65,50 ± 5,15 a	DVE	K	-	59,08 ± 7,43 a	65,50 ± 5,15 a
	K + TB	60,55 ± 2,33 a	61,24 ± 2,50 a	59,63 ± 1,89 a		K + TB	-	61,83 ± 7,05 a	67,67 ± 5,32 a		K + TB	-	61,83 ± 7,05 a	67,67 ± 5,32 a
	K + TV	61,66 ± 2,51 a	62,54 ± 2,80 a	60,36 ± 2,15 a		K + TV	-	60,75 ± 7,45 a	65,00 ± 6,05 a		K + TV	-	60,75 ± 7,45 a	65,00 ± 6,05 a
	K + L	60,17 ± 2,24 a	62,47 ± 2,85 a	60,41 ± 2,09 a		K + L	-	61,17 ± 7,03 a	63,75 ± 5,92 a		K + L	-	61,17 ± 7,03 a	63,75 ± 5,92 a
	BBCH30	51,89 ± 0,46 C	51,89 ± 0,46 C	51,89 ± 0,46 C		BBCH30	-	90,5 ± 0,92 A	90,50 ± 0,92 A		BBCH30	-	90,5 ± 0,92 A	90,50 ± 0,92 A
BBCH39	60,95 ± 0,68 B	61,21 ± 0,59 B	61,66 ± 0,64 B	BBCH39	-	57,88 ± 0,91 B	57,56 ± 1,10 B	BBCH39	-	57,88 ± 0,91 B	57,56 ± 1,10 B			
BBCH65	70,11 ± 0,48 A	72,68 ± 0,63 A	66,90 ± 0,62 A	BBCH65	-	33,75 ± 2,40 C	48,38 ± 1,59 C	BBCH65	-	33,75 ± 2,40 C	48,38 ± 1,59 C			
ADF	K	33,31 ± 1,75 a	33,19 ± 1,88 a	32,92 ± 1,60 a	OEB	K	-42,3 ± 2,49 a	-43,17 ± 2,37 a	-35,25 ± 3,88 a	OEB	K	-42,3 ± 2,49 a	-43,17 ± 2,37 a	-35,25 ± 3,88 a
	K + TB	32,95 ± 1,84 a	33,09 ± 1,88 a	33,00 ± 1,69 a		K + TB	-40,8 ± 2,49 a	-42,17 ± 2,72 a	-32,33 ± 4,76 a		K + TB	-40,8 ± 2,49 a	-42,17 ± 2,72 a	-32,33 ± 4,76 a
	K + TV	33,22 ± 2,12 a	33,72 ± 2,21 a	33,00 ± 1,98 a		K + TV	-42,00 ± 3,07 a	-40,58 ± 2,84 a	-35,50 ± 5,09 a		K + TV	-42,00 ± 3,07 a	-40,58 ± 2,84 a	-35,50 ± 5,09 a
	K + L	32,33 ± 1,92 a	33,98 ± 2,33 a	33,19 ± 1,98 a		K + L	-40,8 ± 3,79 a	-40,83 ± 3,21 a	-34,17 ± 5,21 a		K + L	-40,8 ± 3,79 a	-40,83 ± 3,21 a	-34,17 ± 5,21 a
	BBCH30	26,18 ± 0,39 C	26,18 ± 0,39 C	26,18 ± 0,39 C		BBCH30	-42,2 ± 1,74 B	-42,19 ± 1,74 B	-42,19 ± 1,74 B		BBCH30	-42,2 ± 1,74 B	-42,19 ± 1,74 B	-42,19 ± 1,74 B
BBCH39	31,67 ± 0,52 B	31,95 ± 0,47 B	32,53 ± 0,49 B	BBCH39	-50,8 ± 1,83 C	-50,13 ± 1,59 C	-46,69 ± 2,09 C	BBCH39	-50,8 ± 1,83 C	-50,13 ± 1,59 C	-46,69 ± 2,09 C			
BBCH65	41,01 ± 0,40 A	42,35 ± 0,51 A	40,37 ± 0,43 A	BBCH65	-31,50 ± 1,11 A	-32,75 ± 1,35 A	-14,06 ± 1,12 A	BBCH65	-31,50 ± 1,11 A	-32,75 ± 1,35 A	-14,06 ± 1,12 A			
ADL	K	4,03 ± 0,61 a	3,90 ± 0,56 a	3,88 ± 0,56 a	DVE	Fauche 0								
	K + TB	4,20 ± 0,64 a	3,80 ± 0,48 a	4,23 ± 0,66 a		Association	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Association	BBCH30	BBCH39	BBCH65	
	K + TV	3,88 ± 0,50 ab	4,19 ± 0,55 a	4,14 ± 0,66 a		K	88,75 ± 1,11 a A	55,75 ± 3,12 a B	28,00 ± 1,83 b C	K	88,75 ± 1,11 a A	55,75 ± 3,12 a B	28,00 ± 1,83 b C	
	K + L	3,25 ± 0,40 b	3,59 ± 0,48 a	4,18 ± 0,74 a		K + TB	91,75 ± 1,80 a A	59,50 ± 2,60 a B	25,50 ± 1,19 b C	K + TB	91,75 ± 1,80 a A	59,50 ± 2,60 a B	25,50 ± 1,19 b C	
	BBCH30	2,18 ± 0,21 C	2,18 ± 0,21 C	2,18 ± 0,21 C		K + TV	92,25 ± 1,70 a A	56,75 ± 1,25 a B	32,75 ± 3,09 b C	K + TV	92,25 ± 1,70 a A	56,75 ± 1,25 a B	32,75 ± 3,09 b C	
BBCH39	3,27 ± 0,16 B	3,52 ± 0,21 B	3,15 ± 0,12 B	K + L	89,25 ± 2,53 a A	60,75 ± 1,89 a B	43,75 ± 4,17 a C	K + L	89,25 ± 2,53 a A	60,75 ± 1,89 a B	43,75 ± 4,17 a C			
BBCH65	6,07 ± 0,29 A	5,91 ± 0,21 A	6,99 ± 0,17 A	Moyennes	-	-	-	Moyennes	-	-	-			
Cellulose	K	35,01 ± 2,48 a	34,44 ± 2,33 ab	29,70 ± 1,07 a	Cellulose	K	35,01 ± 2,48 a	34,44 ± 2,33 ab	29,70 ± 1,07 a	Cellulose	K	35,01 ± 2,48 a	34,44 ± 2,33 ab	29,70 ± 1,07 a
	K + TB	34,33 ± 2,55 a	33,63 ± 2,36 b	29,40 ± 1,40 a		K + TB	34,33 ± 2,55 a	33,63 ± 2,36 b	29,40 ± 1,40 a		K + TB	34,33 ± 2,55 a	33,63 ± 2,36 b	29,40 ± 1,40 a
	K + TV	35,92 ± 2,32 a	35,60 ± 2,31 a	31,26 ± 1,14 a		K + TV	35,92 ± 2,32 a	35,60 ± 2,31 a	31,26 ± 1,14 a		K + TV	35,92 ± 2,32 a	35,60 ± 2,31 a	31,26 ± 1,14 a
	K + L	34,25 ± 2,31 a	34,70 ± 2,46 ab	30,35 ± 1,47 a		K + L	34,25 ± 2,31 a	34,70 ± 2,46 ab	30,35 ± 1,47 a		K + L	34,25 ± 2,31 a	34,70 ± 2,46 ab	30,35 ± 1,47 a
	BBCH30	25,45 ± 0,46 C	25,45 ± 0,46 C	25,45 ± 0,46 C		BBCH30	25,45 ± 0,46 C	25,45 ± 0,46 C	25,45 ± 0,46 C		BBCH30	25,45 ± 0,46 C	25,45 ± 0,46 C	25,45 ± 0,46 C
BBCH39	34,46 ± 0,46 B	33,99 ± 0,35 B	34,69 ± 0,47 A	BBCH39	34,46 ± 0,46 B	33,99 ± 0,35 B	34,69 ± 0,47 A	BBCH39	34,46 ± 0,46 B	33,99 ± 0,35 B	34,69 ± 0,47 A			
BBCH65	44,72 ± 0,35 A	44,33 ± 0,44 A	30,39 ± 0,66 B	BBCH65	44,72 ± 0,35 A	44,33 ± 0,44 A	30,39 ± 0,66 B	BBCH65	44,72 ± 0,35 A	44,33 ± 0,44 A	30,39 ± 0,66 B			
OMD	K	63,12 ± 3,87 a	62,36 ± 4,45 a	64,28 ± 3,48 a	OMD	K	63,12 ± 3,87 a	62,36 ± 4,45 a	64,28 ± 3,48 a	OMD	K	63,12 ± 3,87 a	62,36 ± 4,45 a	64,28 ± 3,48 a
	K + TB	63,48 ± 4,14 a	62,48 ± 4,49 a	65,10 ± 3,34 a		K + TB	63,48 ± 4,14 a	62,48 ± 4,49 a	65,10 ± 3,34 a		K + TB	63,48 ± 4,14 a	62,48 ± 4,49 a	65,10 ± 3,34 a
	K + TV	63,38 ± 4,65 a	62,19 ± 4,92 a	64,28 ± 4,19 a		K + TV	63,38 ± 4,65 a	62,19 ± 4,92 a	64,28 ± 4,19 a		K + TV	63,38 ± 4,65 a	62,19 ± 4,92 a	64,28 ± 4,19 a
	K + L	64,61 ± 3,99 a	61,51 ± 4,93 a	63,43 ± 4,07 a		K + L	64,61 ± 3,99 a	61,51 ± 4,93 a	63,43 ± 4,07 a		K + L	64,61 ± 3,99 a	61,51 ± 4,93 a	63,43 ± 4,07 a
	BBCH30	78,52 ± 0,70 A	78,52 ± 0,70 A	78,52 ± 0,70 A		BBCH30	78,52 ± 0,70 A	78,52 ± 0,70 A	78,52 ± 0,70 A		BBCH30	78,52 ± 0,70 A	78,52 ± 0,70 A	78,52 ± 0,70 A
BBCH39	66,65 ± 0,83 B	66,07 ± 0,79 B	65,40 ± 0,87 B	BBCH39	66,65 ± 0,83 B	66,07 ± 0,79 B	65,40 ± 0,87 B	BBCH39	66,65 ± 0,83 B	66,07 ± 0,79 B	65,40 ± 0,87 B			
BBCH65	45,76 ± 0,71 C	41,81 ± 1,04 C	48,89 ± 0,97 C	BBCH65	45,76 ± 0,71 C	41,81 ± 1,04 C	48,89 ± 0,97 C	BBCH65	45,76 ± 0,71 C	41,81 ± 1,04 C	48,89 ± 0,97 C			

**Annexe 20** : Moyennes des constituants fourragers des légumineuses pour chaque association et stade selon les trois modalités de fauche. Lorsqu'aucune interaction entre le stade et l'association n'est observée, les données ont été moyennées par stade et par association. Les lettres minuscules représentent les résultats du test SNK du facteur association et les lettres majuscules représentent les résultats du test SNK du facteur stade

Valeurs fourragères												
légumineuses												
		Fauche 0			Fauche 1			Fauche 3				
	Association	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes
Cendres	K+TB	11,27 ± 0,18 a A	10,58 ± 0,35 a AB	9,70 ± 0,18 a B				10,10 ± 0,37 a	11,27 ± 0,18 a A	10,64 ± 0,27 a A	8,64 ± 0,25 b B	
	K+TV	9,82 ± 0,09 b A	7,98 ± 0,30 c B	7,41 ± 0,29 b B				8,87 ± 0,37 b	9,82 ± 0,09 b A	9,60 ± 0,22 b A	7,52 ± 0,24 c B	
	K+L	11,05 ± 1,15 a A	8,90 ± 0,15 b B	7,52 ± 0,13 b C				10,19 ± 0,40 a	11,05 ± 0,13 a A	11,18 ± 0,16 a A	10,10 ± 0,33 a B	
	Moyennes	-	-	-	10,66 ± 0,21 A	10,46 ± 0,24 A	8,12 ± 0,22 B		-	-	-	
CP	Association	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes
	K+TB	24,78 ± 1,09 a A	18,48 ± 0,57 a B	14,89 ± 0,25 a C				19,27 ± 1,56 b	24,78 ± 1,09 a A	20,73 ± 0,16 b B	16,79 ± 0,34 b C	
	K+TV	22,02 ± 0,72 b A	13,53 ± 0,78 b B	12,76 ± 1,05 b B				18,46 ± 1,30 b	22,02 ± 0,72 b A	20,73 ± 0,60 b A	16,13 ± 0,84 b B	
	K+L	24,78 ± 0,16 a A	18,08 ± 0,85 a B	12,77 ± 0,36 b C				20,97 ± 1,29 a	24,78 ± 0,16 a A	23,07 ± 0,27 a B	22,09 ± 0,62 a B	
Moyennes	-	-	-	23,77 ± 0,55 A	21,58 ± 0,42 B	13,92 ± 0,41 C		-	-	-		
NDF	Association	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes
	K+TB	30,08 ± 0,59 c B	36,36 ± 0,35 c A	39,76 ± 1,80 c A	30,08 ± 0,59 c B	33,46 ± 0,72 b AB	39,18 ± 2,52 b A					33,85 ± 1,16 b
	K+TV	31,32 ± 0,28 b C	39,67 ± 0,70 b B	46,77 ± 0,71 b A	31,32 ± 0,28 b B	32,90 ± 0,77 b B	42,17 ± 0,71 b A					34,60 ± 1,12 b
	K+L	35,18 ± 0,19 a C	43,97 ± 0,51 a B	54,26 ± 1,07 a A	35,18 ± 0,19 a C	39,01 ± 0,49 a B	51,15 ± 0,45 a A					39,11 ± 1,00 a
Moyennes	-	-	-	-	-	-		32,39 ± 0,71 C	35,27 ± 0,96 B	39,90 ± 0,94 A		
ADF	Association	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes
	K+TB	25,84 ± 0,25 b C	28,46 ± 0,27 c B	31,03 ± 0,89 c A				28,08 ± 0,97 b	25,84 ± 0,25 b B	26,40 ± 0,63 b B	29,30 ± 0,75 b A	
	K+TV	23,55 ± 0,48 c B	30,15 ± 0,69 b A	35,64 ± 0,59 b A				26,29 ± 1,10 c	23,55 ± 0,48 c B	24,11 ± 0,66 b B	29,22 ± 0,65 b A	
	K+L	29,12 ± 0,43 a C	33,71 ± 0,45 a B	40,86 ± 0,67 a A				32,35 ± 1,17 a	29,12 ± 0,43 a B	30,33 ± 0,65 a AB	31,30 ± 0,19 a A	
Moyennes	-	-	-	26,20 ± 0,79 B	26,99 ± 0,91 B	33,28 ± 1,05 A		-	-	-		
ADL	Association	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes
	K+TB	3,98 ± 0,12 a A	4,11 ± 0,06 b A	4,29 ± 0,12 c A				4,31 ± 0,14 b	3,98 ± 0,12 a B	4,16 ± 0,26 a B	5,03 ± 0,04 a A	
	K+TV	3,84 ± 0,07 a B	4,04 ± 0,02 b B	5,52 ± 0,08 b A				4,37 ± 0,17 ab	3,84 ± 0,07 a C	4,16 ± 0,02 a B	5,06 ± 0,05 a A	
	K+L	3,93 ± 0,06 a C	4,74 ± 0,10 a B	5,89 ± 0,09 a A				4,57 ± 0,17 a	3,93 ± 0,06 a B	4,53 ± 0,08 a A	4,61 ± 0,10 b A	
Moyennes	-	-	-	3,91 ± 0,05 C	4,30 ± 0,09 B	5,01 ± 0,10 A		-	-	-		
Cellulose	Association	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes
	K+TB	20,06 ± 0,37 b C	23,19 ± 0,39 c B	26,31 ± 0,98 c A	20,06 ± 0,37 b B	20,76 ± 0,41 b B	25,69 ± 1,48 c A					22,06 ± 0,80 b
	K+TV	20,08 ± 0,34 b B	27,09 ± 0,69 b A	32,08 ± 0,70 b A	20,08 ± 0,34 b B	20,81 ± 0,71 b B	28,18 ± 0,71 b A					22,34 ± 0,87 b
	K+L	24,58 ± 0,22 a C	31,34 ± 0,51 a B	38,82 ± 1,00 a A	24,58 ± 0,22 a C	26,25 ± 0,56 a B	36,73 ± 0,47 a A					26,62 ± 0,59 a
Moyennes	-	-	-	-	-	-		21,71 ± 0,70 C	22,78 ± 0,89 B	26,57 ± 0,68 A		
OMD	Association	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes
	K+TB	88,03 ± 0,72 a A	78,68 ± 1,45 a B	71,63 ± 1,69 a C	88,03 ± 0,72 a A	83,04 ± 0,58 a A	71,64 ± 2,68 a B					80,94 ± 2,19 a
	K+TV	80,53 ± 0,25 b A	68,02 ± 1,17 b B	55,06 ± 1,05 b C	80,53 ± 0,25 b A	78,46 ± 0,88 b A	62,44 ± 1,28 b B					75,65 ± 1,70 b
	K+L	78,13 ± 0,55 c A	62,94 ± 0,62 c B	45,72 ± 0,87 c C	78,13 ± 0,55 c A	73,76 ± 0,66 c B	52,98 ± 1,11 c C					73,15 ± 1,35 c
Moyennes	-	-	-	-	-	-		81,70 ± 1,29 A	78,00 ± 1,27 B	69,85 ± 1,17 C		

**Annexe 21 :** Moyennes des valeurs énergétiques et protéiques des légumineuses pour chaque association et stade selon les trois modalités de fauche. Lorsqu'aucune interaction entre le stade et l'association n'est observée, les données ont été moyennées par stade et par association. Les lettres minuscules représentent les résultats du test SNK du facteur association et les lettres majuscules représentent les résultats du test SNK du facteur stade

Valeurs énergétiques et protéiques												
Légumineuses												
	Fauche 0			Fauche 1			Fauche 3					
	Association	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes
VEM	K+TB	1059,67 ± 10,37 a A	950,75 ± 12,59 a B	878,25 ± 15,63 a C	1059,67 ± 10,37 a A	1000,7 ± 16,18 a A	884,75 ± 23,53 a B	-	-	-	-	985,30 ± 21,60 a
	K+TV	993,00 ± 6,38 b A	858,25 ± 10,40 b B	777,75 ± 38,43 b C	993,00 ± 6,38 b A	969,75 ± 9,48 a A	812,50 ± 10,44 b B	-	-	-	-	944,33 ± 16,67 b
	K+L	973,50 ± 4,66 c A	825,25 ± 8,48 c B	666,00 ± 8,03 c C	973,50 ± 4,66 c A	926,00 ± 7,22 b B	731,00 ± 9,69 c C	-	-	-	-	925,25 ± 12,43 c
	Moyennes	-	-	-	-	-	-	-	1004,09 ± 11,64 A	962,27 ± 10,95 B	888,17 ± 9,32 C	-
VEVI	Association	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes
	K+TB	1135,00 ± 13,32 a A	993,50 ± 16,88 a B	898,50 ± 20,63 a C	1135,00 ± 13,32 a A	1059,00 ± 21,08 a A	906,00 ± 31,85 a B	-	-	-	-	1036,90 ± 28,79 a
	K+TV	1045,75 ± 7,79 b A	869,25 ± 14,06 b B	765,75 ± 50,05 b C	1045,75 ± 7,79 b A	1015,3 ± 12,57 a A	809,25 ± 13,73 b B	-	-	-	-	980,92 ± 22,25 b
	K+L	1017,75 ± 6,34 c A	822,75 ± 10,68 c B	619,75 ± 10,10 c C	1017,75 ± 6,34 c A	956,25 ± 9,40 b B	701,75 ± 12,30 c C	-	-	-	-	954,08 ± 16,55 c
Moyennes	-	-	-	-	-	-	-	1059,91 ± 15,70 A	1005,73 ± 14,86 B	905,58 ± 12,67 C	-	
DVE	Association	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes
	K+TB	111,00 ± 1,82 a A	93,35 ± 2,04 a B	80,54 ± 2,10 a C	-	-	-	95,47 ± 4,71 a	111,00 ± 1,82 a A	101,26 ± 1,75 a B	87,43 ± 2,58 a C	-
	K+TV	101,42 ± 1,30 b A	75,39 ± 2,56 b B	64,70 ± 6,27 b B	-	-	-	89,20 ± 4,54 b	101,42 ± 1,30 b A	97,68 ± 1,47 a A	80,92 ± 2,34 a B	-
	K+L	101,80 ± 0,57 b A	78,58 ± 2,05 b B	51,93 ± 1,49 c C	-	-	-	86,87 ± 5,07 b	101,80 ± 0,57 b A	95,29 ± 0,92 a B	88,70 ± 1,39 a C	-
Moyennes	-	-	-	104,17 ± 1,47 A	97,79 ± 1,03 B	70,50 ± 2,36 C	-	-	-	-	-	
OEB	Association	BBCH30	BBCH39	BBCH65	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes
	K+TB	79,10 ± 10,05 a A	29,40 ± 4,16 a B	4,82 ± 0,90 ab C	-	-	-	36,26 ± 11,88 b	79,10 ± 10,05 a A	45,25 ± 2,31 b B	17,12 ± 1,64 b C	-
	K+TV	58,11 ± 6,32 b A	-4,32 ± 5,40 b B	-2,20 ± 4,84 b B	-	-	-	33,07 ± 9,04 b	58,11 ± 6,32 b A	48,12 ± 5,19 b A	16,01 ± 6,27 b B	-
	K+L	86,97 ± 1,56 a A	37,88 ± 6,68 a B	8,89 ± 2,31 a C	-	-	-	61,00 ± 8,72 a	86,97 ± 1,56 a A	74,86 ± 2,23 a B	70,12 ± 5,29 a B	-
Moyennes	-	-	-	74,33 ± 5,11 A	57,06 ± 4,69 B	3,86 ± 4,28 C	-	-	-	-	-	

**Annexe 22** : Moyennes des constituants fourragers des mélanges Kernza-légumineuses pour chaque association et stade selon les trois modalités de fauche. Lorsqu'aucune interaction entre le stade et l'association n'est observée, les données ont été moyennées par stade et par association. Les lettres minuscules représentent les résultats du test SNK du facteur association et les lettres majuscules représentent les résultats du test SNK du facteur stade

Valeurs fourragères													
Mélange Kernza-Légumineuses													
		Fauche 0			Fauche 1			Fauche 3					
Cendres	Association	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes
		K				6,62 ± 0,29 d				6,50 ± 0,33 d	7,86 ± 0,14 c A	7,04 ± 0,34 a B	8,36 ± 0,14 b A
	K+TB				7,24 ± 0,45 c				7,35 ± 0,45 c	8,90 ± 0,41 b A	7,87 ± 0,52 a A	8,72 ± 0,17 b A	
	K+TV				7,74 ± 0,30 b				7,81 ± 0,34 b	9,10 ± 0,11 b A	7,84 ± 0,23 a B	7,58 ± 0,24 c B	
	K+L				8,25 ± 0,29 a				8,44 ± 0,36 a	9,82 ± 0,06 a A	8,41 ± 0,29 a B	10,04 ± 0,31 a A	
	Moyennes	8,92 ± 0,21 A	7,19 ± 0,20 B	6,28 ± 0,19 C		8,92 ± 0,21 A	7,50 ± 0,23 B	6,15 ± 0,22 C		-	-	-	
CP	Association	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes
	K	17,46 ± 0,76 b A	8,88 ± 0,71 b B	3,14 ± 0,43 b C					10,06 ± 1,77 d	17,46 ± 0,76 b A	10,59 ± 0,38 b C	13,44 ± 0,20 c B	
	K+TB	20,45 ± 1,00 a A	10,81 ± 0,90 b B	3,51 ± 0,32 b C					12,62 ± 1,92 c	20,45 ± 1,00 a A	12,94 ± 1,41 ab C	16,51 ± 0,14 c B	
	K+TV	20,54 ± 0,44 a A	11,16 ± 0,39 b B	7,76 ± 0,66 a C					14,28 ± 1,56 b	20,54 ± 0,44 a A	13,65 ± 0,36 a C	15,80 ± 0,74 c B	
	K+L	22,02 ± 0,60 a A	15,11 ± 0,77 a B	9,81 ± 0,81 a C					15,60 ± 1,52 a	22,02 ± 0,60 a A	14,28 ± 0,41 a B	21,64 ± 0,55 a A	
	Moyennes	-	-	-		20,12 ± 0,54 A	12,48 ± 0,62 B	6,82 ± 0,77 C		-	-	-	
NDF	Association	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes
	K				61,56 ± 2,21 a				61,46 ± 2,39 a	52,58 ± 0,23 a C	61,13 ± 1,29 a B	66,89 ± 0,35 a A	
	K+TB				57,40 ± 2,99 b				52,82 ± 3,02 b	45,83 ± 2,67 b B	55,02 ± 3,16 ab A	40,96 ± 1,73 b B	
	K+TV				48,70 ± 2,25 c				49,52 ± 2,45 c	39,64 ± 1,36 c B	50,06 ± 1,76 b A	42,35 ± 1,43 b B	
	K+L				50,61 ± 2,44 c				52,07 ± 2,55 c	41,78 ± 0,29 bc C	53,10 ± 0,78 b A	44,44 ± 0,61 b B	
	Moyennes	44,96 ± 1,44 C	54,93 ± 1,69 B	63,82 ± 1,49 A		44,96 ± 1,44 C	54,44 ± 1,26 B	64,76 ± 1,53 A		-	-	-	
ADF	Association	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes
	K				33,31 ± 1,75 a				33,19 ± 1,88 a	26,74 ± 0,11 ab C	32,56 ± 1,05 a B	39,46 ± 0,38 a A	
	K+TB				32,71 ± 1,79 a				32,25 ± 1,78 a	26,35 ± 0,52 b B	31,23 ± 0,83 a A	30,78 ± 0,67 b A	
	K+TV				31,10 ± 1,70 b				30,28 ± 1,65 b	24,36 ± 0,59 c B	29,03 ± 0,91 a A	30,36 ± 0,76 b A	
	K+L				33,84 ± 1,67 a				33,26 ± 0,54 a	27,90 ± 0,42 a B	31,40 ± 0,59 a A	31,83 ± 0,17 b A	
	Moyennes	26,33 ± 0,39 C	31,99 ± 0,48 B	39,91 ± 0,45 A		26,33 ± 0,39 C	30,60 ± 0,48 B	39,80 ± 0,54 A		-	-	-	
ADL	Association	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes
	K	2,16 ± 0,41 b B	3,28 ± 0,36 a B	6,66 ± 0,30 a A					3,90 ± 0,56 a	2,16 ± 0,41 b C	3,14 ± 0,18 a B	6,36 ± 0,17 a A	
	K+TB	2,77 ± 0,33 ab B	3,50 ± 0,35 a B	6,80 ± 0,36 a A				3,99 ± 0,40 a	2,77 ± 0,33 ab C	3,46 ± 0,26 a B	5,34 ± 0,11 b A		
	K+TV	3,31 ± 0,20 a B	3,66 ± 0,17 a B	5,65 ± 0,07 b A				4,36 ± 0,34 a	3,31 ± 0,20 a B	3,47 ± 0,17 a B	5,20 ± 0,07 b A		
	K+L	3,15 ± 0,16 a C	4,23 ± 0,11 a B	5,49 ± 0,23 b A				4,10 ± 0,30 a	3,15 ± 0,16 a B	3,62 ± 0,25 a B	4,76 ± 0,07 c A		
	Moyennes	-	-	-		2,85 ± 0,17 C	3,71 ± 0,16 B	5,72 ± 0,18 A		-	-	-	
Cellulose	Association	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes
	K	25,37 ± 0,46 a C	34,64 ± 1,61 a B	45,02 ± 0,47 a A					34,44 ± 2,33 a				29,70 ± 1,07 a
	K+TB	23,09 ± 0,94 a C	33,52 ± 1,19 a B	43,51 ± 0,80 a A				31,57 ± 2,30 b					26,54 ± 1,21 b
	K+TV	23,07 ± 0,97 a C	30,70 ± 0,13 a B	37,36 ± 0,70 c A				29,66 ± 1,79 c					26,35 ± 0,89 b
	K+L	24,90 ± 0,36 a C	32,09 ± 0,26 a B	41,22 ± 0,66 b A				32,15 ± 1,98 b					28,63 ± 0,89 a
	Moyennes	-	-	-		24,11 ± 0,42 C	31,09 ± 0,65 B	40,66 ± 0,77 A		24,11 ± 0,42 C	31,50 ± 0,63 A	27,81 ± 0,56 B	
OMD	Association	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes
	K				63,12 ± 3,87 a				62,36 ± 4,45 b	77,57 ± 0,30 a A	65,43 ± 1,86 a B	49,83 ± 0,67 c C	
	K+TB				65,03 ± 4,28 a				65,81 ± 4,49 a	80,65 ± 1,33 a A	70,18 ± 1,57 a B	70,90 ± 2,01 a B	
	K+TV				66,15 ± 3,68 a				67,39 ± 3,69 a	80,46 ± 0,88 a A	70,44 ± 1,58 a B	65,95 ± 1,09 b C	
	K+L				62,90 ± 4,03 a				64,70 ± 4,00 ab	78,12 ± 0,75 a A	68,74 ± 0,77 a B	66,44 ± 0,75 b B	
	Moyennes	79,20 ± 0,53 A	66,09 ± 0,81 B	47,61 ± 0,74 C		79,20 ± 0,53 A	69,18 ± 0,87 B	46,82 ± 1,12 C		-	-	-	

**Annexe 23 :** Moyennes des valeurs énergétiques et protéiques des mélanges Kernza-légumineuses pour chaque association et stade selon les trois modalités de fauche. Lorsqu'aucune interaction entre le stade et l'association n'est observée, les données ont été moyennées par stade et par association. Les lettres minuscules représentent les résultats du test SNK du facteur association et les lettres majuscules représentent les résultats du test SNK du facteur stade

Valeurs énergétiques et protéiques													
Mélange Kernza-Légumineuses													
		Fauche 0				Fauche 1				Fauche 3			
Association	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	BBCH30	BBCH39	BBCH65	Moyennes	
VEM	K	912,53 ± 5,11 b A	781,41 ± 17,14 a B	502,18 ± 1,41 c C		912,53 ± 5,11 b A	796,59 ± 17,12 a B	504,49 ± 1,31 b C		912,53 ± 5,11 b A	774,39 ± 21,91 b B	616,55 ± 7,59 b C	
	K+TB	958,72 ± 16,78 a A	801,25 ± 27,24 a B	524,94 ± 8,58 c C		958,72 ± 16,78 a A	848,24 ± 24,61 a B	550,21 ± 16,00 b C		958,72 ± 16,78 a A	834,57 ± 20,47 ab B	876,77 ± 19,03 a B	
	K+TV	970,64 ± 9,92 a A	826,54 ± 5,48 a B	648,75 ± 10,79 a C		970,64 ± 9,92 a A	851,53 ± 15,39 a B	649,51 ± 20,48 a C		970,64 ± 9,92 a A	854,08 ± 19,19 a B	844,01 ± 13,01 a B	
	K+L	952,45 ± 5,80 a A	821,80 ± 7,68 a B	596,60 ± 13,84 b C		952,45 ± 5,80 a A	839,00 ± 16,86 a B	626,88 ± 14,40 a C		952,45 ± 5,80 a A	835,35 ± 10,09 ab B	860,80 ± 7,31 a B	
	Moyennes	-	-	-		-	-	-		-	-	-	
VEVI	K	991,34 ± 6,68 a A	813,24 ± 23,45 a B	450,92 ± 1,66 c C		991,34 ± 6,68 a A	833,55 ± 22,94 a B	453,35 ± 1,40 c C		991,34 ± 6,68 a A	804,45 ± 29,17 a B	598,06 ± 9,54 b C	
	K+TB	1038,85 ± 17,88 a A	835,10 ± 34,01 a B	477,96 ± 10,35 c C		1038,85 ± 17,88 a A	891,08 ± 28,04 a B	507,29 ± 18,64 b C		1038,85 ± 17,88 a A	872,59 ± 23,05 a B	899,66 ± 24,45 a B	
	K+TV	1037,30 ± 12,18 a A	848,41 ± 10,66 a B	616,20 ± 10,48 a C		1037,30 ± 12,18 a A	887,37 ± 20,72 a B	620,41 ± 23,35 a C		1037,30 ± 12,18 a A	891,09 ± 24,31 a B	852,14 ± 15,63 a B	
	K+L	1011,20 ± 8,03 a A	835,03 ± 8,76 a B	546,96 ± 13,68 b C		1011,20 ± 8,03 a A	872,01 ± 20,99 a B	586,52 ± 14,76 a C		1011,20 ± 8,03 a A	866,97 ± 12,83 a B	870,98 ± 9,39 a B	
	Moyennes	-	-	-		-	-	-		-	-	-	
DVE	K	88,66 ± 1,23 b A	56,01 ± 3,03 b B	27,89 ± 1,85 b C					59,07 ± 7,42 b	88,66 ± 1,23 b A	58,86 ± 1,87 b B	49,07 ± 1,15 c C	
	K+TB	96,29 ± 2,51 a A	62,23 ± 3,92 ab B	28,94 ± 1,19 b C					68,62 ± 7,14 a	96,29 ± 2,51 a A	69,54 ± 4,52 a C	82,50 ± 2,21 ab B	
	K+TV	97,85 ± 1,25 a A	66,58 ± 0,38 a B	48,56 ± 1,94 a C					73,59 ± 6,02 a	97,85 ± 1,25 a A	72,59 ± 2,39 a B	77,48 ± 2,26 b B	
	K+L	96,91 ± 1,05 a A	72,47 ± 2,04 a B	46,96 ± 1,73 a C					72,94 ± 5,94 a	96,91 ± 1,05 a A	71,04 ± 1,27 a C	86,40 ± 1,33 a B	
	Moyennes	-	-	-		94,93 ± 1,19 A	68,16 ± 2,00 B	42,58 ± 2,75 C		-	-	-	
OEB	K	-42,99 ± 1,68 c B	-51,65 ± 1,45 c C	-32,59 ± 1,88 c A		-42,99 ± 1,68 c B	-52,50 ± 2,03 c C	-34,79 ± 1,74 c A		-42,99 ± 1,68 c B	-44,63 ± 4,62 b B	-18,58 ± 1,45 c A	
	K+TB	-9,35 ± 12,05 b A	-40,99 ± 5,76 c B	-32,08 ± 2,07 c AB		-9,35 ± 12,05 b A	-28,73 ± 10,53 b A	-29,39 ± 3,46 bc A		-9,35 ± 12,05 b A	-23,49 ± 11,91 ab A	12,98 ± 0,77 b A	
	K+TV	17,30 ± 6,79 a A	-26,63 ± 3,42 b B	-16,51 ± 2,16 b B		17,30 ± 6,79 a A	-9,46 ± 4,45 ab B	-20,33 ± 1,53 b B		17,30 ± 6,79 a A	-10,37 ± 3,34 a B	12,55 ± 5,35 b A	
	K+L	35,98 ± 2,05 a A	6,55 ± 6,11 a B	-7,07 ± 3,69 a B		35,98 ± 2,05 a A	-2,86 ± 5,51 a B	-2,36 ± 5,30 a B		35,98 ± 2,05 a A	-2,49 ± 6,68 a C	65,74 ± 5,12 a A	
	Moyennes	-	-	-		-	-	-		-	-	-	

