

---

## Étude du potentiel fourrager du Kernza® (*Thinopyrum intermedium*), une culture céréalière pérenne

**Auteur :** Dufrane, Chloé

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

**Faculté :** Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

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

**Année académique :** 2020-2021

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/12989>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

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

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

---

**ÉTUDE DU POTENTIEL FOURRAGER DU  
KERNZA® (*THINOPYRUM INTERMEDIUM*),  
UNE CULTURE CÉRÉALIÈRE PÉRENNE**

**CHLOÉ DUFRANE**

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

**ANNÉE ACADÉMIQUE 2020-2021**

**CO-PROMOTEURS : BENJAMIN DUMONT ET 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.

**ÉTUDE DU POTENTIEL FOURRAGER DU  
KERNZA® (*THINOPYRUM INTERMEDIUM*),  
UNE CULTURE CÉRÉALIÈRE PÉRENNE**

**CHLOÉ DUFRANE**

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

**ANNÉE ACADÉMIQUE 2020-2021**

**CO-PROMOTEURS : BENJAMIN DUMONT ET LAURA FAGNANT**

## Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier mon co-promoteur, Benjamin Dumont, de m'avoir encadrée durant la réalisation de ce travail de fin d'études et particulièrement pour la partie chimométrie. Vos explications et conseils m'ont été précieux.

Je souhaite également remercier infiniment Laura Fagnant, ma co-promotrice, pour sa disponibilité sans faille et ses conseils précieux et avisés. Ce travail ne serait pas ce qu'il est sans son aide. Un grand merci également pour tous les bons moments passés au champ, durant les prélèvements et j'en passe. Merci de m'avoir tant appris durant ces derniers mois, merci pour la découverte de cette plante qu'est le Kernza !

Je remercie également mes professeurs Yves Beckers et Jérôme Bindelle pour leurs aide et conseils judicieux dans l'élaboration de ce travail.

Je souhaite aussi remercier Virginie Decruyenaere pour les données de prédictions infrarouges qu'elle m'a fournies ainsi que pour toute l'aide apportée et ses réponses à mes nombreuses questions. Je remercie aussi Sébastien Gofflot pour les précieuses informations et conseils qu'il m'a donnés pour mener à bien mes analyses de laboratoire.

Par ailleurs, j'aimerais remercier Sylvie Mabilie pour son aide incroyable au laboratoire, sa disponibilité et sa patience. Merci d'avoir rendu ce travail de laboratoire si agréable au quotidien. Sans son aide, je n'aurais pu mener mes analyses de la sorte. J'en profite pour remercier l'Unité de zootechnie dans son ensemble pour leur accueil bienveillant. Ces remerciements vont également à François et Dominique pour leur aide lors des moutures.

Je tiens aussi à remercier l'Unité de phytotechnie et l'équipe de la Ferme expérimentale pour leur accueil et la bonne humeur qui y régnait chaque jour. Un merci particulier à Carine pour son aide durant les prélèvements.

Un merci tout particulier va également à la « Team Openspace » : Gilles, Florence, Christophe, Florine et Pierre auxquels j'ajoute également Laura. Partager ce bureau avec vous restera un des plus beaux souvenirs de mes années d'études. Merci pour votre aide, vos encouragements et tous les bons moments que nous avons partagés.

Je souhaite aussi remercier la « Team des 8 » : Marie, Justine, Pauline, Mélanie, Thomas, Marie et Camille. Merci d'avoir été là dès les premiers jours de ces 5 années d'études. Merci également à tous ceux dont j'ai pu croiser la route durant les diverses activités gembloutoises. Tous ces souvenirs resteront gravés à jamais.

Je tiens aussi à remercier mes cokotteurs : Lisa, Sophie, Maya, Marie et Thibaut. Merci d'avoir partagé mon quotidien et de l'avoir rendu si formidable.

Enfin, je remercie ma famille qui m'a toujours soutenue tout au long de mes études. Merci pour votre confiance, je ne serais pas là où j'en suis aujourd'hui sans vous. Un merci tout particulier à ma maman pour ses encouragements sans faille.

Gembloux un jour, Gembloux toujours !

## Résumé

L'intérêt pour les cultures céréalières pérennes est grandissant, notamment en Amérique du Nord. Les avantages environnementaux de ces cultures pérennes sont notamment de limiter l'érosion des sols et l'utilisation de certains intrants. L'agropyre intermédiaire (*Thinopyrum intermedium*), de son nom commercial Kernza®, est actuellement étudié pour sa double valorisation grains-fourrage en permettant une récolte de fourrage au printemps, une récolte de grains et de paille durant l'été ainsi qu'une deuxième récolte de fourrage à l'automne. En Europe, son potentiel fourrager et particulièrement sa valeur alimentaire sont peu étudiés. Cette étude a donc pour objectif de caractériser les rendements fourragers à différents stades de développement ainsi que la valeur alimentaire de ces fourrages par analyses chimiques et spectrométrie proche infrarouge. Le rendement du fourrage produit au début du printemps est limité, de l'ordre d'1,5 T/ha, mais sa valeur énergétique est élevée, de l'ordre de 1018 VEM. La quantité de biomasse aérienne récoltée en été est importante, d'environ 14 T/ha, ce qui constitue la plus grande part de biomasse aérienne récoltée sur l'année mais sa valeur énergétique est faible, d'environ 494 VEM. À l'automne, le rendement du fourrage est presque égal à celui du printemps, environ 1 T/ha en première année d'exploitation, et sa valeur énergétique est élevée également, d'environ 933 VEM. Afin de limiter les analyses chimiques à réaliser dans le futur, la spectrométrie proche infrarouge a également été étudiée et une calibration spécifique au Kernza a été réalisée. Celle-ci présente de bons résultats à l'exception des teneurs en cendres et en ADL pour lesquelles les résultats sont inférieurs à ceux obtenus pour les autres paramètres.

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

## Abstract

Interest in perennial grain crop is growing, particularly in North America. The environmental benefits of these perennial crops include reduced soil erosion and reduced use of certain inputs. Intermediate wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*), under the trade name Kernza®, is currently being studied for its dual use of grain and forage by allowing a forage harvest in the spring, a grain and straw harvest in the summer and a second forage harvest in the fall. In Europe, its forage potential and particularly its feed value are little studied. The aim of this study is to characterise the forage yields at different stages of development and the feed value of these forages by chemical analysis and near infrared spectroscopy. The yield of the forage produced in early spring is limited, around 1.5 T/ha, but its energy value is high, around 1018 VEM. The amount of above-ground biomass harvested in summer is large, about 14 T/ha, which is the largest amount of above-ground biomass harvested in the year, but its energy value is low, about 494 VEM. In the fall, the forage yield is almost equal to that of spring, about 1 T/ha in the first year of production, and its energy value is also high, at about 933 VEM. In order to limit the chemical analyses to be carried out in the future, near infrared spectroscopy was also studied and a specific calibration for Kernza was carried out. The results are good, except for the ash and ADL contents, for which the results are lower than those obtained for the other parameters.

**Keywords** : Kernza - *Thinopyrum intermedium* - Forage yield - Feed value – NIRS

## **Liste des abréviations**

ADF : *Acid Detergent Fiber*

ADL : *Acid Detergent Lignin*

CB : Cellulose Brute

DMO : Digestibilité de la Matière Organique

DVE : *Darm Verteerbaar Eiwit*

MAT : Matières Azotées Totales

MSa : Matière Sèche analytique

NDF : *Neutral Detergent Fiber*

OEB : *Onbestendige Eiwit Balans*

RPD : *Ratio of Performance to Deviation*

SD : *Standard Deviation*

SEC : *Standard Error of Calibration*

SECV : *Standard Error of Cross-Validation*

SEP : *Standard Error of Prediction*

SPIR : Spectrométrie Proche Infrarouge

VEM : *VoederEenheid Melk*

VEVI : *VoederEenheid Vleesvee Intensief*

## **Table des matières**

Mise en contexte.....	1
1. Introduction.....	3
2. Matériels et méthodes .....	10
2.1. Essai expérimental.....	10
2.2. Prélèvements de biomasse aérienne .....	11
2.3. Analyses chimiques .....	12
2.3.1. Mouture des échantillons .....	12
2.3.2. Matière sèche analytique .....	12
2.3.3. Teneur en cendres totales .....	12
2.3.4. Matières azotées totales.....	13
2.3.5. Dosage des constituants pariétaux.....	13
2.3.5.1. NDF.....	14
2.3.5.2. ADF.....	14
2.3.5.3. ADL .....	15
2.3.5.4. CB .....	15
2.3.6. DMO.....	15
2.4. Calcul des valeurs énergétiques et protéiques .....	16
2.5. Spectrométrie proche infrarouge .....	16
2.6. Traitement statistique des données .....	18
3. Résultats.....	19
3.1. Caractérisation de la biomasse aérienne .....	19
3.1.1. Biomasse aérienne totale .....	19
3.1.2. Répartition des différents organes aériens .....	21
3.1.2.1. Proportion de feuilles .....	21
3.1.2.2. Proportion de tiges .....	23
3.1.2.3. Proportion d'épis.....	24
3.2. Caractérisation de la valeur alimentaire .....	25
3.2.1. Teneur en matière sèche réelle .....	25
3.2.2. Constituants du fourrage .....	26
3.2.2.1. Cendres .....	26
3.2.2.2. MAT.....	27
3.2.2.3. NDF, ADF, ADL, CB .....	28
3.2.3. DMO.....	30



3.2.4. Valeurs énergétiques et protéiques.....	31
3.3. Spectrométrie proche infrarouge – Modèle 1A .....	33
4. Discussion .....	36
4.1. Quantité de fourrage exploitable .....	36
4.2. Répartition des organes aériens .....	38
4.3. Caractérisation de la valeur alimentaire .....	38
4.4. Spectrométrie proche infrarouge .....	41
5. Conclusion et perspectives.....	44
Contribution personnelle de l'étudiante .....	45
Références bibliographiques .....	46
Annexes .....	50

## **Table des figures**

Figure 1 : Agropyre intermédiaire en tant que graminée fourragère .....	4
Figure 2 : Spectres des 120 échantillons utilisés dans les modèle prédictifs 1A et 1B avant les pré-traitements. ....	17
Figure 3 : Spectres des échantillons après les pré-traitements du modèle 1A.....	17
Figure 4 : Poids sec total de biomasse aérienne récoltée en 2020 .....	20
Figure 5 : Fourrage exploitable en double valorisation grains-fourrage .....	21
Figure 6 : Pourcentage de feuilles de l'année 2020 en fonction du stade de développement et de la date de semis .....	22
Figure 7 : Pourcentage de feuilles de l'année 2021 en fonction du stade de développement et de l'interligne .....	22
Figure 8 : Pourcentage de tiges de l'année 2020 en fonction du stade de développement et de la date de semis.....	23
Figure 9 : Pourcentage de tiges de l'année 2021 en fonction du stade de développement et de l'interligne .....	24
Figure 10 : Pourcentage d'épis de l'année 2020 en fonction du stade de développement et de la date de semis.....	24
Figure 11 : Evolution des proportions d'organes aériens en fonction du stade de développement au cours de la première année d'exploitation pour la date de semis de mai avec un interligne de 25 cm. .	25
Figure 12 : DMO en fonction du stade et de la date de semis.....	31
Figure 13 : Représentation graphique des résultats de calibration et validation du modèle 1A.....	34
Figure 14 : Longueurs d'onde les plus pertinentes sélectionnées via les $\beta$ -coefficients (Modèle 1A) ..	35

## **Table des tableaux**

Tableau 1 : Rendements de biomasse aérienne de <i>Thinopyrum intermedium</i> à différentes saisons .....	7
Tableau 2 : Valeurs nutritives de <i>Thinopyrum intermedium</i> à différentes saisons.....	9
Tableau 3 : Détails météorologiques des années 2019, 2020 et 2021. ....	10
Tableau 4 : Modalités de l'expérimentation.....	10
Tableau 5 : Dates de prélèvements.....	11
Tableau 6 : Synthèse des différentes ANOVA réalisées pour caractériser la biomasse aérienne .....	19
Tableau 7 : Poids sec total de la fauche d'automne 2019.....	19
Tableau 8 : Poids sec total de biomasse aérienne récoltée en 2021 .....	21
Tableau 9 : Pourcentage d'épis à la floraison 2021. ....	25
Tableau 10 : Teneur en matière sèche de la biomasse aérienne récoltée en fonction des différents stades de développement.....	25
Tableau 11 : Synthèse des différentes ANOVA pour les constituants du fourrage.....	26
Tableau 12 : Teneurs en cendres (% MS) pour l'année 2020 par date de semis.....	27
Tableau 13 : Teneurs en MAT (% MS) pour l'année 2020 par date de semis .....	27
Tableau 14 : Teneurs en MAT (% MS) pour l'année 2021 .....	28
Tableau 15 : Teneurs en fibres (% MS) pour la fauche d'automne 2019 .....	28
Tableau 16 : Teneurs en NDF, ADF et CB (% MS) pour l'année 2020 par date de semis. ....	29
Tableau 17 : Teneurs en ADL pour l'année 2020.....	29
Tableau 18 : Teneurs en NDF, ADF et CB (% MS) pour l'année 2021 .....	30
Tableau 19 : Synthèse des différentes ANOVA réalisées pour caractériser la DMO des années 2020 et 2021 .....	30
Tableau 20 : DMO (%MS) pour l'année 2021 .....	31
Tableau 21 : Valeurs énergétiques et protéiques de la fauche d'automne 2019. ....	31
Tableau 22 : Synthèse des différentes ANOVA réalisées pour caractériser les valeurs énergétiques et protéiques des années 2020 et 2021 .....	32
Tableau 23 : Valeurs énergétiques et protéiques de l'année 2020 .....	32
Tableau 24 : Valeurs énergétiques et protéiques de l'année 2021 .....	33
Tableau 25 : Critères permettant d'estimer la qualité du modèle prédictif 1A.....	33

## **Table des annexes**

Annexe 1 : Plan du champ d'essai avec les différentes parcelles.....	50
Annexe 2 : Opérations culturales réalisées sur le champ d'essai de 2019 à 2021 .....	50
Annexe 3 : Echelle BBCH améliorée des stades phénologiques des céréales. ....	51
Annexe 4 : Equations permettant de prédire les valeurs énergétiques et protéiques du Kernza dans le système belgo-hollandais .....	52
Annexe 5 : Équations des critères permettant d'évaluer la qualité d'un modèle prédictif .....	53
Annexe 6 : Pourcentage de feuilles durant l'année 2020 .....	53
Annexe 7 : Pourcentage de tiges durant l'année 2020. ....	54
Annexe 8 : Teneurs en cendres pour l'année 2021.....	54
Annexe 9 : Teneurs en NDF, ADF, CB pour l'année 2020 .....	55
Annexe 10 : Teneurs en ADL pour l'année 2021.....	56
Annexe 11 : Critères permettant d'estimer la qualité du modèle prédictif 1B.....	57
Annexe 12 : Critères permettant d'estimer la qualité du modèle prédictif Requasud.....	57
Annexe 13 : Représentation graphique de la calibration et validation du modèle 1B.....	58
Annexe 14 : Régions d'absorption des différentes liaisons chimiques en relation avec les longueurs d'onde du proche infrarouge .....	59

## **Mise en contexte**

Dans le monde, les céréales constituent une ressource alimentaire primordiale tant pour la consommation humaine qu'animale. Selon la FAO (2021), le monde est parvenu à accroître sa production de céréales d'environ un milliard de tonnes depuis 1960 afin de satisfaire la demande toujours croissante en raison de l'augmentation de la population mondiale. Lorsque les céréales sont évoquées, il s'agit principalement de céréales annuelles qui couvrent 70% de la surface agricole cultivée dans le monde (DeHaan *et al.*, 2017). En Belgique, la céréale la plus cultivée est le froment d'hiver qui représente 27% de la superficie agricole cultivée avec 189 699 ha implantés en 2020 (STATBEL, 2021).

Cependant, depuis quelques décennies, le changement climatique est au cœur des débats de notre société. L'agriculture, étant un enjeu majeur, n'y échappe pas et la dominance des cultures annuelles dans le monde est ciblée par certains comme un des problèmes prédominants de notre production primaire (Lanker *et al.*, 2020). Les cultures pérennes sont alors perçues comme une des solutions pour produire des ressources alimentaires pour l'Homme et le bétail tout en fournissant des services écosystémiques importants.

Pour ce qui est des cultures céréalières pérennes, implantées pour quelques années, elles sont très minoritaires dans le monde et toujours à l'état de recherche. En Europe et notamment en Belgique, des essais sont menés sur le sujet mais les céréales pérennes ne font pas encore partie des paysages agricoles belges. Par contre, quelques 475 463 hectares de prairies permanentes sont présents sur le territoire (STATBEL, 2021). Les avantages de la prairie permanente sont nombreux et peuvent se transposer aux cultures pérennes. En effet, les espèces pérennes permettent entre autres de limiter l'érosion des sols, séquestrer du carbone dans les sols, réduire le lessivage des nitrates et ainsi améliorer la qualité de l'eau. Aussi, par rapport à une céréale annuelle, une céréale pérenne permettra de réduire les coûts économiques et environnementaux liés à l'implantation et à l'utilisation de certains intrants (DeHaan *et al.*, 2017; Lanker *et al.*, 2020).

En Amérique du nord, divers organismes de recherche comme l'Université du Minnesota aux États-Unis ou l'Université du Manitoba au Canada travaillent actuellement sur l'agropyre intermédiaire (*Thinopyrum intermedium* subsp. *intermedium*). The Land Institute (TLI) le sélectionne depuis 1990 et lui a donné le nom commercial de Kernza® provenant de la combinaison de « kern », issu de « kernel » et traduit en français par grain, et « za » provenant de « Konza », mot amérindien dont est issu le mot Kansas aux États-Unis (Black, 2016). Cette graminée était autrefois valorisée comme graminée fourragère mais l'intérêt de la développer comme culture céréalière pérenne est grandissant ces dernières années. Sa particularité est de permettre une double valorisation : le grain pour la consommation humaine et le fourrage pour l'alimentation animale. Ceci est un autre avantage majeur de cette culture lorsqu'on sait que la compétition pour l'espace peut se poser entre l'alimentation animale et la consommation humaine. Un des défis pour les années futures sera d'augmenter les rendements en grains des céréales pérennes qui sont bien inférieurs aux rendements des céréales annuelles. La productivité de la culture pourrait aussi être améliorée en exploitant au maximum le fourrage produit. Le Kernza pourrait également être valorisé en fournissant des services écosystémiques

importants. Mais, la sélection, caractérisée par une histoire récente, sera essentielle afin d'adapter le potentiel agronomique de la plante aux besoins des agriculteurs.

Par conséquent, introduire une céréale pérenne dans notre système de production belge pourrait permettre de valoriser des terrains peu propices aux cultures annuelles comme des terrains sensibles à l'érosion. Ceci permettrait de diversifier les rotations et de rendre l'agriculture belge plus résiliente. Pour cela, il est nécessaire d'étudier son développement dans nos écosystèmes. Ce travail se concentrera particulièrement sur l'étude du fourrage fourni par le Kernza afin de caractériser sa valeur alimentaire et de comprendre comment le valoriser de façon optimale dans nos régions.

## **1. Introduction**

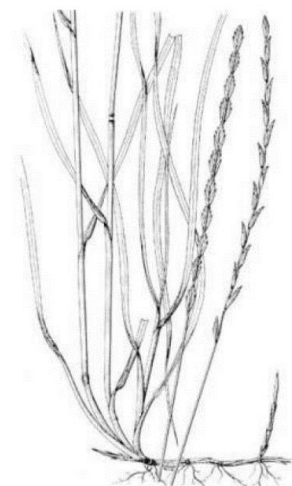
*Thinopyrum intermedium* (Host) Barkworth & D.R. Dewey, commercialisée sous le nom commercial Kernza®, est une graminée pérenne originaire d'Eurasie, aussi appelée agropyre intermédiaire (Ogle *et al.*, 2011). Elle fut importée aux États-Unis en 1932. Depuis quelques années, elle est étudiée en Europe afin d'évaluer son potentiel agronomique dans nos régions. De par sa pérennité, le Kernza présente de nombreux avantages environnementaux grâce à son système racinaire très développé et sa couverture permanente du sol supprimant le travail annuel de ce dernier. Actuellement sélectionnée par The Land Institute (Salina, Kansas, États-Unis) et d'autres institutions comme l'Université du Minnesota et l'Université du Manitoba, cette plante pérenne peut être valorisée selon deux débouchés. D'une part, les grains peuvent être récoltés pour la consommation humaine. D'autre part, du fourrage peut être récolté au printemps et à l'automne pour l'alimentation animale. Cette gestion à deux fins apparaît comme la plus rentable et serait une des voies à privilégier afin d'intégrer le Kernza dans nos écosystèmes agricoles. Cependant, afin d'optimiser la valorisation de ce fourrage, la caractérisation de ses valeurs alimentaires est primordiale.

D'un point de vue botanique, le Kernza est une plante rhizomateuse de la famille des *Poaceae* dont la taille peut atteindre 1,5 m à maturité (Pugliese, 2017). Le Kernza développe également un système racinaire dense et profond, qui peut aller jusqu'à 3m de profondeur (DeHaan *et al.*, 2017). Grâce à ses différentes caractéristiques botaniques et son caractère pérenne, le Kernza remplit de nombreux services écosystémiques. En effet, son système racinaire très développé lui permet notamment de réduire l'érosion du sol. Cela permet aussi une utilisation efficiente des nitrates entraînant la diminution de leur lessivage. Selon Culman *et al.* (2013), le Kernza, dans sa deuxième année d'exploitation, réduit le lessivage des nitrates de 85,8 % et 98,2 % pour une fertilisation respective de 120 et 90 kg N/ha par rapport à une culture de froment. En conséquence, cela limite aussi la contamination des eaux et l'eutrophisation (De Haan *et al.*, 2019). De plus, la séquestration de carbone dans le sol est augmentée grâce à la biomasse racinaire importante du Kernza (DeHaan *et al.*, 2017). En moyenne, de la deuxième jusqu'à la quatrième année d'exploitation, la biomasse racinaire du Kernza est 3 à 12 fois plus élevée que celle du blé (Sprunger *et al.*, 2018). Aussi, la récolte du fourrage semble avoir un effet positif sur la biomasse racinaire. Selon Pugliese *et al.* (2019), à la deuxième année d'exploitation du Kernza, la biomasse racinaire est augmentée de 73% lorsque 2 fauches (été et automne) sont réalisées par rapport à une gestion sans fauche (récolte des grains uniquement, la paille étant laissée au champ en été). Selon une étude de Robertson *et al.*, (2000), les espèces pérennes stockent de l'ordre de 320 à 440 kg par hectare par an de carbone dans les sols tandis que les espèces annuelles en stockent de 0 à 300 kg par hectare et par an. Ensuite, grâce à la pérennité du Kernza, le sol n'est plus travaillé pendant plusieurs années contrairement aux cultures annuelles qui nécessitent un travail du sol chaque année. Ceci permet notamment de réduire les conditions favorables à la germination des adventices annuelles. C'est pourquoi, selon une étude de Zimbric *et al.* (2020), dans la première année d'exploitation d'une culture pérenne, les adventices annuelles sont majoritaires tandis que dans les années suivantes, ce sont les adventices pérennes qui sont les plus abondantes et représentent 96% de la densité totale d'adventices. D'autre part, la biomasse totale d'adventices a tendance à diminuer dans les systèmes de cultures pérennes par rapport aux céréales annuelles. Les récoltes de fourrages

peuvent participer à la réduction de la quantité d'adventices annuelles en fauchant leurs méristèmes apicaux mais a contrario, après la fauche, la compétition pour la lumière sera réduite et d'autres adventices comme le pissenlit pourront se développer (Lanker *et al.*, 2020; Zimbric *et al.*, 2020).

D'un point de vue agronomique, les espèces pérennes sont également intéressantes car elles permettent d'allonger la rotation et d'y ajouter de la diversité (Barriball, 2020). En effet, les cultures pérennes peuvent être insérées dans une rotation qui présente des espèces annuelles. L'intérêt pourrait être de régénérer un sol qui aurait été endommagé par un labour régulier. Planter du Kernza dans la rotation pourra augmenter la porosité du sol et par conséquent améliorer l'infiltration de l'eau ainsi qu'augmenter le taux de matière organique dans le sol. Le Kernza peut également être implanté dans des zones pentues pour les valoriser tout en réduisant l'érosion du sol. En outre, des associations avec des légumineuses peuvent être réalisées. Cela réduit les besoins en azote et aide à stabiliser les rendements. Aussi, insérer une culture pérenne augmente la longueur de la rotation et diminue la pression de certaines maladies (Ryan *et al.*, 2018).

Dans le passé, l'agropyre intermédiaire était uniquement valorisé comme graminée fourragère (Figure 1). Il est rapidement devenu une des graminées majeures dans les pâturages des Grandes Plaines d'Amérique du Nord à des fins de pâturage et de fourrage car il apparaît appétent pour le bétail, surtout au printemps et à l'automne mais il ne convient pas pour du pâturage intensif et continu, ce qui peut s'expliquer par une repousse assez lente, particulièrement dans les régions à faibles précipitations (Moore *et al.*, 1995; Ogle *et al.*, 2011; Favre *et al.*, 2019; Zimbric *et al.*, 2020). Cette graminée fut favorisée dans ces régions car son système racinaire profond lui permet de stabiliser des sols soumis à l'érosion et de tolérer les sécheresses (Ogle *et al.*, 2011).



**Figure 1 :** Agropyre intermédiaire en tant que graminée fourragère (Hitchcock A.S., 1950)

Développée depuis quelques décennies par The Land Institute, sa production de grains est désormais mise en avant ce qui en fait une des premières céréales pérennes commercialisées en Amérique du Nord. Divers marchés peuvent être explorés pour valoriser le grain. D'une part, il peut être utilisé en meunerie pour produire des farines. La farine de Kernza convient pour réaliser des pâtisseries, des biscuits, des pâtes mais elle peut aussi être mélangée avec d'autres farines pour en faire du pain. Cette farine se différencie d'une farine de blé car le grain contient beaucoup de protéines et peu de gluten. D'autre part, le Kernza peut également être valorisé en brasserie. En effet, aux États-Unis, diverses bières à base de Kernza sont déjà commercialisées, dont notamment la « Long Root Pale Ale » (DeHaan *et al.*, 2017). Cependant, le rendement en grains du Kernza demeure inférieur au rendement en grains des céréales annuelles. Dans l'étude de Culman *et al.* (2013) où les rendements du froment ainsi que du Kernza sont étudiés sur un même site, le froment atteint un rendement en grains de 2946 à 5107 kg/ha tandis que celui du Kernza varie de 112 à 1662 kg/ha. En plus d'être relativement faible, le rendement en grains



aurait tendance à diminuer avec les années d'exploitation (Culman *et al.*, 2013; Jungers *et al.*, 2017; Pugliese, 2017; Tautges *et al.*, 2018). Dès lors, implanter du Kernza pour valoriser uniquement le grain représente un risque économique. C'est pourquoi, il est intéressant de valoriser le Kernza via deux débouchés : le fourrage et le grain. Ceci permet d'augmenter la productivité mais également la rentabilité de la culture (Favre *et al.*, 2019). La gestion à double valorisation grains-fourrage permet en moyenne d'augmenter le rendement en grains annuel par rapport à une gestion visée vers le rendement en grains uniquement, de l'ordre de 17% (Pugliese, 2017; Hunter *et al.*, 2020a). Dès lors, le Kernza peut être récolté à trois moments différents. Une première fauche au printemps peut être réalisée afin de récolter du fourrage de bonne qualité, présentant une teneur en MAT élevée. Les grains sont récoltés durant l'été et les résidus de culture peuvent être ramassés à la moisson. Enfin, une deuxième fauche peut être réalisée lors de la repousse d'automne (Favre *et al.*, 2019; Hunter *et al.*, 2020b). Ceci varie cependant en fonction des zones géographiques dans lesquelles le Kernza est implanté, la fauche de printemps étant plutôt conseillée dans les régions où les précipitations sont suffisantes (Barriball, 2020). Dans nos régions, une fauche au printemps pourrait être déconseillée car elle aurait tendance à retarder la maturité des grains. En Australie, une étude a mis en évidence un retard à la floraison pour des parcelles fauchées au printemps par rapport à des parcelles non fauchées (Newell *et al.*, 2021). Aussi, selon l'analyse économique de Hunter *et al.*, (2020b), la meilleure stratégie serait de ne réaliser que la fauche d'automne en complément de la récolte de grains, la fauche de printemps étant plus risquée en termes d'accès à la terre et de dommages à la culture par rapport au peu de bénéfices apportés. Enfin, une autre gestion de la culture pourrait être mise en place. En effet, selon Jungers *et al.* (2017), le rendement en grains de la culture a tendance à diminuer au fur et à mesure des années, de l'ordre de 78% entre la première et la troisième année de récolte. Il pourrait donc être opportun de se concentrer sur la récolte des grains dans les premières années de la culture et ensuite se focaliser sur la récolte du fourrage dans les années suivantes.

Afin de développer la filière fourragère du Kernza, il est nécessaire de caractériser le potentiel fourrager de la plante. Pour ce faire, il faut explorer deux voies : la quantité mais également la qualité du fourrage et ce sur plusieurs années de production en raison de la pérennité de la plante. Tout d'abord, pour caractériser la quantité de fourrage produite, il faut s'intéresser à la croissance et au développement du Kernza. L'agropyre intermédiaire peut s'implanter à différents moments de l'année. Il peut être implanté au printemps ou en fin d'été, ceci dépend de la rotation dans laquelle le Kernza est introduit. Par contre, une implantation à l'automne est déconseillée, le développement de la culture n'étant pas optimal avec des semis tardifs selon des témoignages d'agriculteurs américains (Lanker *et al.*, 2020). Après le semis vient la phase d'implantation. La plante doit investir dans son système racinaire durant la première année et plus particulièrement durant l'automne qui suit le semis (Barriball, 2020). C'est ce système racinaire suffisamment développé qui permettra au Kernza de repousser après les différentes fauches (DeHaan *et al.*, 2017). Au printemps qui suit l'année d'implantation, le Kernza entre dans sa phase de croissance végétative. La biomasse aérienne augmente drastiquement et ce grâce à la prolifération des feuilles et des tiges jusqu'au redressement où la fraction de feuilles est nettement supérieure à celle des tiges, respectivement de 88% et 12% dans la première année d'exploitation (Barriball, 2020). C'est à ce stade que la fauche de printemps peut être réalisée dans une gestion à double finalité. Il faudra veiller à faucher au-dessus du méristème apical, à environ 5 à 7,5 cm au-dessus du sol, afin de ne pas nuire au rendement en grains qui suivra

(Barriball, 2020). Après ce stade de croissance, la proportion de tiges augmente au détriment des feuilles (Jungers *et al.*, 2018; Barriball, 2020) et la biomasse aérienne totale augmente également. Ensuite, la phase reproductive a lieu, les épis se développent, les grains se forment et se remplissent. Après la récolte des grains et des pailles qui a généralement lieu en août, la plante redémarre une croissance végétative et c'est à l'automne que l'on peut alors récolter de la biomasse aérienne qui peut être exploitée comme fourrage (Pugliese, 2017 ; Lanker *et al.*, 2020). Diverses études concernant le rendement fourrager du Kernza ont été réalisées, principalement en Amérique du Nord, leurs observations sont synthétisées dans le Tableau 1. Le rendement fourrager se révèle assez variable en fonction des régions et des stades récoltés. En général, la biomasse récoltée en été représente la proportion la plus élevée de la biomasse annuelle totale (Favre *et al.*, 2019). Selon une étude de Barriball, (2020) comparant différents interlignes, ceux-ci ont peu d'effets sur la quantité de biomasse aérienne. Au printemps, une parcelle présentant un interligne plus faible aura un rendement fourrager supérieur mais cette tendance s'efface dès la première récolte d'été. Cependant, dans une autre étude de Hunter *et al.* (2020b), les effets de l'interligne sont très bien marqués durant les 2 premières années de culture, un interligne de 15 cm produisant un rendement de 11,7 à 14,4 T/ha de biomasse aérienne totale sur une année tandis que pour un interligne de 61 cm, les rendements sont de 6,6 à 10,1 T/ha. Dans la troisième année d'exploitation, la tendance s'inverse, l'interligne de 61 cm présente un rendement supérieur de 25% par rapport à l'interligne de 15 cm. Il faut toutefois nuancer ces observations en sachant que la densité de semis ne fut pas la même pour les différents interlignes. Les effets de l'interligne ont cependant tendance à s'atténuer avec le temps car en raison du tallage de la culture, la densité de plantes s'égalise au cours du temps (Hunter *et al.*, 2020b). Une compétition pourrait également s'installer entre les talles des interlignes les plus étroits.

Pour augmenter les rendements de fourrage, une association avec une légumineuse peut s'avérer utile. Dans l'étude de Favre *et al.*, (2019) dans laquelle une monoculture de Kernza et un mélange Kernza-trèfle violet (*Trifolium pratense*) ont été comparés, il s'avère que la quantité de biomasse aérienne est supérieure pour le mélange. Par exemple, lors de la fauche d'automne, un rendement de 1394 kg/ha a été récolté pour le Kernza seul tandis que pour le mélange, il s'élève à 3035 kg/ha, soit plus du double de rendement (Tableau 1). Le rendement annuel est également augmenté de 39% et ce avec une dose d'engrais azoté réduite de moitié par rapport à la dose apportée au Kernza seul. Cependant, dans l'étude de Barriball (2020), l'association du Kernza avec une luzerne ne semble pas avoir d'effet significatif sur la quantité de biomasse aérienne produite.

**Tableau 1 :** Rendements de biomasse aérienne de *Thinopyrum intermedium* à différentes saisons

<b>Espèce</b>	<b>Biomasse annuelle (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Biomasse printemps (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Biomasse été (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Biomasse automne (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Références</b>
<i>Thinopyrum intermedium</i>	-	1.409	6.141	1.394	(Favre <i>et al.</i> , 2019)
	9.269-11.983	-	-	-	(Jungers <i>et al.</i> , 2017)
	1.800-10.000	-	-	-	(Wang <i>et al.</i> , 2014)
	5.000-5.900	-	-	-	(Lee <i>et al.</i> , 2009)
	-	-	3.500-9.000	-	(Pugliese <i>et al.</i> , 2019)
	-	529-4.519	5.072	437-1.593	(Pugliese, 2017)
	10.000-12.200	1.000-2.400	7.400-10.200	1.100-3.000	(Hunter <i>et al.</i> , 2020b)
<i>Thinopyrum intermedium</i> + <i>Trifolium pratense</i>	-	-	7.422	3.035	(Favre <i>et al.</i> , 2019)

D'autre part, la qualité d'un fourrage s'estime via différents paramètres qui permettent de déterminer la teneur des différents composés du fourrage. Les MAT sont par exemple un paramètre essentiel à l'analyse du fourrage, elles regroupent toutes les molécules azotées dont principalement les protéines. Ces dernières jouent des rôles très diversifiés, elles participent à la construction des tissus, à la régulation hormonale et elles fournissent également de l'énergie par diverses voies de destruction métabolique (Duchenne *et al.*, 2006). Aussi, le NDF et l'ADF permettent d'évaluer le contenu en fibres de l'aliment. Plus ces valeurs sont élevées, moins le fourrage est digestible. La CB et l'ADL sont également des fibres qui influencent négativement la digestibilité du fourrage (Baumont *et al.*, 2009). Ces différents paramètres peuvent soit être estimés par spectrométrie proche infrarouge, soit déterminés par analyses chimiques. Concernant le Kernza, diverses études ont été réalisées afin de caractériser la qualité fourragère de celui-ci, les valeurs nutritives obtenues sont synthétisées dans le Tableau 2. Il en ressort que les différents paramètres varient fortement en fonction du stade de la plante. La qualité nutritive du Kernza est supérieure au printemps et en automne alors qu'elle est plus faible en été ce qui s'explique aisément par la teneur élevée en fibres des résidus de culture. En effet, le NDF est faible au printemps et élevé en été. La fauche d'automne est quant à elle plutôt intermédiaire. Dès lors, bien que les rendements de biomasse aérienne soient les plus élevés en été, la qualité est moindre. Les mêmes tendances que celles du NDF peuvent être tirées pour l'ADF (Favre *et al.*, 2019). La valeur alimentaire des résidus de récolte du Kernza semble être supérieure à la valeur alimentaire d'une paille de blé car les tiges ne sont pas en sénescence complète à la récolte. En effet, selon Favre *et al.* (2019), les résidus du Kernza à la récolte des grains contiennent 30% de protéines en plus et ont une teneur en NDF inférieure de 13% par rapport à la paille de blé. Concernant les protéines brutes, une étude de Zhao *et al.* (2008) a permis de

comparer différentes graminées pérennes ; l'agropyre intermédiaire présente une des teneurs en MAT les plus élevées. Cependant, tout comme les autres paramètres, les teneurs en protéines peuvent être très variables d'une année à l'autre. Ceci peut notamment s'expliquer par la teneur en azote du sol ou des niveaux de fertilisation en azote différents. Selon Barriball (2020), cela peut aussi être dû à une forte croissance racinaire. En effet, la gestion à double débouché peut augmenter la croissance racinaire et nuire quelque peu à la teneur en protéines du fourrage. Selon Pugliese *et al.* (2019), la récolte du fourrage accentue le turn-over des racines et donc la production de biomasse racinaire. Les ressources seraient alors allouées aux racines plutôt qu'à la biomasse aérienne.

Afin d'augmenter la valeur alimentaire du Kernza, il peut être opportun de l'associer avec une légumineuse, comme du trèfle violet (*Trifolium pratense*) par exemple. En effet, selon Favre *et al.* (2019), le mélange aura tendance à diminuer la teneur en NDF du fourrage. L'association permet également d'augmenter considérablement la teneur en protéines du fourrage. À titre d'exemple, toujours selon Favre *et al.* (2019), la teneur en protéines d'un Kernza seul était de 119g/kg MS durant l'automne tandis que pour le Kernza provenant du mélange Kernza-trèfle, elle était de 161 g/kg MS. Ce gain de protéines dans les mélanges graminées-légumineuses s'explique par deux processus principaux, la complémentarité des niches et le phénomène de facilitation décrits par Justes *et al.* (2014) et Suter *et al.* (2015). La complémentarité des niches se produit lorsqu'une espèce parvient à prélever un nutriment non disponible pour l'autre espèce (par exemple la légumineuse capable de fixer l'azote atmosphérique) tandis que le phénomène de facilitation permet l'accroissement de la disponibilité de diverses ressources de façon directe ou indirecte via les communautés microbiennes du sol et notamment des transferts d'azote via les réseaux mycorhiziens des racines d'espèces associées.

Finalement, la caractérisation de la valeur fourragère du Kernza permettra de cibler le bétail adapté à ce fourrage. Selon Favre *et al.* (2019), lorsqu'il est récolté au printemps, il est adapté aux vaches laitières en lactation. Le fourrage d'automne serait plutôt destiné à des vaches allaitantes tandis que les résidus de culture pourraient convenir à des vaches qui ne sont pas en lactation en remplacement de la paille de blé dans certaines rations à haute teneur en amidon.

**Tableau 2** : Valeurs nutritives de *Thinopyrum intermedium* à différentes saisons.

Espèce	Stade	MAT (g kg <sup>-1</sup> MS)	NDF (g kg <sup>-1</sup> MS)	ADF (g kg <sup>-1</sup> MS)	Méthode d'analyse	Références
<i>Thinopyrum intermedium</i>	Printemps	151-215	485-504	299-322	SPIR	(Barriball, 2020)
	Été	56-73	708-828	453-501		
	Printemps	135	590	310	SPIR	(Zhao <i>et al.</i> , 2008)
	Printemps	225	456	249	Chimique	(Favre <i>et al.</i> , 2019)
	Été	51	702	427		
	Automne	119	590	337		
	Printemps	201	413	-	Chimique	(Jensen <i>et al.</i> , 2016)
	Été	100	573	-		
	Automne	164	413	-		
	Printemps	195-288	-	-	SPIR + Chimique	(Hunter <i>et al.</i> , 2020b)
Été	26-48	-	-			
Automne	105-132	-	-			
<i>Thinopyrum intermedium</i> + <i>Trifolium pratense</i>	Été	86	637	412	Chimique	(Favre <i>et al.</i> , 2019)
	Automne	177	443	276		

Pour caractériser la valeur alimentaire des fourrages, la méthode la plus couramment utilisée est la spectrométrie proche infrarouge (SPIR) qui fournit une information spectrale. Combinée à la chimiométrie, une discipline qui combine les mathématiques et les statistiques, elle permet de prédire les valeurs alimentaires sur base des spectres infrarouges. Cette méthode se base sur un étalonnage réalisé à partir d'échantillons analysés chimiquement par les méthodes de référence (Lila *et al.*, 2000). Les avantages majeurs de la spectrométrie proche infrarouge sont, après calibration, sa rapidité et sa simplicité d'exécution (Eylenbosch *et al.*, 2018a; Maxin *et al.*, 2019).

L'objectif de ce travail est de caractériser les performances du Kernza en termes de production fourragère en Belgique et ce de manière dynamique sur la période de croissance. Pour ce faire, 3 objectifs majeurs sont poursuivis. Dans un premier temps, les rendements de biomasse aérienne seront étudiés et la répartition de cette biomasse selon les proportions des différents organes, tiges, feuilles et épis sera caractérisée. Ensuite, le deuxième volet s'intéresse à la caractérisation de la valeur alimentaire du fourrage. La détermination de la valeur alimentaire sera réalisée par analyses chimiques afin d'obtenir des données nécessaires à la calibration du modèle prédictif spécifique au Kernza par spectrométrie proche infrarouge. Le troisième objectif sera donc d'évaluer les performances d'une calibration établie sur base d'une sélection de longueurs d'onde d'intérêt grâce à une régression PLS suivie d'une régression linéaire multiple. Une comparaison sera également faite avec une calibration différente qui consiste en une régression MPLS sur le spectre proche infrarouge.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Essai expérimental

Le champ d'essai est situé à Gembloux (50°33'57.3"N 4°42'18.0"E), dans la région agricole limoneuse de Hesbaye. Le sol est limoneux à drainage naturel favorable (WalOnMap, 2021). Le climat belge est tempéré et se caractérise par une température moyenne annuelle de 10,2°C ainsi que des précipitations de l'ordre de 800 mm par an (IRM, 2021).

Les conditions météorologiques précises des années concernées par cette étude sont indiquées dans le Tableau 3.

**Tableau 3** : Détails météorologiques des années 2019, 2020 et 2021.

	2019		2020		2021	
	Température moyenne journalière (°C)	Total des précipitations (mm)	Température moyenne journalière (°C)	Total des précipitations (mm)	Température moyenne journalière (°C)	Total des précipitations (mm)
Janvier	-	-	5,3	46,3	2,3	126,2
Février	-	-	6,5	131,7	4,4	65,1
Mars	-	-	6,4	71,8	6,4	58,6
Avril	-	-	11,4	20,1	6,1	34,3
Mai	11,2	63,7	12,6	9,7	10,7	72,4
Juin	17,6	77,3	16,5	50,5	17,8	172,8
Juillet	18,3	51,9	17,0	44,5	-	-
Août	18,4	64,0	20,6	44,4	-	-
Septembre	14,6	37,8	15,9	84,1	-	-
Octobre	11,7	105,1	11,2	86,3	-	-
Novembre	6,1	59,5	8,3	25,5	-	-
Décembre	5,5	80,0	5,1	82,2	-	-

Le champ d'essai a été implanté durant l'année 2019 à une densité de semis de 20 kg/ha. Il présente différentes modalités dont l'objectif est d'étudier l'influence de différentes dates de semis et de différents interlignes sur les performances du Kernza en termes de quantité et de qualité de fourrage (Tableau 4). L'essai présente trois dates de semis différentes. Pour la caractérisation de la valeur alimentaire, seules les dates de semis de mai et août seront analysées. La date de semis d'octobre n'a pas été prise en compte car le développement fut peu représentatif d'un développement correct de la plante en première année (faible tallage, développement tardif et faible production).

**Tableau 4** : Modalités de l'expérimentation

Facteur 1 Date de semis	Facteur 2 Interligne	Modalités
Mai (15-05-19)	12,5 cm	1
	25 cm	2
Août (23-08-19)	12,5 cm	3
	25 cm	4
Octobre (03-10-19)	12,5 cm	5
	25 cm	6

Le dispositif expérimental est un split-plot à deux facteurs fixes : la date de semis et l'interligne. Chaque modalité est répétée quatre fois. Ces parcelles sont doublées afin d'avoir une parcelle dédiée aux mesures destructives lors de la saison culturale et une parcelle laissée intacte afin de caractériser le rendement en grains final (Annexe 1). Les différentes opérations culturales sont détaillées en Annexe 2.

## 2.2. Prélèvements de biomasse aérienne

Les prélèvements de biomasse ont été réalisés à différents stades de la culture qui ont été déterminés selon l'échelle BBCH des céréales (Annexe 3). Dès lors, durant 2 ans, des prélèvements ont été réalisés au stade redressement (BBCH 30), dernière feuille (BBCH 39), floraison (BBCH 65), récolte assimilée à la maturité physiologique des grains (BBCH 89) et enfin à la repousse d'automne. Le prélèvement réalisé à l'automne ne correspond donc pas à un stade précis ; il est réalisé lorsque les conditions climatiques le permettent et qu'une biomasse aérienne jugée suffisante est produite. Ce stade est assimilé à un stade végétatif. Les dates précises des prélèvements sont reprises dans le Tableau 5.

La biomasse aérienne est récoltée en fauchant un quadra de 50 cm x 50 cm à environ 5 cm au-dessus du sol. Les tiges et les feuilles sont ensuite séparées. Pour les stades floraison et récolte, les épis sont également séparés. Par contre, pour la repousse d'automne, la fauche est effectuée avec une récolteuse d'herbe, la séparation des organes n'est pas réalisée. Par la suite, les échantillons sont pesés séparément (poids frais) et enfin mis à l'étuve durant minimum 72h à 60°C. Ils sont à nouveau pesés à la sortie de l'étuve (poids sec). Dès lors, la matière sèche peut être calculée à partir des poids frais et secs.

**Tableau 5** : Dates de prélèvements

Stade de développement	Modalité de semis	2019	2020	2021
<i>Redressement</i>	Mai		7 avril	
	Août	-	25 avril	27 avril
	Octobre		20 mai	
<i>Dernière feuille</i>	Mai		28 mai	
	Août	-	28 mai	7 juin
	Octobre		6 juin	
<i>Floraison</i>	Mai		25 juin	
	Août	-	25 juin	5 juillet
	Octobre		13 juillet	
<i>Récolte</i>	Mai		6 août	
	Août	-	10 août	-
	Octobre		22 septembre	
<i>Repousse automne</i>	Mai	6 novembre	18 novembre	
	Août	-	18 novembre	-
	Octobre	-	18 novembre	

## 2.3. Analyses chimiques

Au total, 120 échantillons ont été analysés. Deux dates de semis (mai et août) ainsi que les deux interlignes ont été considérés et ce pour les 4 répétitions de parcelles. Tous les échantillons récoltés aux différents stades de développement ont été analysés à l'exception des échantillons de la floraison 2021. Pour l'analyse de DMO, les deux dates de semis ont été analysées mais seul l'interligne de 25 cm a été pris en compte. Aussi, seuls 3 blocs de répétition sur les 4 disponibles ont été analysés. Cela porte le nombre total d'échantillons analysés pour la DMO à 45, cette analyse étant assez chronophage.

### 2.3.1. Mouture des échantillons

Pour réaliser les différentes analyses chimiques afin de caractériser la valeur alimentaire, les échantillons ont été préalablement broyés à 1 mm. Pour ce faire, les tiges, feuilles et épis ont été mélangés et ensuite broyés à 1 mm à l'aide d'un appareil de type FOSS Tecator Cyclotec 1093.

### 2.3.2. Matière sèche analytique

Afin de pouvoir exprimer les résultats des analyses en pourcentage de matière sèche, il est nécessaire de connaître la teneur en matière sèche analytique de l'échantillon. Pour ce faire, un creuset préalablement séché à 105°C est pesé. Un échantillon d'environ 3g est ensuite pesé dans le creuset. Le creuset contenant l'échantillon est ensuite séché à l'étuve à 105°C durant 12 à 24 heures (jusqu'à poids constant). Le creuset contenant l'échantillon sec est ensuite pesé. La matière sèche analytique est obtenue via cette formule :

$$\%MSa = \left( \frac{(T+PS)-T}{(T+PF)-T} \right) * 100 \quad (1)$$

Où T= masse du creuset

T+PF = masse du creuset et de l'échantillon « frais » (préalablement séché à l'étuve à 60°C)

T+PS = masse du creuset et de l'échantillon sec

À partir de la matière sèche obtenue à la suite du séchage à l'étuve à 60°C ainsi que de la matière sèche analytique, nous pouvons calculer la teneur en matière sèche réelle du produit qui s'obtient en multipliant la MS (après passage à l'étuve à 60°C) par la MSa et en divisant le tout par 100. Tous les résultats d'analyse seront par conséquent exprimés en % MS réelle.

### 2.3.3. Teneur en cendres totales

La teneur en cendres totales équivaut à la fraction inorganique de l'échantillon qui contient les matières minérales. Pour déterminer cette teneur et afin d'économiser la prise d'échantillon, la teneur en cendres a été réalisée sur le même échantillon que la matière sèche analytique. Le creuset contenant l'échantillon séché est calciné au four à 550°C durant une nuit. Le creuset contenant l'échantillon calciné est ensuite pesé (T+PC). La teneur en cendres totales est dès lors calculée comme suit :

$$\%CT = \left( \frac{(T+PC)-T}{(T+PS)-T} \right) * 100 \quad (2)$$



Où T= masse du creuset

T+PS = masse du creuset et de l'échantillon sec

T + PC : masse du creuset de l'échantillon calciné

#### 2.3.4. Matières azotées totales

Les matières azotées totales regroupent toutes les molécules possédant au moins un atome d'N. Dès lors, dans les matières azotées totales se retrouvent des matières protéiques ainsi que des matières non protéiques. Pour doser la teneur en N, la méthode de Kjeldahl est appliquée. Ensuite, la teneur en MAT est calculée en multipliant la teneur en N par 6,25 en admettant que les MAT sont exclusivement composées de protéines contenant 16% de N. C'est pourquoi les MAT sont aussi appelées protéines brutes.

La méthode de Kjeldahl consiste en une minéralisation avec de l'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> bouillant. Par la suite, le NH<sub>3</sub> résultant des différentes réactions est titré à l'aide d'HCl de normalité connue. Concrètement, 1g d'échantillon est pesé et déposé dans un papier filtre Whatman 2122 (100 x 100, ± 0.4 g) pour former une papillote. La papillote ainsi qu'un catalyseur sont insérés dans un tube Kjeldahl. Ensuite, 12,5 mL d'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ainsi que 5 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sont ajoutés lentement. Les tubes sont déposés pendant 60 minutes sur le bloc de minéralisation (FOSS Tecator Digestion System 20, 1015 Digester) chauffé à 420°C et le chapeau d'aspiration (FOSS Tecator Exhaust System, 1013 Scrubber Unit) est déposé sur les tubes. Lorsque les tubes sont refroidis, 75 mL d'eau distillée sont ajoutés. Par la suite, la solution est distillée et titrée via un appareil semi-automatique, le FOSS Tecator Kjeltac Auto Sampler System, 1035 Analyzer. L'appareil nous indique le volume d'acide nécessaire au titrage et la teneur en N peut alors être calculée via cette formule :

$$\%N = \left( \frac{\text{volume d'acide} \cdot \text{normalité} \cdot 14,01 \cdot 100}{1000 \cdot PE \cdot \frac{MSa}{100}} \right) \quad (3)$$

où PE = masse de l'échantillon

La teneur en MAT en est déduite comme suit :

$$\%MAT = \%N \cdot 6,25 \quad (4)$$

#### 2.3.5. Dosage des constituants pariétaux

Le dosage des constituants pariétaux est important dans le cadre d'une analyse de la valeur alimentaire d'un fourrage. Quatre analyses différentes ont été menées afin d'évaluer leur teneur. Tout d'abord, il y a les teneurs en résidus des parois cellulaires (NDF) qui contiennent de la cellulose, de l'hémicellulose et de lignine. Il y a aussi l'ADF qui rassemble la cellulose et la lignine. Dans l'analyse de l'ADF, l'hémicellulose est solubilisée. Dès lors, pour obtenir la fraction d'hémicellulose, il suffit de soustraire l'ADF du NDF. La lignine (ADL) est aussi un composé important à doser car elle est indigestible. Enfin, la CB est le quatrième constituant qui sera analysé selon Weende (Duchenne *et al.* 2006).

Pour les 4 paramètres, les analyses sont réalisées avec un ANKOM<sup>220</sup> Fiber Analyzer (ANKOM Technology, Macedon, USA). 0,5 g d'échantillon a été pesé dans un sachet (ANKOM F57 Filter Bag, 25 micron porosity) préalablement taré. Les sachets ont ensuite été soudés grâce à un ANKOM heat sealer. Des séries de 26 sachets (24 échantillons et 2 témoins) ont été analysées. Chaque série de sachets est préalablement dégraissée à l'acétone à trois reprises avant chaque analyse. À la fin de chaque analyse, les sachets sont rincés à trois reprises à l'eau distillée chaude et deux fois à l'acétone. Après cela, ils sont placés à l'étuve à 105°C durant une nuit, ils sont ensuite pesés. Enfin, les sachets sont placés dans des creusets préalablement tarés et ils sont mis au four à 600°C pendant une nuit également avant d'être pesés à nouveau. Les explications ci-dessous détaillent les particularités de chaque analyse mais le principe de base reste le même, seules les solutions et durées d'analyse diffèrent.

### 2.3.5.1. NDF

Le NDF a été analysé selon Van Soest *et al.* (1991). Le principe consiste en une solubilisation du contenu cellulaire sous l'action du détergent lauryl sulfate de sodium et des substances pectiques sous l'action d'un agent chélatant. Plus précisément, une première solution est composée à partir de 300g de lauryl sulfate de sodium auxquels sont ajoutés 100 mL d'éther monoéthylique de l'éthylène glycol avec environ 5 L d'eau distillée. Une deuxième solution est préparée avec 68,1 g de di-sodium tétraborate décahydraté ainsi que 186,1 g d'EDTA. Enfin, une troisième solution de 45,6 g de di-sodium hydrogénophosphate anhydre est préparée. Les 3 solutions sont ensuite mélangées dans un ballon de 10 L et portées au trait avec de l'eau distillée. Le pH doit se situer entre 6,9 et 7,1.

Ensuite, les sachets contenant les échantillons ont été placés dans l'ANKOM<sup>220</sup> Fiber Analyzer et environ 1,8 L de solution a été ajoutée ainsi que 4 mL d'alpha-amylase. La solubilisation s'effectue durant 1h15 à 100°C. La suite de la manipulation s'effectue comme expliqué ci-dessus. Le NDF s'obtient via la formule suivante :

$$\%NDF = \left( \frac{P3 - (P1 * C) - (P5 - P4 - (P1 * D))}{PE * \frac{MSa}{100}} \right) * 100 \quad (5)$$

Où :

P1 = masse du sachet

P3 = masse du sachet sec

P4 = masse du creuset sec

P5 = masse du creuset et de l'échantillon calciné

C = facteur de correction tenant compte de la solubilité intrinsèque de la capsule  
= P3/P1 (> 0,9990)

D = facteur de correction tenant compte des cendres provenant de la capsule  
= (P5 - P4)/P1 (< 0,001)

### 2.3.5.2. ADF

L'ADF a été analysé selon Van Soest *et al.* (1991). Le principe est le même que le dosage du NDF expliqué ci-dessus. La solution est cependant différente. Elle est composée de 510,83 g d'H<sub>2</sub>S<sub>0</sub><sub>4</sub> 95-97% ainsi que 200 g de CTAB. La solution est préparée dans un ballon de 10 L et portée au trait avec de l'eau distillée. Les autres étapes sont identiques au dosage du NDF à

l'exception de la durée qui n'est que d'une heure à 100°C. L'ADF s'obtient par la même formule que le NDF :

$$\%ADF = \left( \frac{P3 - (P1 * C) - (P5 - P4 - (P1 * D))}{PE * \frac{MSa}{100}} \right) * 100 \quad (6)$$

### 2.3.5.3. ADL

La lignine est dosée selon Van Soest (1963). Le dosage de l'ADL se réalise sur base du résidu ADF. Lorsque ce dernier est obtenu, les sachets sont imbibés dans de l'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 72% durant 3 heures en prenant soin d'agiter très régulièrement afin que tous les sachets en soient bien imprégnés. Les sachets sont ensuite rincés à l'eau distillée chaude jusqu'à disparition de toute trace acide. Après cela, les sachets sont séchés, calcinés et pesés de manière identique aux manipulations expliquées précédemment. L'ADL est ensuite calculé comme suit :

$$\%ADL = \left( \frac{P3 - (P1 * C) - (P5 - P4 - (P1 * D))}{PE * \frac{MSa}{100}} \right) * 100 \quad (7)$$

Il est toutefois nécessaire de mentionner que l'analyse chimique de l'ADL fut peu répétable. La marge d'erreur fut de l'ordre de 2 à 15% entre les 2 échantillons répétés.

### 2.3.5.4. CB

Pour le dosage de la cellulose brute selon Weende, 2 solutions distinctes sont produites. La première est une solution acide de 5 L contenant 65,10 g d'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 95-97%. La deuxième est une solution basique de 5 L également contenant 62,5 g de KOH. Le dosage de la cellulose est, comme les dosages précédents, réalisé dans un ANKOM<sup>220</sup> Fiber Analyzer. Pendant 30 minutes à 100°C, les sachets sont imbibés dans la solution acide, un rinçage à l'eau distillée chaude est ensuite réalisé. Après cela, l'extraction basique a lieu, les sachets sont alors imbibés pendant 30 minutes à 100°C dans la solution basique. La suite de la manipulation est identique au dosage du NDF et de l'ADF: des rinçages successifs à l'eau distillée chaude, à l'acétone et ensuite le séchage et la calcination des échantillons. La cellulose brute est calculée comme suit :

$$\%CB = \left( \frac{P3 - (P1 * C) - (P5 - P4 - (P1 * D))}{PE * \frac{MSa}{100}} \right) * 100 \quad (8)$$

### 2.3.6. DMO

La digestibilité par voie enzymatique de la matière organique a été analysée selon De Boever *et al.* (1986). Brièvement, cette analyse consiste à hydrolyser les protéines, l'amidon et enfin la cellulose. La procédure utilisée fut similaire à celle décrite dans De Boever *et al.* (1986) à l'exception de la cellulase. La cellulase Sigma-Aldrich C1794 a été utilisée à raison de 0,5519 g dans 1 L de tampon acétate.

La DMO a été calculée comme suit :

$$\%DMO = \left( 1 - \left( \frac{((T+PS) - (T+PC)) * 100}{PE * (MSa - CT)} \right) \right) * 100 \quad (10)$$

où T = masse du creuset

T +PS = masse du creuset et de l'échantillon sec

T+PC = masse du creuset et de l'échantillon calciné

PE = masse de l'échantillon « frais »

MSa = matière sèche analytique de l'échantillon

CT = Teneur en cendres totales de l'échantillon

## 2.4. Calcul des valeurs énergétiques et protéiques

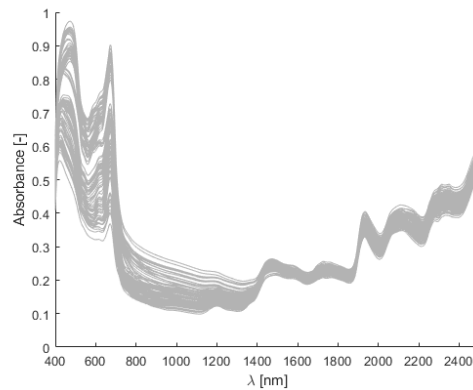
Les valeurs énergétiques et protéiques ont été calculées selon les équations du système belgo-hollandais fournies par le réseau Requasud (Annexe 4). Ainsi, les VEM, VEVI, DVE et OEB ont été calculées à partir des valeurs chimiques obtenues au laboratoire. Il existe des équations pour les herbes et pour les pailles. Toutes les valeurs ont été calculées selon les équations « herbe » sauf les valeurs des stades floraison et maturité physiologique des grains qui ont été calculées à partir des équations « paille ».

## 2.5. Spectrométrie proche infrarouge

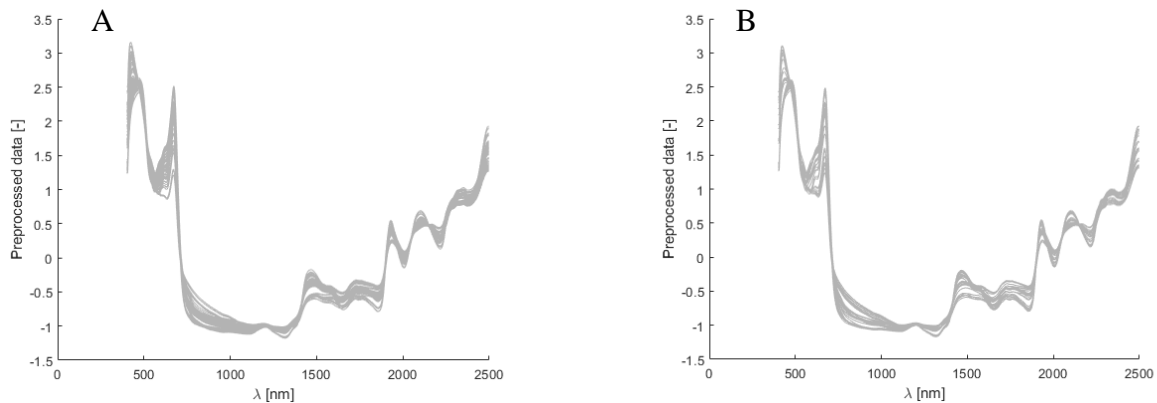
Les différents échantillons récoltés et broyés à 1 mm ont été passés au spectromètre XDS Monochromator Type XM-1000 FOSS. L'absorbance a été mesurée sur le spectre de 400 à 2500 nm avec un intervalle de 2 nm. Pour chaque échantillon, une cellule de mesure a été remplie.

Sur base du spectre obtenu (Figure 2), une calibration a été réalisée afin d'obtenir un modèle capable de prédire les valeurs alimentaires du Kernza. Celle-ci a été effectuée sur le logiciel MatLab R2018a. Tout d'abord, le spectre est soumis à des pré-traitements. Le premier d'entre eux est réalisé en utilisant la fonction SNV (Standard Normal Variate) de Matlab. Celle-ci permet de réduire les effets des interférences liées à la dispersion et à la taille des particules de l'échantillon (Eylenbosch, 2018b). Ensuite la fonction detrend est utilisée pour réduire la courbure et le décalage des spectres (Murphy et al., 2021). Enfin, l'algorithme de Savitzky-Golay est appliqué permettant de lisser la courbe et réduire le bruit de fond (Eylenbosch, 2018b). Les spectres pré-traités sont illustrés à la Figure 3. Ensuite, une régression PLS est réalisée avec une explication de la variance fixée à 90%. Les coefficients standards ( $\beta$ -coefficients) de la régression PLS ont permis d'identifier les longueurs d'onde les plus significatives pour expliquer la variabilité des valeurs chimiques. Ces longueurs d'onde sont ensuite utilisées dans une régression linéaire multiple afin de prédire les différentes valeurs. Pour ce modèle, les 120 échantillons analysés chimiquement ont été inclus et 88 d'entre eux ont été choisis aléatoirement pour calibrer le modèle. Les 32 échantillons restants ont été utilisés pour la validation du modèle. C'est ce qu'on appelle une validation interne, qui consiste à séparer aléatoirement un jeu de données en un set de calibration et un set de validation (Eylenbosch, 2018b). Pour la DMO, seuls 34 échantillons ont été utilisés pour la calibration et 11 pour la validation. Ce modèle sera appelé « modèle 1A » et sera présenté dans la section résultats. Une seconde version de ce modèle a également été étudiée où l'unique changement est la réalisation d'une validation externe à la place d'une validation interne. Dès lors, les 88 échantillons des années 2019 et 2020 ont été inclus dans la calibration tandis que les 32 échantillons de 2021 l'ont été dans le set de validation. Celui-ci sera appelé « modèle 1B ». Ce dernier est réalisé afin de comparer ses performances à celles du modèle Requasud présenté ci-dessous.

**Figure 2 :** Spectres des 120 échantillons utilisés dans les modèle prédictifs 1A et 1B avant les pré-traitements.



**Figure 3 :** Spectres des échantillons après les pré-traitements du modèle 1A. **A.** Spectres pré-traités des échantillons utilisés en calibration 1A. **B.** Spectres pré-traités des échantillons utilisés en validation 1A.



Une autre calibration a en effet été réalisée par le réseau Requasud. Celle-ci a été établie via le logiciel WinISI (FOSS, Denmark). Une régression MPLS (Modified partial least squares) a été effectuée sur base du spectre proche infrarouge. Au préalable, un traitement de spectres SNV et detrend ainsi qu'un travail en dérivée première ont été réalisés. Les 88 échantillons utilisés pour la calibration sont ceux de 2019-2020 tandis que les 32 échantillons de 2021 sont utilisés en validation externe. Une validation croisée fut également réalisée. Ce modèle sera appelé le « modèle Requasud » dans ce travail.

Les résultats des modèles 1B et Requasud seront présentés en annexe et discutés dans la section appropriée.

Pour évaluer la qualité des modèles, 5 critères majeurs sont utilisés : le biais, le R2, le SEC, le SEP et le RPD. Le biais est la différence entre la moyenne des valeurs prédites et la moyenne des valeurs chimiques. Le R2 est le coefficient de détermination entre la variable prédite et la variable chimique. Le SEC est l'erreur standard de calibration. Lorsqu'on réalise la validation du modèle sur un set d'échantillons indépendants, on parle alors de SEP qui est l'erreur standard de prédiction. Il est aussi possible de réaliser une validation croisée qui consiste à successivement diviser le jeu de données global en quatre subdivisions. Trois d'entre elles sont utilisées pour la calibration alors que la quatrième est utilisée pour la validation. Ensuite, une autre subdivision sert à la validation et les 3 autres à la calibration et ainsi de suite jusqu'à ce

que l'entièreté des données disponibles pour la calibration ait été utilisée pour la validation (Murphy et al. 2021 ; Decruyenaere, communication orale). Enfin, le RPD est le rapport entre l'écart-type des valeurs de référence de la base de données (SD) et le SEP (Murphy et al, 2021). Un modèle prédictif est considéré comme bon lorsque le biais est proche de 0, le R2 proche de 1, le SEC le plus petit possible et proche du SEP (ou du SECV dans le cadre d'une validation croisée) et un RPD supérieur à 3 (Minet et al., 2016). Un R2 supérieur à 0,9 résulte d'un bon modèle prédictif. Lorsqu'il est compris entre 0,7 et 0,9, cela signifie qu'il faut ajouter des échantillons au set de calibration ou ajuster certains paramètres (Genot et al., 2014). Les équations permettant de calculer ces critères sont présentées à l'Annexe 5 et ont été obtenues via le réseau Requasud.

## **2.6. Traitement statistique des données**

Les analyses statistiques ont été réalisées sur le logiciel RStudio.

Dans l'analyse statistique, les trois années (2019, 2020 et 2021) ont été considérées individuellement car l'ensemble des stades de développement n'a pas pu être étudié chaque année. Pour tous les paramètres étudiés, une ANOVA à 3 facteurs fixes (stade de développement, interligne et date de semis) et 1 facteur aléatoire (blocs) a été réalisée. Lorsqu'une interaction entre 2 facteurs était mise en évidence, plusieurs ANOVA à 2 facteurs fixes et 1 facteur aléatoire (blocs) ont été effectuées. Aussi, lorsqu'une interaction supplémentaire fut observée, plusieurs ANOVA à 1 facteur fixe et 1 facteur aléatoire ont été réalisées.

Les conditions d'application ont été systématiquement vérifiées, à savoir la normalité des résidus (test de Shapiro-Wilk) ainsi que l'égalité des variances (test de Bartlett).

Lorsque des différences significatives ont été révélées par l'ANOVA, une hiérarchisation des moyennes a été réalisée par le test de Newman et Keuls (test SNK) selon le facteur significatif.

### 3. Résultats

#### 3.1. Caractérisation de la biomasse aérienne

Le Tableau 6 reprend l'ensemble des résultats des ANOVA à 1 ou 3 facteurs fixes et 1 facteur aléatoire réalisées pour caractériser la biomasse aérienne.

**Tableau 6** : Synthèse des différentes ANOVA réalisées pour caractériser la biomasse aérienne. Les \* indiquent les niveaux de significativité. \*\*\* : p-valeur < 0,001, \*\* : p-valeur < 0,01, \* p-valeur < 0,05. Df = Degré de liberté, PS = Poids Sec

Source de variation	2019		2020				2021									
	Df	PS total	Df	PS total	% feuilles	% tiges	Df	% épis	Df	PS total	Df	% feuilles	% tiges	Df	% épis	
Stade de développement (S)	-	-	4	***	3	***	***	1	***	2	***	2	***	***	-	-
Date de semis (D)	-	-	2	***	1		**	1	***	2	*	1			1	
Interligne (I)	1	*	1		1	*	*	1		1	***	1	**	**	1	
Blocs	1		1		1			1		1		1	*		1	
S*D	-	-	8	***	3	***	***	1	*	4		2			-	-
S*I	-	-	4		3			1		2		2	***	**	-	-
D*I	-	-	2		1	*	**	1		2		1			1	
S*D*I	-	-	8		3			1		4		2			-	-

##### 3.1.1. Biomasse aérienne totale

En 2019, une fauche d'automne a été réalisée pour le semis de printemps (mai), un effet significatif de l'interligne a été révélé (Tableau 6). L'interligne de 25 cm est caractérisé par une biomasse aérienne totale supérieure à celle de 12,5 cm (Tableau 7).

**Tableau 7** : Poids sec total de la fauche d'automne 2019. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet de l'interligne.

Interligne	PS total (T/ha)	Groupe
12,5cm	1,53±0,17	b
25cm	2,19±0,23	a

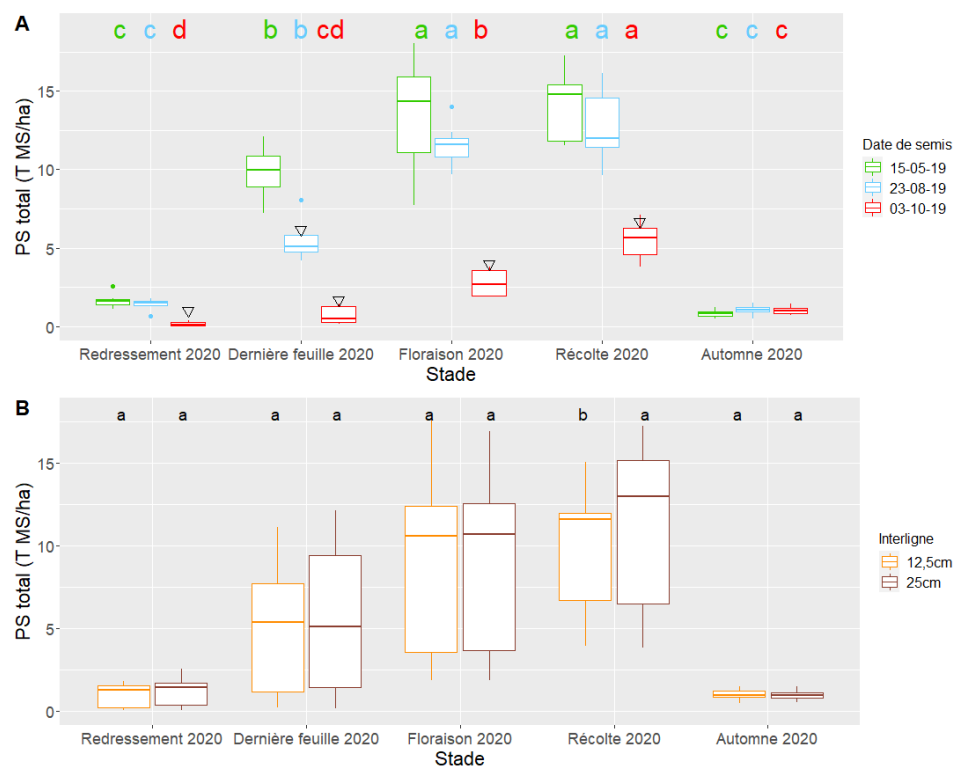
Pour l'année 2020, les effets des 3 facteurs sont significatifs.

Concernant l'effet du stade de développement, le rendement de biomasse aérienne totale est en augmentation tout au long de la saison culturale pour atteindre un pic aux stades floraison et à la maturité physiologique des grains (récolte), en fonction de la date de semis (Figure 4A). Au stade végétatif d'automne, la quantité de biomasse aérienne est du même ordre que celle récoltée au stade redressement, sauf pour le semis d'octobre où la quantité de biomasse aérienne est plus élevée à l'automne qu'au redressement (Figure 4A).

Concernant l'effet de la date de semis, des différences significatives de rendement de biomasse aérienne totale sont observées. En effet, à partir du stade redressement 2020 jusqu'à la récolte des grains 2020, le rendement est systématiquement plus faible pour la modalité d'octobre. Lors du stade dernière feuille 2020, le rendement est intermédiaire pour la modalité d'août par rapport à la modalité de mai et d'octobre (Figure 4A).

Finalement, l'effet de l'interligne est significatif sur la quantité de biomasse aérienne totale à la maturité physiologique des grains où une quantité de biomasse aérienne inférieure est remarquée pour l'interligne de 12,5 cm par rapport à l'interligne 25cm (Figure 4B).

**Figure 4 :** Poids sec total de biomasse aérienne récoltée en 2020. **A.** Effet du stade de développement et de la date de semis. Les lettres illustrent les résultats du test SNK de l'effet du stade de développement tandis que les flèches illustrent les résultats du test SNK de l'effet de la date de semis. Une flèche vers le bas indique une moyenne significativement inférieure. **B.** Effet de l'interligne. Les lettres illustrent le résultat du test SNK de l'effet de l'interligne.



Pour l'année 2021, aucune interaction entre facteurs n'a été mise en évidence (Tableau 6). Les différences entre stade de développement, date de semis et interligne sont indiquées dans le Tableau 8. Le poids sec total est en augmentation tout au long de la saison culturale. Les rendements de biomasse aérienne de la date de semis d'août sont supérieurs par rapport à ceux des deux autres dates de semis. Enfin, la quantité de biomasse récoltée dans les parcelles présentant un interligne de 25 cm est supérieure à celle des parcelles présentant un interligne 12,5 cm.

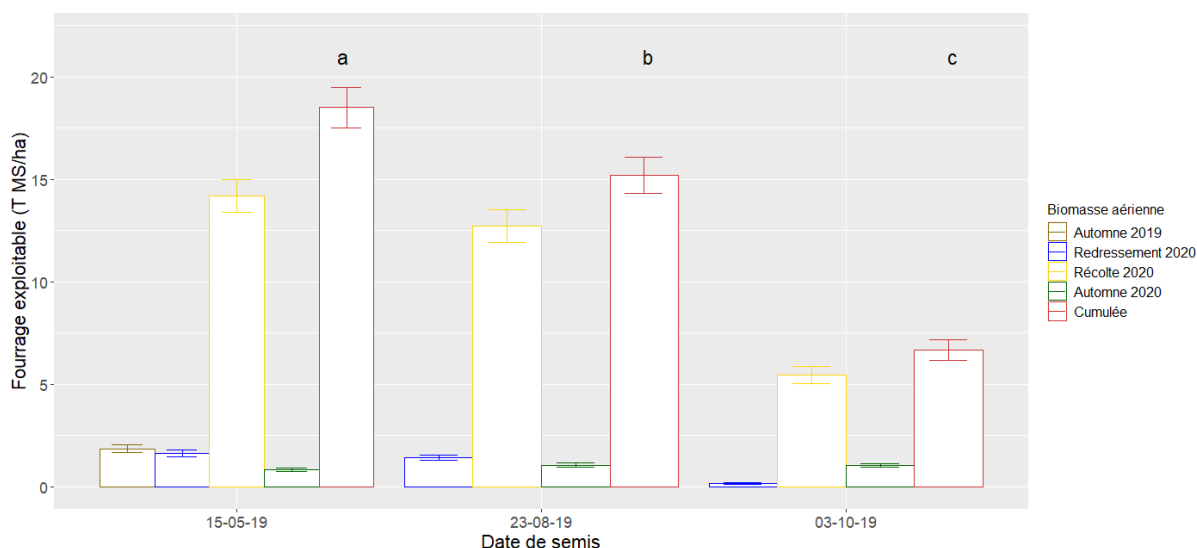


**Tableau 8 :** Poids sec total de biomasse aérienne récoltée en 2021. Les \* représentent les niveaux de significativité des différents facteurs. \*\*\* : p-valeur < 0,001, \*\* : p-valeur < 0,01, \* p-valeur < 0,05. Les lettres représentent les résultats des test SNK de l'effet des facteurs étudiés.

Source de variation	PS ± Ecart-type
<b>Stade de développement</b> ***	
Redressement	2,61±0,13 c
Dernière feuille	7,70±0,51 b
Floraison	12,75±0,63 a
<b>Date de semis</b> *	
15-05-19	7,14±0,87 b
23-08-19	8,57±1,10 a
03-10-19	7,35±0,94 b
<b>Interligne</b> **	
12,5 cm	6,73±0,75 b
25 cm	8,64±0,81 a

La Figure 5 illustre les quantités de biomasse exploitables dans une gestion à double valorisation grains-fourrage (une fauche au redressement, la récolte de paille et une fauche à l'automne) à partir de l'implantation de la culture jusqu'à la fin de la première année d'exploitation (2020). On observe une quantité de biomasse exploitable plus élevée pour la date de semis de mai tandis que la quantité la plus faible est produite par la modalité d'octobre. La modalité d'août est intermédiaire.

**Figure 5 :** Fourrage exploitable en double valorisation grains-fourrage. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet de la date de semis sur la biomasse exploitable cumulée



### 3.1.2. Répartition des différents organes aériens

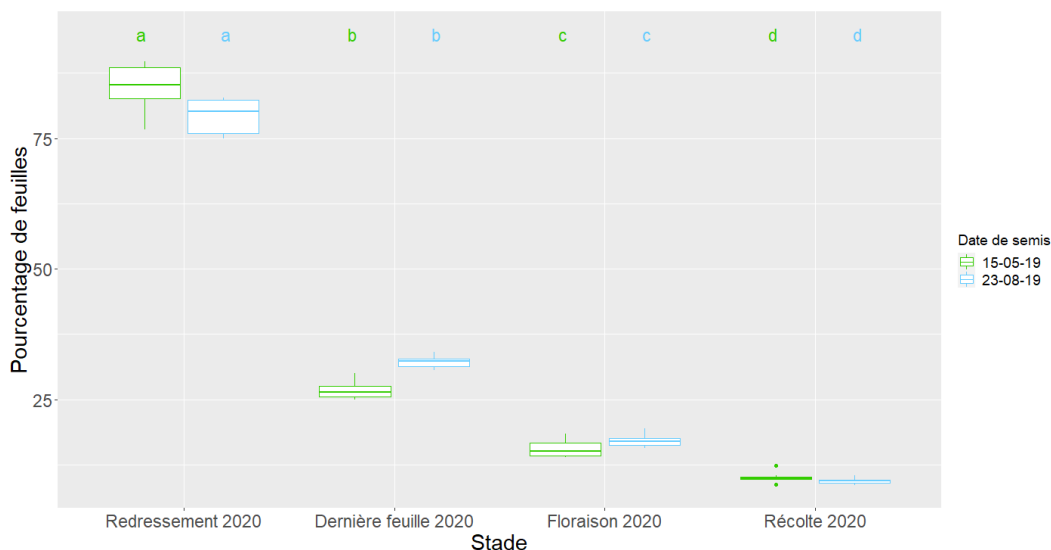
#### 3.1.2.1. Proportion de feuilles

Pour l'année 2020, l'effet du stade de développement est significatif (Tableau 6). Le pourcentage de feuilles est en diminution tout au long de la saison culturale, la tendance étant similaire pour les différentes dates de semis, bien qu'une interaction ait été observée entre le stade de développement et la date de semis (Figure 6).

Concernant la date de semis, un effet significatif se marque au stade redressement et à la dernière feuille. Le pourcentage de feuilles est supérieur pour le semis de mai au stade redressement et pour le semis d'août au stade dernière feuille, bien qu'une interaction ait été observée entre l'interligne et la date de semis pour ce dernier stade. Les résultats complets sont décrits à l'Annexe 6.

Concernant l'interligne, lorsque celui-ci présente un effet significatif, le pourcentage de feuilles est plus élevé avec l'interligne de 12,5 cm (Annexe 6).

**Figure 6** : Pourcentage de feuilles de l'année 2020 en fonction du stade de développement et de la date de semis. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet du stade de développement.



Pour l'année 2021, les effets du stade de développement et de l'interligne sont significatifs (Tableau 6). Le pourcentage de feuilles est également en diminution au cours de la saison culturale, la tendance est identique pour les différents interlignes. Un effet de l'interligne se marque au redressement où le pourcentage de feuilles est moins élevé pour l'interligne de 25 cm (Figure 7). La date de semis n'engendre par contre aucune différence significative.

**Figure 7** : Pourcentage de feuilles de l'année 2021 en fonction du stade de développement et de l'interligne. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet du stade de développement tandis que les flèches représentent les résultats du test SNK de l'effet de l'interligne. Une flèche vers le bas signifie une moyenne significativement inférieure.



### 3.1.2.2. Proportion de tiges

Pour l'année 2020, un effet du stade de développement a été mis en évidence (Tableau 6). Une augmentation importante de la proportion de tiges est observée du stade redressement au stade dernière feuille. Selon la date de semis, cette proportion devient ensuite relativement similaire entre le stade dernière feuille, floraison et maturité des grains (Figure 8).

Concernant l'effet de la date de semis, un effet significatif se marque aux différents stades de développement. Le pourcentage de tiges est supérieur pour le semis d'août au stade redressement et pour le semis de mai aux autres stades de développement. Les résultats complets sont présentés à l'Annexe 7.

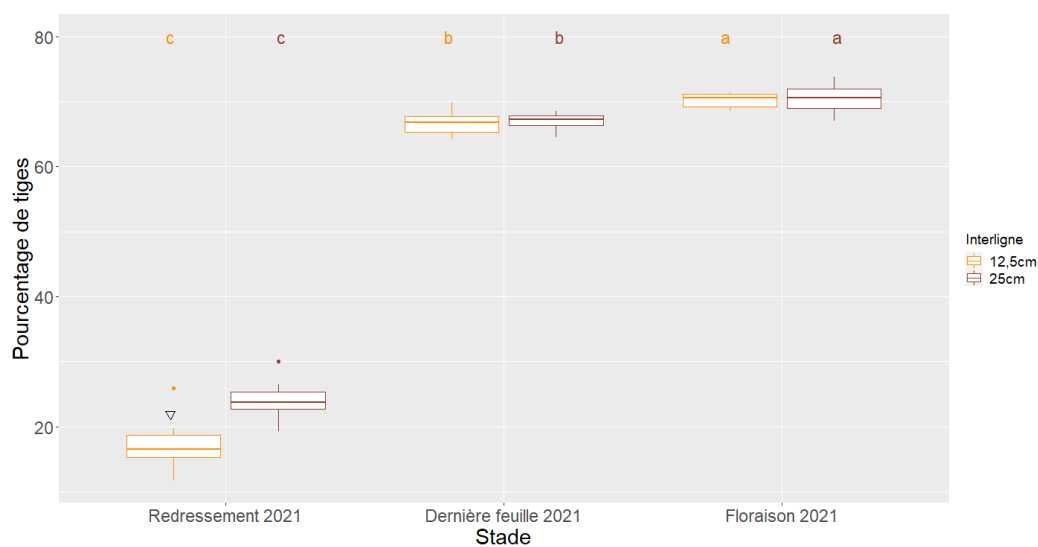
Concernant l'effet de l'interligne, lorsque celui-ci est significatif, le pourcentage de tiges est plus élevé avec l'interligne de 25 cm (Annexe 7).

**Figure 8 :** Pourcentage de tiges de l'année 2020 en fonction du stade de développement et de la date de semis. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet du stade de développement.



Pour l'année 2021, l'effet du stade de développement et l'effet de l'interligne sont significatifs (Tableau 6). Le pourcentage de tiges est en augmentation au cours de la saison culturale pour les différents interlignes. Un effet de l'interligne se marque au redressement où le pourcentage de tiges est plus élevé pour l'interligne de 25 cm (Figure 9). La date de semis n'engendre par contre aucune différence significative.

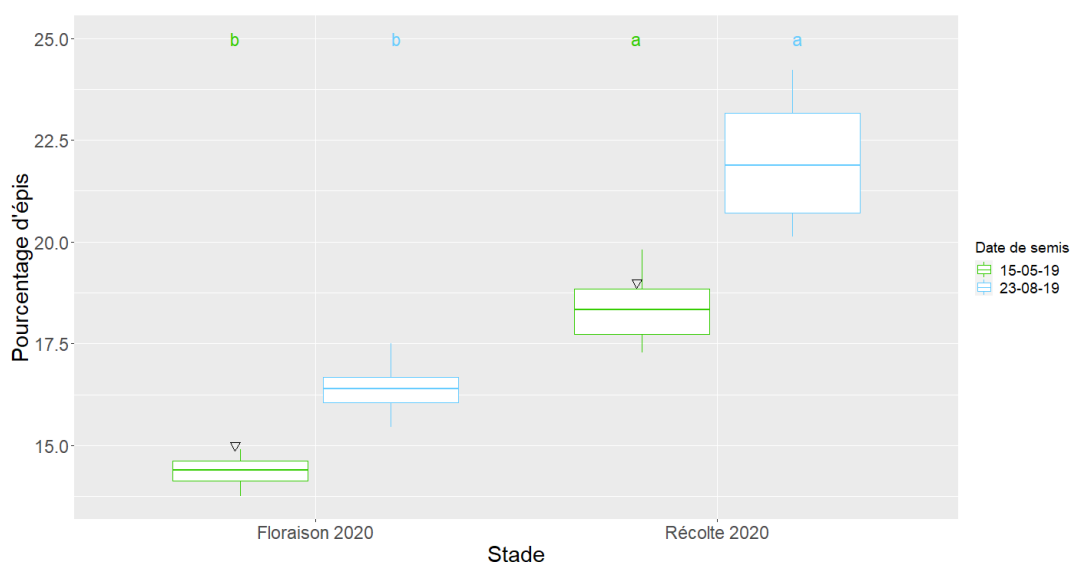
**Figure 9 :** Pourcentage de tiges de l'année 2021 en fonction du stade de développement et de l'interligne. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet du stade de développement tandis que les flèches représentent les résultats du test SNK de l'effet de l'interligne. Une flèche vers le bas signifie une moyenne significativement inférieure.



### 3.1.2.3. Proportion d'épis

Pour l'année 2020, un effet significatif du stade de développement ainsi qu'un effet significatif de la date de semis ont été remarqués (Tableau 6). Pour les différentes dates de semis, le pourcentage d'épis est plus élevé à la récolte des grains. Aussi, le pourcentage d'épis est plus faible pour le semis de mai aux deux stades étudiés (Figure 10). Aucun effet de l'interligne n'a été mis en évidence.

**Figure 10 :** Pourcentage d'épis de l'année 2020 en fonction du stade de développement et de la date de semis. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet du stade de développement. Les flèches illustrent les résultats du test SNK de l'effet de la date de semis. Une flèche vers le bas signifie une moyenne significativement inférieure.



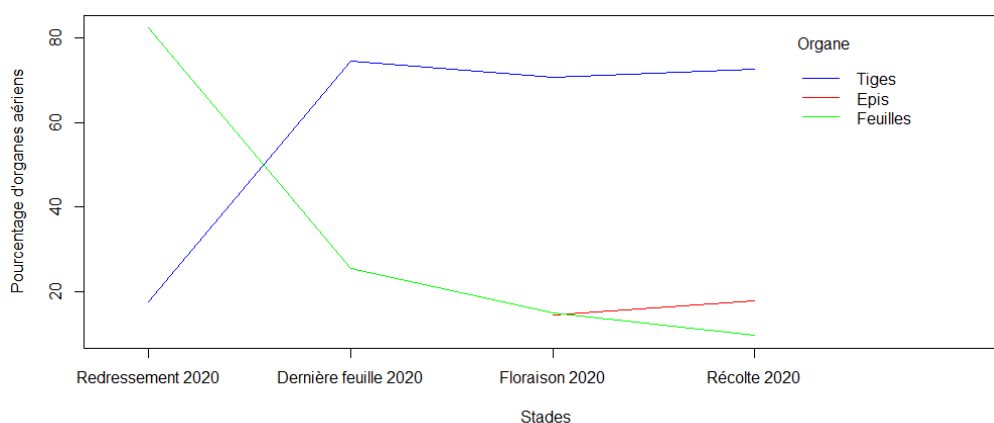
En 2021, seule la proportion d'épis à la floraison a pu être étudiée. Aucun effet significatif de l'interligne ou de la date de semis n'a pu être mis en évidence (Tableau 9).

**Tableau 9 :** Pourcentage d'épis à la floraison 2021.

Source de variation	% épis ± écart-type
Date de semis	
Mai	13,45±0,51
Août	13,53±0,46
Interligne	
12,5	13,99±0,62
25	13,00±0,15

L'évolution des différentes proportions d'organes aériens au cours de la saison culturale 2020 est illustrée à la Figure 11. Cette évolution est présentée pour la date de semis de mai avec un interligne de 25 cm, prise comme référence étant donné les interactions entre les différents facteurs étudiés. Comme observé à la Figure 4, le poids sec total augmente jusqu'à la récolte des grains. La proportion de tiges suit la même tendance.

**Figure 11 :** Evolution des proportions d'organes aériens en fonction du stade de développement au cours de la première année d'exploitation pour la date de semis de mai avec un interligne de 25 cm.



## 3.2. Caractérisation de la valeur alimentaire

### 3.2.1. Teneur en matière sèche réelle

Les teneurs en matière sèche réelle sont reprises dans le Tableau 10. Aucune analyse statistique n'a été réalisée sur ces données. Elles sont présentées à titre indicatif.

**Tableau 10 :** Teneur en matière sèche de la biomasse aérienne récoltée en fonction des différents stades de développement

Stade de développement	Teneur en MS (%)
Automne 2019	21
Redressement 2020	24
Dernière feuille 2020	24
Floraison 2020	43
Récolte 2020	61
Automne 2020	23
Redressement 2021	24
Dernière feuille 2021	19

### 3.2.2. Constituants du fourrage

Le Tableau 11 reprend l'ensemble des résultats des ANOVA à 1 facteur fixe et 1 facteur aléatoire (2019) et 3 facteurs fixes et 1 facteur aléatoire (2020, 2021) réalisées pour caractériser les constituants du fourrage.

**Tableau 11** : Synthèse des différentes ANOVA pour les constituants du fourrage. Les \* indiquent les niveaux de significativité. \*\*\* : p-valeur < 0,001, \*\* : p-valeur < 0,01, \* p-valeur < 0,05. Df = Degré de liberté

2019							
Source de variation	Df	Cendres	MAT	NDF	ADF	ADL	CB
Interligne (I)	1						
Blocs	1		**		*	*	**
2020							
Stade de développement (S)	4	***	***	***	***	***	***
Date de semis (D)	1	***	***		*	**	
Interligne (I)	1						
Blocs	1		*		*	*	*
S*D	4	***	*	***	***		***
S*I	4						
D*I	1			*	*		*
S*D*I	4	*					
2021							
Stade de développement (S)	1	**	***	***	***	***	***
Date de semis (D)	1	**				**	
Interligne (I)	1			**	*		**
Blocs	1		*				
S*D	1	*				*	
S*I	1	*					
D*I	1	*					
S*D*I	1						

#### 3.2.2.1. Cendres

Pour la fauche d'automne 2019, aucun effet de l'interligne n'a été mis en évidence (Tableau 11). La teneur en cendres a donc été moyennée et est de  $9,66 \pm 0,64$  % MS.

En 2020, un effet très hautement significatif du stade de développement a été remarqué. Les teneurs sont maximales à la fauche d'automne tandis qu'elles sont minimales à la maturité physiologique des grains (Tableau 12).

Pour l'effet de la date de semis, lorsque celui-ci est significatif, les teneurs en cendres sont supérieures pour la date de semis de mai (Tableau 12).

**Tableau 12 :** Teneurs en cendres (% MS) pour l'année 2020 par date de semis. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet du stade de développement. Les + illustrent les résultats du test SNK de l'effet de la date de semis par stade. Un + signifie une moyenne significativement supérieure par rapport à l'autre date de semis.

Paramètres	Stade	Date de semis			
		Mai		Août	
Cendres (% MS)	Redressement	9,17±0,17	b +	7,51±0,15	b
	Dernière feuille	6,30±0,10	c +	5,65±0,07	c
	Floraison	4,80±0,05	d	4,68±0,06	d
	Récolte	3,44±0,09	e	3,53±0,12	e
	Automne	11,31±0,32	a +	10,53±0,19	a

Pour l'année 2021, les analyses n'ont pu être réalisées que pour le stade redressement et dernière feuille. Lorsque le stade de développement a un effet significatif, la teneur en cendres est supérieure à la dernière feuille. Ces résultats sont présentés à l'Annexe 8.

Concernant la date de semis, elle induit une différence significative au stade dernière feuille où la teneur en cendres est plus élevée pour la modalité d'août (Annexe 8).

Enfin, lorsque l'interligne présente un effet significatif, c'est l'interligne de 25 cm qui engendre une teneur en cendres plus élevée (Annexe 8).

### 3.2.2.2. MAT

Pour la fauche d'automne 2019, aucun effet de l'interligne n'a été mis en évidence (Tableau 11). La teneur en MAT a donc été moyennée et est de 17,70±1,63 % MS.

En 2020, un effet très hautement significatif du stade de développement a été remarqué. Les teneurs en MAT sont maximales à la fauche d'automne tandis qu'elles sont minimales à la maturité physiologique des grains.

Pour l'effet de la date de semis, lorsque celui-ci est significatif, les teneurs en MAT sont supérieures pour le semis d'août. Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 13.

**Tableau 13 :** Teneurs en MAT (% MS) pour l'année 2020 par date de semis. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet du stade de développement. Les + illustrent les résultats du test SNK de l'effet de la date de semis par stade. Un + signifie une moyenne significativement supérieure par rapport à l'autre date de semis.

Paramètres	Stade	Date de semis			
		Mai		Août	
MAT (% MS)	Redressement	20,24±0,19	b	19,53±0,55	b
	Dernière feuille	10,37±0,19	c	11,27±0,34	c +
	Floraison	6,95±0,20	d	8,41±0,25	d +
	Récolte	4,68±0,17	e	5,95±0,14	e +
	Automne	23,17±0,54	a	24,99±0,68	a +

En 2021, seul un effet très hautement significatif du stade de développement a été mis en évidence (Tableau 11). La teneur en MAT est supérieure au stade redressement (Tableau 14).

**Tableau 14 :** Teneurs en MAT (% MS) pour l'année 2021. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet du stade de développement.

Source de variation		MAT (% MS)	
Stade de développement	Redressement	15,56±0,23	a
	Dernière feuille	10,3±0,18	b

### 3.2.2.3. NDF, ADF, ADL, CB

Concernant la fauche d'automne 2019, aucun effet de l'interligne n'a pu être mis en évidence pour les différents teneurs en fibres (Tableau 11). Les teneurs en fibres sont reprises dans le Tableau 15.

**Tableau 15 :** Teneurs en fibres (% MS) pour la fauche d'automne 2019

Fibres	% MS ± écart-type
<b>NDF</b>	57,88 ± 5,57
<b>ADF</b>	30,92 ± 1,99
<b>ADL</b>	5,19 ± 0,74
<b>CB</b>	28,03 ± 1,40

Pour l'année 2020, en ce qui concerne les teneurs en NDF, ADF et CB, celles-ci ont fait l'objet d'analyses statistiques identiques et les tendances que l'on peut en retirer sont similaires.

Concernant l'effet du stade de développement, les teneurs maximales en fibres sont obtenues à la floraison alors que les teneurs minimales sont obtenues au redressement et/ou au stade végétatif d'automne selon les différentes dates de semis (Tableau 16).

Concernant l'effet de la date de semis, un effet significatif est rencontré au stade dernière feuille où la modalité de mai présente une teneur en fibres plus élevée. À la récolte des grains, la teneur en ADF est aussi plus élevée pour le semis de mai. Aussi, au redressement, une interaction entre la date de semis et l'interligne a été mise en évidence. Les résultats complets sont présentés à l'Annexe 9.



**Tableau 16 :** Teneurs en NDF, ADF et CB (% MS) pour l'année 2020 par date de semis. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet du stade de développement par date de semis.

Paramètres	Stade	Date de semis			
		Mai		Août	
NDF (% MS)	Redressement	44,05±0,58	e	48,05±0,71	d
	Dernière feuille	66,06±0,64	b	63,82±0,46	b
	Floraison	69,49±0,64	a	70,04±0,62	a
	Récolte	61,08±0,95	c	60,06±0,49	c
	Automne	48,62±0,79	d	48,68±1,06	d
ADF (% MS)	Redressement	20,29±0,48	d	22,85±0,38	d
	Dernière feuille	36,93±0,38	b	33,92±0,44	b
	Floraison	41,33±0,56	a	40,50±0,40	a
	Récolte	36,76±0,68	b	34,89±0,39	b
	Automne	25,22±0,49	c	24,65±0,76	c
CB (% MS)	Redressement	18,98±0,43	e	21,99±0,40	c
	Dernière feuille	35,97±0,25	b	33,05±0,38	b
	Floraison	40,36±0,47	a	39,61±0,39	a
	Récolte	34,24±0,63	c	33,28±0,67	b
	Automne	22,84±0,55	d	22,73±0,69	c

Concernant la teneur en ADL en 2020, le stade de développement et la date de semis présentent un effet significatif (Tableau 11). Ces effets sont synthétisés dans le Tableau 17. La teneur maximale en lignine est obtenue à la floraison tandis que la teneur minimale est obtenue au stade redressement. Des teneurs en lignine inférieures sont remarquées pour la date de semis d'août.

**Tableau 17 :** Teneurs en ADL pour l'année 2020. Les lettres représentent les résultats des tests SNK de l'effet des facteurs étudiés.

ADL		
<b>Stade ***</b>		
Redressement	2,39±0,06	e
Dernière feuille	3,64±0,19	d
Floraison	5,79±0,13	a
Récolte	5,36±0,12	b
Automne	4,05±0,18	c
<b>Date de semis **</b>		
Mai	4,46±0,21	a
Août	4,03±0,22	b

Pour l'année 2021, des analyses statistiques similaires ont été réalisées pour les teneurs en NDF, ADF, et CB.

Pour ces paramètres, les stades de développement ont un effet très hautement significatif (Tableau 11). La tendance est à l'augmentation des teneurs au stade dernière feuille (Tableau 18).

L'interligne a également un effet significatif (Tableau 11). Des teneurs en fibres supérieures sont observées pour l'interligne de 25 cm (Tableau 18).

**Tableau 18 :** Teneurs en NDF, ADF et CB (% MS) pour l'année 2021. Les lettres représentent les résultats des tests SNK de l'effet des facteurs étudiés.

Source de variation		NDF (%MS)	ADF (%MS)	CB (%MS)
Stade de développement	Redressement	42,01±0,30 b	21,04±0,20 b	18,98±0,21 b
	Dernière feuille	67,26±0,25 a	38,55±0,29 a	36,02±0,71 a
Interligne (cm)	12,5	54,05±3,29 b	29,37±2,26 b	27,03±2,21 b
	25	55,22±3,24 a	30,21±2,29 a	27,97±2,20 a

Pour les teneurs en ADL de 2021, le stade de développement a un effet très hautement significatif. La teneur en ADL est supérieure au stade dernière feuille.

Concernant, l'effet de la date de semis, lorsque celui-ci est significatif, la teneur en ADL est supérieure pour le semis de mai.

Enfin, lorsque l'interligne a un effet significatif, la teneur en ADL est supérieure pour l'interligne de 25 cm. Ces résultats sont présentés à l'Annexe 10.

### 3.2.3. DMO

Pour la fauche d'automne 2019, aucun facteur de variation n'a été pris en compte puisque seule la date de semis de mai avec l'interligne de 25 cm a été soumise à une analyse de DMO. Pour ce stade, la DMO est en moyenne de 61,90±0,41% MS.

Le Tableau 19 synthétise les ANOVA réalisées pour caractériser la DMO en 2020 et 2021.

**Tableau 19 :** Synthèse des différentes ANOVA réalisées pour caractériser la DMO des années 2020 et 2021. Les \* indiquent les niveaux de significativité. \*\*\* : p-valeur < 0,001, \*\* : p-valeur < 0,01, \* p-valeur < 0,05. Df = Degré de liberté

Source de variation	2020		2021	
	Df	DMO	Df	DMO
Stade de développement (S)	4	***	1	***
Date de semis (D)	1	*	1	
Blocs	1		1	
S*D	4	*	1	

En 2020, le stade de développement et la date de semis ont eu un effet significatif sur la DMO (Tableau 19). Ces effets sont illustrés à la Figure 12.

Concernant le stade de développement, la DMO est minimale à la floraison alors qu'elle est maximale au stade redressement.

Pour la date de semis, seul un effet significatif est mis en évidence au stade dernière feuille où une DMO inférieure est remarquée pour le semis de mai.

**Figure 12 :** DMO en fonction du stade et de la date de semis. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet du stade de développement tandis que les flèches représentent les résultats du test SNK de l'effet de la date de semis. Une flèche vers le bas signifie une moyenne significativement inférieure.



Pour l'année 2021, seul un effet très hautement significatif du stade de développement a été mis en évidence (Tableau 19). Les résultats sont présentés dans le Tableau 20. La DMO est plus élevée au stade redressement.

**Tableau 20 :** DMO (% MS) pour l'année 2021. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet du stade de développement.

DMO (% MS)		
<b>Stade ***</b>		
Redressement	85,52±0,55	a
Dernière feuille	53,81±0,54	b

### 3.2.4. Valeurs énergétiques et protéiques

Pour la fauche d'automne 2019, les résultats des valeurs énergétiques et protéiques sont présentés dans le Tableau 21.

**Tableau 21 :** Valeurs énergétiques et protéiques de la fauche d'automne 2019.

Automne 2019	
VEM (/ kg MS)	812±6
VEVI (/ kg MS)	810±7
DVE (g/kg MS)	77,91±1,91
OEB (g/ kg MS)	46,04±10,12

Les résultats des ANOVA réalisées pour caractériser les valeurs énergétiques et protéiques en 2020 et 2021 sont synthétisés dans le Tableau 22.

**Tableau 22 :** Synthèse des différentes ANOVA réalisées pour caractériser les valeurs énergétiques et protéiques des années 2020 et 2021. Les \* indiquent les niveaux de significativité. \*\*\* : p-valeur < 0,001, \*\* : p-valeur < 0,01, \* : p-valeur < 0,05. Df = Degré de liberté

Source de variation	2020					2021				
	Df	VEM	VEVI	DVE	OEB	Df	VEM	VEVI	DVE	OEB
Stade de développement (S)	4	***	***	***	***	1	***	***	***	**
Date de semis (D)	1	**	*	***		1				
Blocs	1				**	1				*
S*D	4	*	*	*		1				

Pour l'année 2020, les valeurs énergétiques et protéiques sont synthétisées dans le Tableau 23. Globalement, ces valeurs sont minimales à la floraison et à la récolte des grains alors qu'elles sont maximales au redressement et/ou au stade végétatif d'automne selon la date de semis. Concernant l'effet de la date de semis, lorsque des différences significatives sont observées, des teneurs supérieures sont observées pour la date de semis d'août. Pour les valeurs d'OEB, aucun effet de la date de semis n'a été mis en évidence.

**Tableau 23 :** Valeurs énergétiques et protéiques de l'année 2020. Les + illustrent les résultats du test SNK de l'effet de la date de semis par stade de développement. Un + signifie une moyenne significativement supérieure par rapport à l'autre date de semis. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet du stade de développement par date de semis.

2020						
Paramètres	Stades	Date de semis				
		Mai		Août		
VEM (/ kg MS)	Redressement	1015±12	a	1022±14	a	
	Dernière feuille	715±4	c	799±17	c	+
	Floraison	485±3	d	479±1	d	
	Récolte	494±1	d	494±1	d	+
	Automne	912±8	b	954±34	b	
VEVI (/kg MS)	Redressement	1076±15	a	1081±18	a	
	Dernière feuille	681±5	c	788±23	c	+
	Floraison	407±3	d	399±1	d	
	Récolte	419±2	d	419±2	d	
	Automne	942±9	b	991±44	b	
DVE (g/kg MS)	Redressement	100,99±1,48	a	102,57±2,55	a	
	Dernière feuille	51,47±0,45	c	63,68±1,19	b	+
	Floraison	20,73±1,16	d	25,05±0,32	c	+
	Récolte	15,37±0,72	e	15,37±0,72	d	
	Automne	92,87±1,24	b	99,22±4,95	a	
OEB (g/kg MS)	Redressement		32,72±5,55	b		
	Dernière feuille		-16,31±3,92	c		
	Floraison		-20,86±2,43	c		
	Récolte		-42,45±1,18	d		
	Automne		80,38±8,78	a		

En ce qui concerne l'année 2021, les résultats sont synthétisés dans le Tableau 24. Des valeurs inférieures sont systématiquement observées au stade dernière feuille par rapport au stade redressement.

**Tableau 24 :** Valeurs énergétiques et protéiques de l'année 2021. Les lettres illustrent les résultats du test SNK de l'effet du stade de développement.

2021			
Paramètres	Stades		
VEM (/ kg MS)	Redressement	1025±6	a
	Dernière feuille	730±6	b
VEVI (/kg MS)	Redressement	1091±8	a
	Dernière feuille	703±7	b
DVE (g/kg MS)	Redressement	97,46±0,80	a
	Dernière feuille	53,99±1,15	b
OEB (g/kg MS)	Redressement	-2,69±3,64	a
	Dernière feuille	-16,59±3,60	b

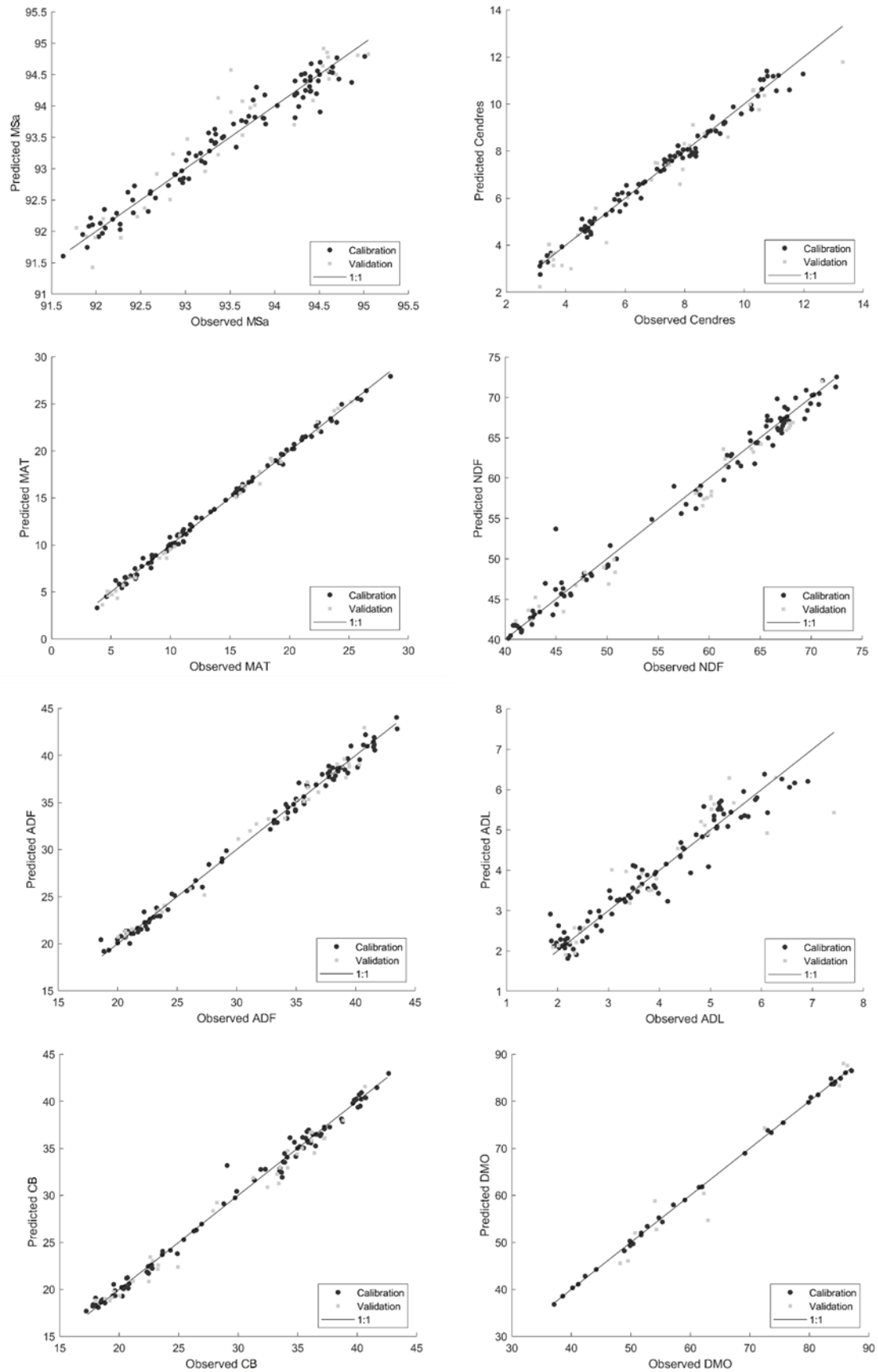
### 3.3. Spectrométrie proche infrarouge – Modèle 1A

Les différents critères qui permettent d'estimer les performances du modèle prédictif 1A sont présentés dans le Tableau 25. Les R<sup>2</sup> de validation sont tous supérieurs à 0,9 et les RPD supérieurs à 3 sauf les R<sup>2</sup> de validation et les RPD de la MSa et de l'ADL. Ces différents résultats seront discutés plus bas. Les résultats de calibration et validation sont représentés à la Figure 13 tandis que les longueurs d'onde sélectionnées via les β-coefficients sont illustrées à la Figure 14.

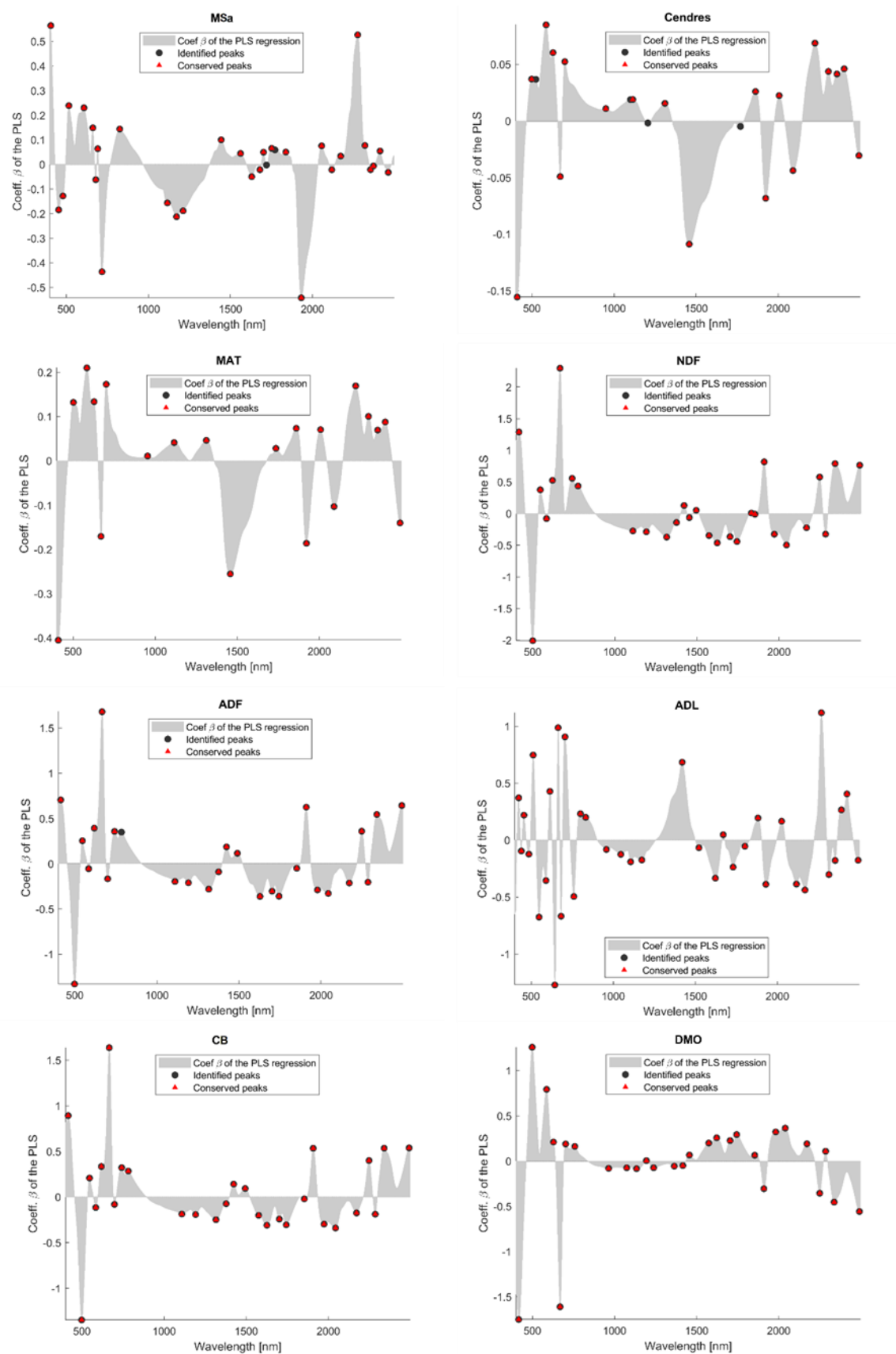
**Tableau 25 :** Critères permettant d'estimer la qualité du modèle prédictif 1A. N = Nombre d'échantillons du set de données. Les moyennes et SD sont issues des références chimiques.

Constituants	Calibration					Validation						
	N	Moyenne (% MS)	SD (% MS)	SEC (% MS)	R <sup>2</sup>	N	Moyenne (% MS)	SD (% MS)	SEP (% MS)	Biais (% MS)	R <sup>2</sup>	RPD (SD/SEP)
MSa	88	93,42	0,92	0,19	0,96	32	93,47	1,02	0,36	-0,05	0,870	2,81
Cendres	88	7,30	2,27	0,30	0,98	32	6,88	2,74	0,60	0,20	0,947	4,57
MAT	88	13,92	6,11	0,40	1,00	32	12,96	6,79	0,49	0,15	0,994	13,84
NDF	88	57,31	10,75	1,47	0,98	32	56,48	9,34	1,42	0,69	0,971	6,57
ADF	88	31,27	7,86	0,67	0,99	32	30,85	7,34	0,85	-0,07	0,986	8,61
ADL	88	3,90	1,38	0,35	0,94	32	3,98	1,42	0,57	-0,06	0,836	2,48
CB	88	29,49	8,00	0,74	0,99	32	29,16	7,25	0,96	0,43	0,979	7,58
DMO	34	62,52	16,66	0,48	1,00	11	64,69	15,21	3,54	0,72	0,943	4,29

**Figure 13 :** Représentation graphique des résultats de calibration et validation du modèle 1A



**Figure 14** : Longueurs d'onde les plus pertinentes sélectionnées via les  $\beta$ -coefficients (Modèle 1A)



## 4. Discussion

### 4.1. Quantité de fourrage exploitable

Les rendements de biomasse aérienne totale obtenus dans cette étude sont en adéquation avec les rendements observés dans d'autres expérimentations réalisées sur le Kernza (Pugliese, 2017 ; Favre *et al.*, 2019; Hunter *et al.*, 2020b). La biomasse totale exploitable dans une gestion en double valorisation grains-fourrage tourne autour de 16,5 T de MS avec 1,5 T de MS au printemps, 14 T de MS à la maturité physiologique des grains et 1 T de MS à l'automne. Dans une gestion uniquement fourragère, il pourrait être envisagé d'exploiter d'autres stades de développement, comme le stade dernière feuille.

La biomasse aérienne totale augmente pendant la saison de croissance printanière. Les quantités de matière sèche les plus élevées sont obtenues à la floraison et à la récolte des grains. Aussi, les rendements obtenus au printemps (stade redressement) ou au stade végétatif à l'automne sont similaires et ce fut également observé dans les études citées précédemment. Pour évaluer la production fourragère d'une culture et plus particulièrement d'une prairie, il est préférable de comparer le rendement annuel en tonnes de matière sèche par hectare (Crémer, 2015). Pour le Kernza, dans une gestion en double valorisation, le fourrage exploitable serait celui récolté au stade redressement, la paille d'été ainsi que la biomasse récoltée à l'automne au stade végétatif, il serait alors d'environ 16,5 T de MS/ha.an si l'on cumule les rendements de ces différents stades de développement (Figure 4A). Ces rendements sont tantôt inférieurs tantôt supérieurs à des rendements annuels de graminées de prairie. Un ray-grass anglais (*Lolium perenne*) fournit en moyenne 12 T de MS/ha.an tandis qu'un ray-grass italien (*Lolium multiflorum*) produit 17,5 T de MS/ha.an et un dactyle (*Dactylis glomerata*) produit 16,3 T de MS/ha .an. Cependant, dans ces rendements ne sont inclus que des quantités de graminées de qualité variable tandis que pour le Kernza, en été, la qualité est inférieure à une graminée de prairie. Si l'on compare maintenant la quantité de biomasse de Kernza récoltée à la moisson à une biomasse d'une céréale annuelle comme le blé tendre à maturité, la biomasse aérienne du Kernza est de l'ordre de 14T de MS/ha (pour le semis de mai) alors que pour du blé, cela s'élève à 16T MS/ha (Shili-Touzi, 2009).

Concernant l'effet de la date de semis, les dates de semis de mai et d'août ont permis d'atteindre des quantités de biomasse aérienne supérieures à celles de la date de semis d'octobre durant la première saison. Ceci s'explique par un semis considéré comme tardif (octobre) qui a induit une mauvaise implantation de la culture. Le tallage des plantes fut très faible et leur développement fut retardé et inférieur par rapport aux plantes des autres dates de semis. Cette observation est en accord avec ce qu'avaient relaté des agriculteurs américains, à savoir qu'un semis précoce favorise le développement de la plante (Lanker *et al.*, 2020). Par contre, si ce n'est une différence au stade dernière feuille, les rendements de biomasse aérienne ont été similaires entre les dates de semis de mai et d'août. Dans une étude de Foster *et al.* (2013), où l'effet de la date de semis du panic érigé (*Panicum virgatum* L.), une graminée pérenne, a été étudié, aucune différence de quantité de biomasse aérienne n'a été constatée entre un semis de septembre et un semis de mai, bien que ce dernier ait été réalisé après le semis de septembre ce qui est opposé à notre étude. Cependant, les conclusions tirées dans cette expérimentation pourraient être transposées à notre étude puisque les auteurs expliquent en partie cette observation par un établissement correct de la culture à ces dates de semis grâce à des conditions



climatiques favorables, ce qui fut le cas du semis de mai et d'août contrairement au semis d'octobre dans notre étude. En 2021, c'est-à-dire en deuxième année d'exploitation, les différentes modalités de dates de semis sont relativement similaires bien que la date de semis d'août présente un rendement moyen de biomasse aérienne légèrement supérieur. La biomasse aérienne de la date de semis d'octobre a donc un niveau de production similaire à celle de la date de semis de mai, contrairement à la première année d'exploitation où le rendement était bien plus faible que celui des autres modalités. La même observation fut réalisée dans l'étude de Foster *et al.* (2013) où une date de semis présentait un déficit de production lors de la première année d'exploitation et celui-ci s'est résorbé au cours des années de production suivantes. Un mauvais démarrage de la culture pénaliserait donc les rendements de la première année de production mais s'effacerait lors des années de production suivantes ce qui pourrait s'expliquer par une « synchronisation » des dates de semis après la première année. Ceci signifierait donc que les différentes modalités de dates de semis redémarrent avec un potentiel de production égal après la première année d'exploitation. Enfin, si l'on cumule la quantité totale de fourrage exploitable à partir du semis jusqu'à la récolte du grain de la première année d'exploitation, la modalité de mai présente des rendements supérieurs, notamment grâce à la fauche d'automne supplémentaire que l'on peut réaliser mais aussi grâce à son rendement globalement plus élevé sur la saison printanière, principalement par rapport à la modalité d'octobre. Il serait intéressant de refaire cette comparaison de biomasse cumulée pour l'ensemble de l'année 2021 puisque les tendances semblent différentes.

Concernant l'effet de l'interligne, durant la première année, son effet n'est pas très marqué, les plantes n'ayant pas profité d'un écartement plus faible en première année pour produire davantage de biomasse aérienne. L'effet de l'interligne est plutôt significatif en deuxième année. Sachant que la densité de semis est identique pour les deux modalités, une hypothèse serait que lors de la première année, une compétition est présente dans l'interligne pour les parcelles semées à 12,5 cm tandis qu'une compétition est présente au sein de la ligne dans les parcelles semées à un écartement de 25 cm. Dès lors, aucune différence majeure ne se marque durant la première année. Par contre, en deuxième année, il semble que l'interligne de 25 cm permet d'obtenir des rendements de biomasse aérienne supérieurs. Selon Deswarte *et al.* (2011), qui ont étudié l'effet de l'espacement entre lignes en froment, ce n'est que tardivement dans l'année que les plantes profitent davantage d'un interligne plus large. Pour le Kernza, ce serait donc en deuxième année d'exploitation que l'espace interligne pourrait être mieux valorisé, les parcelles à écartement large présentant alors un rendement supérieur. Ces observations sont malgré tout opposées aux observations faites par Barriball (2020) qui remarque une différence durant la première année avec l'interligne étroit qui présente une biomasse supérieure alors qu'aucun effet n'est remarqué durant la deuxième année. Les mêmes conclusions que Barriball (2020) ont été tirées par Foster *et al.*, (2013) où l'effet de l'interligne sur le panic érigé (*Panicum virgatum*) a été étudié. Une biomasse supérieure était obtenue pour l'interligne étroit pendant la première année d'exploitation alors qu'aucun effet n'était observé durant les années suivantes. Il est à noter que dans ces études, la densité de semis était la même pour les interlignes étudiés, comme dans la présente étude.

## 4.2. Répartition des organes aériens

Comme observé par Barriball (2020) et Jungers *et al.*, 2018, la proportion des feuilles chute jusqu'à la récolte des grains alors que la proportion de tiges est en augmentation. Au redressement de la première année d'exploitation, le pourcentage de tiges est de 12% dans l'étude de Barriball (2020), ce qui est similaire aux résultats de notre étude. À la récolte des grains de la première année d'exploitation, le pourcentage de tiges est légèrement supérieur dans notre étude par rapport aux résultats obtenus par Barriball (2020) mais la tendance reste la même. Au niveau de la proportion d'épis, les proportions restent les mêmes également.

Par rapport à l'effet de la date de semis, aucune tendance ne peut être tirée pour la proportion de feuilles. L'effet semble négligeable. Par contre, en première année d'exploitation, la modalité de mai semble présenter un pourcentage de tiges supérieur et un pourcentage d'épis inférieur à la modalité d'août. Ceci s'explique par une hauteur de plantes supérieure pour la modalité de mai par rapport à la modalité d'août. Ces observations ont été réalisées dans le cadre de la thèse de Laura Fagnant.

## 4.3. Caractérisation de la valeur alimentaire

La valeur alimentaire du Kernza est très variable selon les stades de développement. Ceci est en adéquation avec les différentes études réalisées précédemment en Amérique du Nord. Globalement, les teneurs en MAT, NDF et ADF qui ont été analysées sont similaires aux études précédentes (Jensen *et al.*, 2016; Favre *et al.*, 2019; Barriball, 2020; Hunter *et al.*, 2020b).

Tout d'abord, il est nécessaire de préciser que toutes les analyses ont été réalisées sur du fourrage non conservé, des étapes de conservation en tant que foin ou ensilage ne sont donc pas prises en compte dans cette étude. Il s'agit de données théoriques pour des fourrages en vert, c'est-à-dire avant conservation. Lorsque les fourrages sont conservés en foin ou en ensilage, ils peuvent perdre en valeur nutritive. Ces pertes dépendent de différents facteurs notamment d'un séchage par temps sec ou par temps de pluie pour un foin. Par rapport à un fourrage en vert, la teneur en VEM d'un foin séché au sol est diminuée de 30 à 35% (fenaison par beau temps) tandis que la teneur en VEM d'un ensilage considéré comme très bien réussi est diminuée de 10 à 15 % (Crémer, 2012). Cependant, ces valeurs sont également théoriques et il est possible de réduire ces pertes de conservation dans les ensilages en utilisant divers conservateurs, notamment des accélérateurs d'acidification (Crémer, 2012 ; Uijtewaal, 2021).

Concernant la teneur en MAT du fourrage et l'effet du stade de développement, on remarque qu'au plus le stade de développement est avancé, au plus la teneur en MAT diminue. De la même façon, nous avons observé qu'au plus le stade de développement était avancé, au plus la proportion de tiges était élevée. Comme le notifient Jungers *et al.* (2018), les tiges présentent une teneur faible en MAT. Dès lors, au stade redressement, la teneur en MAT est plus élevée, tout comme à la fauche d'automne où le Kernza est à un stade végétatif. Ces teneurs en MAT sont similaires par rapport à des teneurs en MAT de graminées de prairie récoltées au même stade. Par exemple, un ray-grass anglais au stade feuillu récolté en vert présente une teneur en MAT de 22,3 % MS, un dactyle de 24,5% MS, du même ordre de grandeur qu'une fétuque des prés (*Festuca pratensis*) et une fléole (*Phleum pratense*) qui présentent respectivement une teneur en MAT de 23,5 % MS et de 20,2 % MS. Au stade dernière feuille, la teneur en MAT est moindre pour le Kernza. En comparaison, un ray-grass anglais une semaine avant l'épiaison présente une teneur en MAT de 15,5 % MS, un dactyle de 19,3% MS alors que la fétuque des

prés et la fléole présentent respectivement une teneur en MAT de 15,8% MS et 9,9% MS. Ce sont des valeurs supérieures aux teneurs du Kernza au stade dernière feuille. Enfin, à la floraison, les teneurs moyennes obtenues pour le ray-grass anglais, le dactyle, la fétuque des prés et la fléole sont respectivement de 9,6 % MS, 9,8 % MS, 11,3 % MS et 7,2 % MS. Ce sont des teneurs également supérieures à celles du Kernza au stade floraison. Pour comparer les teneurs en MAT du Kernza à celles d'une paille de blé, cette dernière contient une teneur en MAT moyenne de 3,5 % MS. Toutes ces données chiffrées sont issues de l'INRA (2018). Au stade floraison, le Kernza présente donc une teneur en MAT comprise entre une paille de blé et une graminée de prairie récoltée en vert au stade floraison. Pour les teneurs en MAT du Kernza obtenues à la maturité physiologique des grains, il est difficile de les comparer puisque des grains sont présents contrairement à de la paille de blé où les grains sont récoltés séparément. Elles sont supérieures aux données de paille mentionnées ci-dessus de par la présence des grains compris dans l'analyse ce qui fait augmenter la teneur en protéines par rapport à une paille de froment. Finalement il est aussi intéressant de remarquer que la teneur en MAT obtenue au stade végétatif d'automne 2020 est supérieure à celle du redressement 2020. C'est une tendance opposée à ce qui a pu être analysé dans les autres études de Jensen *et al.*, 2016, Favre *et al.*, 2019 et Hunter *et al.*, 2020b. Ceci peut s'expliquer par le fait que, dans notre étude, la fertilisation du début de printemps fut réalisée 4 jours avant le prélèvement de biomasse aérienne du semis de mai et 22 jours avant le prélèvement de la biomasse aérienne du semis d'août. À l'automne 2020, la fertilisation fut réalisée à la fin du mois de septembre et les prélèvements ont été réalisés à la mi-novembre, les plantes ont donc pu profiter de l'apport d'azote durant une plus longue durée à l'automne par rapport au redressement. Aussi, dans les études citées précédemment, un prélèvement a été réalisé au stade redressement, mais la fauche d'automne fut réalisée au mois d'octobre, un mois avant la fauche réalisée dans cette étude. L'hypothèse de la fertilisation azotée en automne pour augmenter la teneur en MAT est soutenue par la comparaison entre les trois études. En effet, dans les trois études mentionnées ci-dessus dans lesquelles la fauche d'automne a été réalisée à des moments similaires, seule l'étude de Jensen *et al* (2016) inclut une fertilisation au mois de septembre ce qui se répercute sur une teneur en MAT supérieure à l'automne par rapport aux études de Favre *et al.* (2019) et Hunter *et al.* (2020b) dans lesquelles il n'y a pas eu de fertilisation à l'automne. À titre indicatif, les teneurs en MAT de la fauche d'automne 2019 semblent inférieures à celles obtenues à l'automne 2020. Ceci s'explique par une saison de croissance plus longue pour les plantes fauchées en automne 2019. En effet, leur saison de croissance s'est étalée de mai à début novembre tandis que pour la fauche d'automne 2020, les plantes ont repoussé de début août à mi-novembre. Il en a résulté une montée en épis de certaines tiges en 2019 et par conséquent une proportion de tiges plus élevée. Dès lors, une teneur en MAT plus faible pour l'automne 2019 est observée par rapport à l'automne 2020 où les plantes étaient à un stade végétatif. De plus, en automne 2020, une fertilisation fut réalisée, ce qui ne fut pas le cas de l'automne 2019.

Aussi, la date de semis semble jouer un rôle dans la teneur en MAT, le semis d'août étant plus favorable durant la première année d'exploitation. Ceci peut s'expliquer par la proportion de tiges inférieure que nous avons remarquée pour le semis d'août.

Concernant les teneurs en fibres (NDF, ADF, ADL et CB), toutes suivent la même tendance avec une teneur minimale au redressement et des teneurs maximales à la floraison. La teneur en fibres à la floraison est supérieure à la teneur en fibres à la récolte des grains alors que les proportions de tiges sont similaires. Ceci peut s'expliquer par le fait que les grains ont été analysés avec le reste de la plante à la maturité physiologique des grains. Les grains ne

contenant que peu de fibres par rapport aux tiges, un effet de dilution est présent grâce aux grains. À titre indicatif, un grain de blé ne contient que 2,7 % MS de CB, 14,7% MS de NDF, 3,8 % MS d'ADF et 1,8 % MS d'ADL alors que la paille de blé contient 41,6% MS de CB, 78 % MS de NDF, 50 % MS d'ADF et 7,5 % MS d'ADL (INRAE, sd). La teneur en fibres de la plante entière sera donc inférieure à la teneur en fibres de la paille uniquement.

Ces variabilités dans les teneurs en fibres selon les stades de développement, sont, comme pour la teneur en MAT, en lien étroit avec l'augmentation de la proportion de tiges durant la saison culturale. En effet, comme l'écrivent Jungers *et al.* (2018), les tiges présentent une teneur élevée en NDF. C'est donc l'augmentation de leur proportion qui tend à augmenter les teneurs en fibres du fourrage.

Concernant l'effet de la date de semis, la modalité de mai semble parfois présenter une teneur en fibres plus élevée que la date de semis d'août. Ceci s'explique également par la proportion de tiges supérieure remarquée pour la modalité de mai.

De manière similaire à ce qui a pu être observé pour les teneurs en MAT entre l'automne 2019 et l'automne 2020, il semble que les teneurs en fibres de l'automne 2019 aient été supérieures à celles de l'automne 2020 ce qui confirme la proportion plus élevée de tiges en 2019.

En comparaison avec un ray-grass anglais au stade végétatif récolté en vert, le Kernza présente, au stade redressement, des teneurs en fibres équivalentes, le ray-grass anglais ayant des teneurs en NDF, ADF et CB de respectivement 48,2 % MS, 22,1 % MS et 19,7% MS (INRA, 2018). À l'automne, ces teneurs sont assez similaires également. Par contre, aux autres stades de développement, les teneurs en fibres sont beaucoup plus élevées que pour un ray-grass anglais. Par exemple, à la floraison, les teneurs d'un ray-grass anglais sont de 62,1% MS de NDF, 34,5% MS d'ADF et 31,5% MS de CB (INRA, 2018). Le Kernza, à la dernière feuille et à la floraison, présente des teneurs supérieures à ces dernières. Les teneurs en fibres du Kernza à la floraison sont intermédiaires par rapport à une plante entière de blé récoltée à la floraison et une paille de blé récoltée à maturité physiologique du grain (INRA, 2018).

À propos de la DMO, celle-ci suit la tendance inverse de celle des teneurs en fibres et une tendance presque similaire à la teneur en MAT puisque la DMO en est notamment dépendante. L'analyse chimique résultant notamment d'une attaque à la cellulase, la DMO est fortement liée au contenu en cellulose. C'est pourquoi, la digestibilité est minimale à la floraison lorsque la teneur en fibres est maximale.

Concernant l'effet de la date de semis, seul un effet à la dernière feuille se marque, conséquence d'une proportion de tiges plus élevée pour la modalité de mai. Jungers *et al.* (2018) ont aussi fait remarquer la faible digestibilité des tiges par rapport aux feuilles.

Selon Demarquilly *et al.* (1998), la DMO d'une herbe récoltée en vert est d'environ 82-83% MS en tout début de printemps et de 55% MS à la floraison. La DMO du Kernza est sensiblement la même au stade redressement par rapport aux valeurs citées. Par contre, à la floraison, la DMO du Kernza est inférieure. Aussi, Demarquilly *et al.* (1998) précisent que la DMO des repousses est généralement inférieure à celle du printemps ce qui pourrait expliquer la DMO inférieure observée à l'automne 2020 par rapport à celle du redressement 2020.

Si l'on s'intéresse aux valeurs énergétiques et protéiques aux différents stades de développement, le stade redressement ainsi que la repousse d'automne 2020 permettent d'obtenir des valeurs assez élevées. Une herbe pâturée (de composition floristique inconnue), présente une teneur de 880 à 1025 VEM / kg MS, une teneur de 85 à 111g DVE / kg MS ainsi

qu'une teneur de 31 à 137 g OEB / kg MS (Lessire *et al.*, 2020). Ce sont des caractéristiques que nous retrouvons pour le Kernza au stade redressement ainsi qu'à la repousse d'automne 2020. Ces teneurs sont également proches des valeurs d'herbe pâturée données par Decruyenaere *et al.* (2008). Les teneurs qui qualifient une herbe pâturée de bonne qualité selon Limbourg (1997) cité par Crémer (2015) sont une teneur de 1000 VEM / kg MS, 95 g DVE / kg MS et 60 g OEB / kg MS. Le Kernza, au stade redressement, peut dès lors être qualifié comme herbe de bonne qualité pour ses teneurs en VEM et en DVE. Ce sont des valeurs qui pourraient satisfaire les besoins d'une vache laitière avec une production de 20 kg de lait à 4% de matière grasse dont les besoins au pâturage sont d'au moins 850 VEM / kg MS et 80 g DVE / kg MS (Cuvelier *et al.*, 2015). Le fourrage obtenu à la dernière feuille est par contre inférieur en termes de VEM, DVE et OEB. Celui-ci pourrait convenir à une vache allaitante BBB qui a besoin de 700 à 900 VEM / kg MS et 40 à 70 g DVE / kg MS (Beckers, 2018). Cependant, celles-ci restent des valeurs théoriques et d'autres paramètres du Kernza dont notamment les valeurs d'encombrement devraient être prises en compte pour tirer ce type de conclusion.

À titre de comparaison, la teneur en VEM / kg MS du Kernza au stade redressement et à la repousse d'automne est proche de celles des graminées de prairie au stade feuillu en vert. Un dactyle présente 980 VEM / kg MS, une fétuque des prés et un ray-grass anglais en présentent 1030, une fléole et un ray-grass italien 990. Au stade dernière feuille, le Kernza se rapproche plutôt d'une fétuque élevée (*Festuca arundinacea*) ou d'une fléole au stade début épiaison qui présentent respectivement 760 et 770 VEM / kg MS (Crémer, 2015).

#### **4.4. Spectrométrie proche infrarouge**

Sur base des différents critères permettant d'évaluer la qualité du modèle A, ce modèle peut être qualifié de bon modèle pour la majorité des paramètres à l'exception de la MSa, de l'ADL et de la DMO. Pour la MSa, le SEP est presque deux fois plus élevé que le SEC mais le biais est faible. Le  $R^2$  de validation est inférieur à 0,9 et le RPD est inférieur à 3. Dès lors, le modèle prédictif pour la MSa n'est pas optimal. Dans l'étude de Murphy *et al.* (2021), les RPD obtenus pour la quantification de la matière sèche sont du même ordre de grandeur. Pour les cendres, le SEP est deux fois plus élevé que le SEC et le biais est de 0,2% MS. Le  $R^2$  de validation est par contre supérieur à 0,9 et le RPD supérieur à 3 ce qui en fait un bon modèle prédictif. Pour les MAT et l'ADF, les conclusions sont assez similaires : les SEP et SEC sont proches et le biais est faible. Le  $R^2$  de validation est supérieur à 0,9 avec un RPD supérieur à 3 ; il s'agit donc de très bons modèles prédictifs. Pour le NDF et la CB, les SEP et SEC sont proches mais assez élevés et le biais est plus élevé que pour les autres paramètres. Ceci peut s'expliquer par la présence de certaines valeurs aberrantes (outliers) que l'on peut observer à la Figure 13. Toutefois, le  $R^2$  de validation est supérieur à 0,9 et le RPD supérieur à 3. Pour l'ADL, les SEC et SEP sont proches et le biais est très faible. Cependant, le  $R^2$  de validation est inférieur à 0,9 et le RPD est inférieur à 3. Ceci peut s'expliquer par la difficulté de quantifier l'ADL et ce, même chimiquement, la répétabilité de cette analyse étant faible. Enfin, pour la DMO, le SEP est très élevé et environ sept fois plus élevé que le SEC. Le biais est élevé également. Par contre le  $R^2$  de validation et le RPD sont respectivement supérieurs à 0,9 et 3. Malgré cela, ce modèle est sujet à amélioration pour la DMO. Ceci peut s'expliquer par le faible nombre d'échantillons présents dans le set de calibration par rapport aux autres paramètres. Aussi, la répétabilité de cette analyse chimique fut élevée et il n'est pas possible d'obtenir de meilleurs résultats en spectrométrie proche infrarouge par rapport à ceux que l'on obtient par analyses chimiques

(Minet *et al.*, 2016). Finalement, pour ce modèle 1A, le biais est généralement faible ; ceci s'explique par le lien entre les sets de données de calibration et de validation. Les échantillons étant choisis aléatoirement dans les 120 échantillons à disposition, ils sont indépendants mais toutefois liés entre eux, certains échantillons faisant simplement partie d'un bloc de répétition différent.

Par contre, dans le modèle 1B (Annexe 11) et le modèle Requasud (Annexe 12), les échantillons de validation sont totalement indépendants par rapport aux échantillons de calibration puisqu'il s'agit d'une validation externe. Les résultats de ces 2 modèles sont globalement similaires et satisfaisants dans leur ensemble sur base des critères utilisés pour estimer leur qualité. Cependant, la MSa, les cendres et l'ADL semblent moins bien prédits et ce, dans les 2 modèles.

En effet, si l'on regarde modèle 1B, la MSa, les cendres ainsi que l'ADL apparaissent comme les paramètres les plus hasardeux à prédire. Pour la MSa, le  $R^2$  de validation du modèle 1B est inférieur à 0,9. Le SEP est également environ 2 fois plus élevé que le SEC alors que le RPD est inférieur à 3. En ce qui concerne les cendres et l'ADL, le  $R^2$  de validation est nul et le RPD est très faible, ceci peut s'expliquer par une gamme de variation (SD) très faible du set de validation. On observe très clairement à l'Annexe 13 que les échantillons ne se répartissent pas le long de la bissectrice pour les cendres et l'ADL. Aussi, les SEP sont assez éloignés du SEC pour ces paramètres. Pour la DMO, les conclusions restent les mêmes que pour le modèle 1A, le SEP étant très élevé ainsi que le biais. Le  $R^2$  de validation est inférieur à 0,9 et le RPD est inférieur à 3 ce qui renforce l'idée que ce modèle est sujet à amélioration pour la DMO. Pour les autres paramètres, la qualité du modèle prédictif est assez bonne au vu des valeurs de  $R^2$ , RPD, SEC et SEP bien que le biais de l'ADF soit assez élevé. Globalement, par rapport au modèle 1A, les SEP et les biais de tous les paramètres sont plus élevés pour le modèle 1B, ce qui renforce l'intérêt d'une validation externe pour évaluer un modèle prédictif.

Pour le modèle Requasud, les tendances globales sont les mêmes que pour le modèle 1B si ce n'est que les  $R^2$  de validation sont globalement supérieurs par rapport au modèle 1B. Pour la MSa du modèle Requasud, un biais du même ordre de grandeur que le modèle 1B est présent. Pour les cendres, la qualité du modèle Requasud est quasiment identique à celle du modèle 1B avec un  $R^2$  de validation nul et un SEP élevé. Par contre, au niveau de l'ADL, les performances du modèle Requasud sont légèrement meilleures avec un SEP et un biais inférieurs par rapport à ceux du modèle 1B et un  $R^2$  de validation supérieur à 0,9.

En outre, pour nuancer les résultats obtenus pour les teneurs en cendres, il est important de préciser que la spectrométrie proche infrarouge se base majoritairement sur l'absorption des molécules organiques et plus particulièrement de leurs liaisons C-H, O-H, N-H, C=O (Minet *et al.*, 2016). Andueza *et al.* (2011) renforcent cette idée en mentionnant que les minéraux ne possèdent pas de bandes d'absorption dans le proche infrarouge. Cela pourrait donc expliquer les résultats contrastés que l'on a pu obtenir pour la teneur en cendres. Les SEC et SEP de la teneur en cendres des modèles 1B et Requasud sont similaires à ceux obtenus par Andueza *et al.* (2011).

Globalement, pour comparer les valeurs de SEP obtenues dans les trois modèles prédictifs avec celles qui ont pu être obtenues dans l'étude de Bastianelli *et al.* (2018), celles-ci sont du même ordre de grandeur. Pour le modèle 1A, seul le SEP de la DMO est supérieur à celui de Bastianelli *et al.* (2018). Pour le modèle 1B, les SEP de l'ADL et de la DMO sont supérieurs à ceux de la gamme rapportée par Bastianelli *et al.* (2018). Par contre, pour le modèle Requasud, tous les

SEP sont compris dans la gamme et le SEP du NDF est même inférieur à celles de Bastianelli *et al.* (2018).

Finalement, à propos des longueurs d'onde identifiées par le modèle 1A, celles-ci sont nombreuses mais une tendance se dégage pour certains paramètres. Très clairement, les longueurs d'onde identifiées pour les teneurs en NDF, ADF, ADL et CB sont très similaires. Si l'on se concentre sur le proche infrarouge, il y a d'abord des longueurs d'onde comprises entre 700 et 800 nm et entre 850 et 950 nm qui correspondent aux liaisons C-H des troisièmes harmoniques. Il y a ensuite des longueurs d'onde entre 1100 et 1250 nm ainsi qu'entre 1350 et 1450 nm qui correspondent aux liaisons C-H des deuxièmes harmoniques. Par la suite, des longueurs d'onde situées entre 1650 et 1800 nm ont aussi été mises en évidence et celles-ci correspondent aux liaisons C-H des premiers harmoniques. Enfin, de 2200 à 2500 nm, des liaisons C-H ont également été mises en évidence et celles-ci se situent dans les régions des bandes de combinaison. Concernant les bandes identifiées entre 1800 et 2000 nm, elles correspondent aux liaisons C=O des premiers harmoniques et entre 2000 et 2200 nm il s'agit des liaisons O-H des régions des bandes de combinaison. Les liaisons C-H, C=O et O-H sont des liaisons que nous retrouvons dans les molécules telles que la cellulose, l'hémicellulose et la lignine (Yang *et al.*, 2017). En ce qui concerne la DMO, les longueurs d'onde identifiées sont très similaires à celles identifiées pour les teneurs en fibres. Concernant les teneurs en MAT, nous retrouvons également des longueurs d'onde similaires aux teneurs en NDF, ADF, ADL et CB mais nous observons également des bandes spécifiques aux liaisons N-H telles que celles retrouvées entre 1000 et 1100 nm des deuxièmes harmoniques, entre 1400 et 1550 nm des premiers harmoniques et celles retrouvées entre 2100 et 2300 nm, dans les régions des bandes de combinaison. Finalement, concernant la MSa, certaines longueurs d'onde assimilées à la molécule d'eau peuvent être repérées. Nous observons un pic entre 700 et 800 nm qui correspond à l'H<sub>2</sub>O des troisièmes harmoniques, un pic entre 1400 et 1500 nm qui correspond à l'H<sub>2</sub>O des deuxièmes harmoniques et un autre pic entre 1900 et 2000 nm qui correspond à l'H<sub>2</sub>O des premiers harmoniques ainsi que des pics entre 2200 et 2300 qui correspondent à l'H<sub>2</sub>O des régions des bandes de combinaison. Les différentes régions d'absorption des liaisons chimiques en relation avec les longueurs d'onde ont été obtenues dans l'étude de Genot *et al.* (2014) et sont présentées à l'Annexe 14.

## **5. Conclusion et perspectives**

D'un point de vue production fourragère, le Kernza présente des rendements variés au cours de la saison. Au redressement, les rendements sont faibles tandis qu'à la récolte des grains, les rendements en paille sont plus élevés. À l'automne, les rendements sont du même ordre de grandeur qu'au redressement. En combinant la valorisation du fourrage et des grains, le Kernza pourrait présenter un potentiel intéressant.

Au niveau de la valeur alimentaire du fourrage, le Kernza est intéressant lorsqu'il est exploité à un stade jeune, idéalement au redressement ou lors de la repousse d'automne. Sa paille peut également être valorisée mais celle-ci devrait être analysée seule pour caractériser sa valeur alimentaire sans prendre en compte la valeur des grains.

Cependant, aux stades où la valeur alimentaire est élevée, le rendement en matière sèche est relativement faible. Dès lors, une association avec une légumineuse pourrait être étudiée afin de permettre d'augmenter le rendement de biomasse aérienne tout en augmentant la valeur alimentaire. Dans une optique de valorisation fourragère seule dans les années où le rendement en grains est en diminution, la récolte fourragère du Kernza pourrait être intéressante. Il serait judicieux d'étudier l'évolution de la valeur alimentaire dans des années de production plus lointaines afin de juger de l'intérêt d'une gestion fourragère seule. Il serait alors opportun de réaliser des fauches successives pour simuler une gestion de prairie temporaire et évaluer la quantité et la qualité du fourrage récolté.

Aussi, il est important de noter que la valeur alimentaire fut caractérisée de façon théorique et qu'aucun processus de conservation ou de stockage n'a été expérimenté, ni même un pâturage. Il serait donc utile d'étudier ces différents modes de gestion. Il serait également intéressant d'évaluer la digestibilité de ce fourrage de façon *in vitro* ou *vivo*, en utilisant le liquide ruminal afin d'avoir une valeur plus proche de la réalité. Enfin, un élément à ne pas négliger serait d'étudier l'appétence de ce fourrage, élément essentiel si l'on veut le valoriser dans l'alimentation animale.

Pour ce qui est de la prédiction des valeurs alimentaires par spectrométrie proche infrarouge, les résultats obtenus sont encourageants. Dans le futur, il pourrait être possible de ne passer que par cette méthode qui est plus rapide et moins onéreuse que les analyses chimiques.

Pour conclure, cette étude aura permis de caractériser le fourrage du Kernza d'un point de vue quantité mais également au niveau de la qualité produite. Ceci prouve que la double valorisation grains-fourrage du Kernza est possible, celle-ci devra être réfléchi en fonction des objectifs de l'exploitation. Le Kernza, intégré dans une rotation, permet de remplir de nombreux services écosystémiques, tout en fournissant des grains pour la consommation humaine et de la biomasse exploitable pour l'alimentation animale ce qui peut s'avérer très intéressant pour les exploitations mixtes.



## **Contribution personnelle de l'étudiante**

Puisque la caractérisation de la valeur alimentaire du Kernza en Europe est peu étudiée à l'heure actuelle, ce travail a pour but de donner des premières indications concernant cette thématique. Cette étude s'est greffée sur un essai déjà mis en place en 2019 sur lequel différents prélèvements de biomasse aérienne furent déjà réalisés en 2019 et 2020. Dans la continuité de cela, j'ai participé à la récolte de la biomasse aérienne pour l'année 2021. Ensuite, pour caractériser la valeur alimentaire du fourrage, j'ai mené à bien les diverses analyses de laboratoire et ce pour l'ensemble des échantillons récoltés en 2019, 2020 et 2021. Enfin, concernant la spectrométrie proche infrarouge, j'ai collaboré avec le CRA-W pour calibrer un modèle spécifique au Kernza et j'ai utilisé une calibration déjà existante au sein de l'Unité de phytotechnie pour interpréter et comparer les résultats découlant de ces modèles prédictifs.

## **Références bibliographiques**

- Andueza D., Picard F., Jestin M., Andrieu J. & Baumont R., 2011. NIRS prediction of the feed value of temperate forages: Efficacy of four calibration strategies. *Animal* 5(7), 1002–1013.
- Barriball S., 2020. Growth, development, and forage quality of Intermediate wheatgrass when grown for Kernza® perennial grain production." . Creative Commons. 628.
- Bastianelli D., Bonnal L., Barre P., Nabeneza S., Salgado P., Andueza D., 2018. La spectrométrie dans le proche infrarouge pour la caractérisation des ressources alimentaires. In : Ressources alimentaires pour les animaux d'élevage. Baumont R. (Ed). Dossier, INRA Prod. Anim., 31, 237-254.
- Baumont R., Aufrere J. & Meschy F., 2009. La valeur alimentaire des fourrages : rôle des pratiques de culture, de récolte et de conservation. *Fourrages* **198**, 153–173.
- Beckers Y., 2018. Quel fourrage pour quelle autonomie alimentaire. Available at : <https://orbi.uliege.be/handle/2268/228994> (Accessed : 2 July 2021).
- Black J., 2016. Kernza: The wheat ecologists dream about. Available at : <https://www.spokesman.com/stories/2016/oct/26/kernza-the-wheat-ecologists-dream-about/> (Accessed : 21 July 2021).
- Crémer S., 2012. La conservation des stocks fourragers. Available at : [http://www.fourragesmieux.be/prairie\\_alimentation.html](http://www.fourragesmieux.be/prairie_alimentation.html) (Accessed : 2 August 2021).
- Crémer S., 2015. La gestion des prairies. Available at : <https://centredemichamps.be/documents/> (Accessed : 25 July 2021).
- Culman S.W., Snapp S.S., Ollenburger M., Basso B. & DeHaan L.R., 2013. Soil and water quality rapidly responds to the perennial grain Kernza wheatgrass. *Agron. J.* **105**(3), 735–744.
- Cuvelier C., Dufasne I., 2015. Alimentation des vaches laitières n°2 : aliments, calculs de ration, indicateurs d'évaluation des déséquilibres de la ration et pathologies d'origine nutritionnelle. Available at : [http://www.fourragesmieux.be/prairie\\_alimentation.html](http://www.fourragesmieux.be/prairie_alimentation.html) (Accessed : 25 June 2021).
- De Boever, J.L., Cottyn, B.G., Buysse, F.X., Wainman, F.W. and Vanacker, J.M., 1986. The use of an enzymatic technique to predict digestibility, metabolizable and net energy of compound feedstuffs for ruminants. *Anita. Feed Sci. Technol.*, 14: 203-214.
- Decruyenaere V., Agneesens R. , Toussaint B. , Anceau C. , Goffaux, M., Oger R., 2008. Qualité des fourrages en Région Wallonne. *Requasud*, 1-32. Available at : <https://www.requasud.be/publications/> (Accessed : 10 July 2021).
- DeHaan L.R. & Ismail B.P., 2017. Perennial cereals provide ecosystem benefits. *Cereal Foods World* **62**(6), 278–281.
- Demarquilly C., Dulphy J.P. & Andrieu J.P., 1998. Valeurs nutritive et alimentaire des fourrages selon les techniques de conservation : foin, ensilage, enrubannage. *Fourrages* **155**, 349–369.
- Deswarte J-C, Gouache D., 2011. Semis de blé tendre : Des pertes de rendements avec des inter-rangs larges. Arvalis Institut du végétal. Perspectives agricoles N°376. Available at : <https://www.perspectives-agricoles.com/semis-de-ble-tendre-des-pertes-de-rendements-avec-des-inter-rangs-larges-@/view-543-arvarticlepa.html> (Accessed : 30 July 2021).

- Duchenne Q., Demeuse F., 2006. L'analyse des fourrages de ferme. Available at : <https://www.brabantwallon.be/bw/entreprendre-travailler/agriculture-1/analyses-et-conseils-pour-professionnels/> (Accessed : 5 February 2021).
- Eylenbosch D., Dumont B., Baeten V., Bodson B., Delaplace P. & Pierna J., 2018a. Quantification of leghaemoglobin content in pea nodules based on near infrared hyperspectral imaging spectroscopy and chemometrics. *J. Spectr. Imaging* **1**, 1–10.
- Eylenbosch D., 2018b. Évaluation des potentialités de l'imagerie hyperspectrale proche infrarouge et de la chimiométrie dans l'étude de systèmes racinaires (Thèse de doctorat). Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech, Gembloux, Belgique, 227 p., 8 tabl., 68 fig.
- FAO, 2021. Perspectives par grand secteur : Production végétale. Available at : <http://www.fao.org/3/y3557f/y3557f08.htm> (Accessed : 17 July 2021).
- 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**(April), 114298.
- Foster J.L., Guretzky J.A., Huo C., Kering M.K. & Butler T.J., 2013. Effects of row spacing, seeding rate, and planting date on establishment of switchgrass. *Crop Sci.* **53**(1), 309–314.
- Genot V., Bock L., Dardenne P. & Colinet G., 2014. L'intérêt de la spectroscopie proche infrarouge en analyse de terre (synthèse bibliographique). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **18**(2), 247–261.
- Hitchcock A.S. 1950. *Manual of the grasses of the United States*. USDA, Washington, DC.
- Hunter M.C., Sheaffer C.C., Culman S.W. & Jungers J.M., 2020a. Effects of defoliation and row spacing on intermediate wheatgrass I: Grain production. *Agron. J.* **112**(3), 1748–1763.
- Hunter M.C., Sheaffer C.C., Culman S.W., Lazarus W.F. & Jungers J.M., 2020b. Effects of defoliation and row spacing on intermediate wheatgrass II: Forage yield and economics. *Agron. J.* **112**(3), 1862–1880.
- INRA, 2018. *Alimentations des ruminants*, Éditions Quæ, Versailles, France, 728 p.
- INRAE, Cirad, AFZ, sd. Tables INRAE-CIRAD-AFZ. Tables de composition nutritionnelle du blé tendre. Available at : <https://feedtables.com/fr> (Accessed : 26 July 2021).
- IRM, 2021. Climat de la Belgique : Atlas climatique. Available at : <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/climat-dans-votre-commune> (Accessed : 24 April 2021).
- Jensen K.B., Robins J.G., Rigby C. & Waldron B.L., 2016. Comparative trends in forage nutritional quality across the growing season in 13 grasses. *Can. J. Plant Sci.* **97**(1), 72–82.
- 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.
- Jungers J.M., Frahm C.S., Tautges N.E., Ehlke N.J., Wells M.S., Wyse D.L. & Sheaffer C.C., 2018. Growth, development, and biomass partitioning of the perennial grain crop *Thinopyrum intermedium*. *Ann. Appl. Biol.* **172**(3), 346–354.

- Justes E., Bedoussac L., Corre-Hellou G., Fustec J., Hinsinger P., Jeuffroy M.H., Journet E.P., Louarn G., Naudin C., Pelzer & E., 2014. Les processus de complémentarité de niche et de facilitation déterminent le fonctionnement des associations. *Innov. Agron.* (40), 1–24.
- Lanker M., Bell M. & Picasso V.D., 2020. Farmer perspectives and experiences introducing the novel perennial grain Kernza intermediate wheatgrass in the US Midwest. *Renew. Agric. Food Syst.* **35**(6), 653–662.
- 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.
- Lessire F., Dufrasne I., 2020. Le pâturage, un atout économique et environnemental sous estimé. Available at : [https://drive.google.com/file/d/1g034tMPtCTRLt\\_TZoEXiPGdt8ZbBGVup/view](https://drive.google.com/file/d/1g034tMPtCTRLt_TZoEXiPGdt8ZbBGVup/view) (Accessed : 29 July 2021).
- Lila M., Furstoss V. & (Inra), 2000. L'utilisation de la spectrométrie dans le proche infrarouge pour l'évaluation de la qualité des fourrages. *Fourrages* **161**, 69–81.
- Maxin G., Andueza D., Celerier A., Coquard M., Daveau B., 2019. Connaître la valeur alimentaire de ses fourrages 2. La bonne analyse pour caractériser son fourrage. Available at : <https://hal.inrae.fr/hal-03163094> (Accessed : 25 July 2021).
- Minet, O., Ferber, F., Jacob, L., Lecler, 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, cellule de coordination, 32. Available at : <https://www.requasud.be/publications/> (Accessed : 5 March 2021).
- Moore K.J., Vogel K.P., Klopfenstein T.J., Masters R.A. & Anderson B.E., 1995. Evaluation of four intermediate wheatgrass populations under grazing. *Agron. J.* **87**(4), 744–747.
- Murphy D.J., O' Brien B., O' Donovan M., Condon T. & Murphy M.D., 2021. A near infrared spectroscopy calibration for the prediction of fresh grass quality on Irish pastures. *Inf. Process. Agric.*
- Newell A., Matthew T. & Richard C., 2021. An initial investigation of forage production and feed quality of perennial wheat derivatives of perennial wheat derivatives **68**(12), 1141–1148.
- Ogle, D., L. St John, D. Tober and K. Jensen. 2011. Plant guide for Intermediate wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*). USDA-Natural Resources Conservation Service, Idaho and North Dakota Plant Materials Centers.
- Pugliese, J. Y., 2017. Above-and belowground response to managing kernza (*Thinopyrum intermedium*) as a dual-use crop for forage and grain. Master's thesis, The Ohio State University.
- Pugliese J.Y., Culman S.W. & Sprunger C.D., 2019. Correction to: Harvesting forage of the perennial grain crop kernza (*Thinopyrum intermedium*) increases root biomass and soil nitrogen cycling (Plant and Soil, (2019), 10.1007/s11104-019-03974-6). *Plant Soil* 241–254.
- Robertson G.P., Paul E.A., Harwood R.R., 2000. Greenhouse gases in intensive agriculture: Contributions of individual gasses to the radiative forcing of the atmosphere. *Science* **289**:1922–1924.

- Ryan M.R., Crews T.E., Culman S.W., Dehaan L.R., Hayes R.C., Jungers J.M. & Bakker M.G., 2018. Managing for Multifunctionality in Perennial Grain Crops. *Bioscience* **68**(4), 294–304.
- Shili-Touzi I., 2009. Analyse du fonctionnement d'une association de blé d'hiver (*Triticum aestivum* L.) et d'une plante de couverture sur une échelle annuelle par modélisation et expérimentation. Agronomie, AgroParisTech. Available at : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00606113> (Accessed : 2 August 2021).
- Sprunger C.D., Culman S.W., Robertson G.P. & Snapp S.S., 2018. How does nitrogen and perenniality influence belowground biomass and nitrogen use efficiency in small grain cereals? *Crop Sci.* **58**(5), 2110–2120.
- STATBEL, 2021. Exploitations agricoles et horticoles. Available at : <https://statbel.fgov.be/fr/themes/agriculture-peche/exploitations-agricoles-et-horticoles#figures> (Accessed : 17 July 2021).
- Suter M., Connolly J., Finn J.A., Loges R., Kirwan L., Sebastia M.T. & Lüscher A., 2015. Nitrogen yield advantage from grass-legume mixtures is robust over a wide range of legume proportions and environmental conditions. *Glob. Chang. Biol.* **21**(6), 2424–2438.
- 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.
- Uijtewaal A., 2021. Les conservateurs d'ensilage d'herbe, comment ça marche ? Available at : <https://www.arvalis-infos.fr/les-conservateurs-d-ensilage-d-herbe-comment-ca-marche--@/view-27210-arvarticle.html> (Accessed : 5 August 2021).
- 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. offic. Anat. Chem.* M829.
- 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.
- WalOnMap, 2021. Carte des Principaux Types de Sols de Wallonie à 1/250000. Available at <https://geoportail.wallonie.be/walonmap#BBOX=170348.0726442959,173200.28668205728,139372.03090188114,140464.7622540105> (Accessed : 24 April 2021).
- Wang G.J., Nyren P., Xue Q.W., Aberle E., Eriksmoen E., Tjelde T., Liebig M., Nichols K. & Nyren A., 2014. Establishment and yield of perennial grass monocultures and binary mixtures for bioenergy in North Dakota. *Agron. J.* **106**(5), 1605–1613.
- Yang Z., Nie G., Pan L., Zhang Y., Huang L., Ma X. & Zhang X., 2017. Development and validation of near-infrared spectroscopy for the prediction of forage quality parameters in *Lolium multiflorum*. *PeerJ* 2017(10).
- Zhao D., MacKown C.T., Starks P.J. & Kindiger B.K., 2008. Interspecies Variation of Forage Nutritive Value and Nonstructural Carbohydrates in Perennial Cool-Season Grasses. *Agron. J.* **100**(3), 837.
- Zimbric J.W., Stoltenberg D.E. & Picasso V.D., 2020. Effective weed suppression in dual-use intermediate wheatgrass systems. *Agron. J.* **112**(3), 2164–2175.

## Annexes

**Annexe 1** : Plan du champ d'essai avec les différentes parcelles (bandes blanches = parcelles de rendement en grains, bandes grises : parcelles de prélèvements)

7 m	4001 5	4002 5	4003 6	4004 6	4005 1	4006 1	4007 2	4008 2	4009 4	4010 4	4011 3	4012 3	R4
	3001 6	3002 6	3003 5	3004 5	3005 4	3006 4	3007 3	3008 3	3009 1	3010 1	3011 2	3012 2	R3
	2001 2	2002 2	2003 1	2004 1	2005 5	2006 5	2007 6	2008 6	2009 4	2010 4	2011 3	2012 3	R2
	1001 2	1002 2	1003 1	1004 1	1005 3	1006 3	1007 4	1008 4	1009 6	1010 6	1011 5	1012 5	R1
	2m												

**Annexe 2** : Opérations culturales réalisées sur le champ d'essai de 2019 à 2021

Date	Opérations culturales
15-05-19	Labour + préparation du sol (herse rotative)
15-05-19	Semis du Kernza (date de semis de mai) (interligne de 12,5 et 25 cm, 20 kg/ha)
15-05-19	Roulage du semis
02-07-19	Désherbage chimique des parcelles semées en mai : Harmony M (100 g/ha) + Primstar (1 L/ha)
22-07-19	Désherbage mécanique des parcelles semées en mai : herse étrille
23-08-19	Semis du Kernza (date de semis d'août) (interligne de 12,5 et 25 cm, 20 kg/ha)
23-08-19	Roulage du semis
03-10-19	Semis du Kernza (date de semis d'octobre) (interligne de 12,5 et 25 cm, 20 kg/ha)
22-10-19	Désherbage chimique des parcelles semées en août : Harmony M (100g/ha) + Primstar (1 L/ha)
05-12-19	Fauche d'automne des parcelles semées en mai
03-04-20	Fertilisation au tallage de toutes les modalités : 50 uN/ha
16-04-20	Désherbage chimique des parcelles semées en octobre (Harmony M (100 g/ha) + Primstar (1 L/ha)
05-05-20	Fertilisation au stade dernière feuille des parcelles semées en mai : 50 uN/ha
26-05-20	Fertilisation au stade dernière feuille des parcelles semées en août et octobre : 50 uN/ha
10-06-20	Désherbage chimique des parcelles semées en octobre : Bofix (3 L/ha)
10-08-20	Récolte des parcelles semées en mai
02-09-20	Récolte des parcelles semées en août
11-09-20	Broyage des résidus laissés après récolte pour les parcelles semées en mai et août
22-09-20	Récolte des parcelles semées en octobre
29-09-20	Fertilisation d'automne de toutes les modalités : 50 uN/ha
18-11-20	Fauche d'automne de toutes les modalités
18-03-21	Fertilisation au tallage de toutes les modalités : 50 uN/ha
27-05-21	Fertilisation au stade dernière feuille de toutes les modalités : 50 uN/ha

## **Annexe 3 : Echelle BBCH améliorée des stades phénologiques des céréales (Witzenberger *et al.* 1989 ; Lancashire *et al.* 1991).**

### **Stade principal 0 : germination, levée**

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

### **Stade principal 1 : développement des feuilles**

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

### **Stade principal 2 : le tallage**

- 20 aucune talle visible
- 21 début tallage : la première talle est visible
- 22 2 talles visibles
- 23 3 talles visibles
- 2. *et ainsi de suite...*
- 29 fin tallage

### **Stade principal 3 : élongation de la tige principale**

- 30 début montaison : pseudo-tiges et talles dressées, début d'élongation du premier entre-nœud, inflorescence au moins à 1cm au-dessus du plateau de tallage
- 31 le premier nœud est au moins à 1 cm au-dessus du plateau de tallage
- 32 le deuxième nœud est au moins à 2 cm au-dessus du premier nœud
- 33 le troisième nœud est au moins à 2 cm au-dessus du deuxième nœud
- 3. *et ainsi de suite...*
- 37 la dernière feuille est juste visible, elle est encore enroulée sur elle-même
- 39 le limbe de la dernière feuille est entièrement étalé, la ligule est visible

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

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

### **Stade principal 5 : sortie de l'inflorescence ou épisaison**

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

### **Stade principal 6 : floraison, anthèse**

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

### **Stade principal 7 : développement des graines**

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

### **Stade principal 8 : maturation des graines**

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

### **Stade principal 9 : sénescence**

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

**Annexe 4** : Equations permettant de prédire les valeurs énergétiques et protéiques du Kernza dans le système belgo-hollandais (Requasud, 2021).

### Equations herbe

CT = Cendres totales

$$\text{MODc} = -0,632 \cdot \text{DMO} \cdot (100 - \text{I113}) / 10 - 2,18 \cdot \text{CT} + 297$$

$$\text{PBD} = 9,59 \cdot \text{MAT} + 0,4 \cdot \text{CT} - 40; 9,59 \cdot \text{MAT} + 0,4 \cdot \text{CT} - 40 - 0,1 \cdot (92 - 105)$$

$$Q = \text{MODc} / \text{PBD}$$

$$\text{SI } Q < 7 : \text{EM} = 3,4 \cdot \text{MODc} + 1,4 \cdot \text{PBD}$$

$$\text{SI } Q > 7 : \text{EM} = 3,6 \cdot \text{MODc}$$

$$\text{ENA} = 100 - \text{MAT} - \text{CB} - \text{CT} - 4$$

$$\text{EB} = 57,7 \cdot \text{MAT} + 87,4 \cdot 4 + 50 \cdot \text{CB} + 40,6 \cdot \text{ENA}$$

$$\text{VEM} = \text{EM} \cdot (0,2738 + 0,142 \cdot (\text{EM} / \text{EB}))$$

$$\text{VEVI} = \text{EM} \cdot (0,3358 \cdot (\text{EM} / \text{EB})^2 + 0,6508 \cdot (\text{EM} / \text{EB}) + 0,005) / (1,524 \cdot (\text{EM} / \text{EB}) + 0,467)$$

$$\text{BRE} = 38,6 - 0,8 \cdot \text{MAT} + 0,07 \cdot 92$$

$$\text{RRE} = 10,2 - 0,37 \cdot \text{MAT} + 0,022 \cdot 92$$

$$\text{PDVBE} = 100 \cdot (\text{BRE} - \text{RRE}) / \text{BRE}$$

$$\text{DVBE} = \text{MAT} \cdot 10 \cdot (1,11 \cdot \text{BRE} / 100) \cdot (\text{PDVBE} / 100)$$

$$\text{FOS} = \text{MODc} - 40 - \text{MAT} \cdot 10 \cdot \text{BRE} / 100$$

$$\text{DVME} = \text{FOS} \cdot 0,15 \cdot 0,75 \cdot 0,85$$

$$\text{VRAS} = 5 \cdot \text{CT}$$

$$\text{Si } \text{VRAS} > 60 \rightarrow \text{VRAS} = 60$$

$$\text{ODS} = 10 \cdot (100 - (\text{MODc} / 10) - (\text{VRAS} / 10))$$

$$\text{DVMFE} = 0,075 \cdot \text{ODS}$$

$$\text{DVE} = \text{DVBE} + \text{DVME} - \text{DVMFE}$$

$$\text{MREN} = \text{MAT} \cdot 10 \cdot (1 - 1,11 \cdot (\text{BRE} / 100))$$

$$\text{MREE} = \text{FOS} \cdot 0,15$$

$$\text{OEB} = \text{MREN} - \text{MREE}$$

### Equations paille

MGr = Matière grasse

$$\text{MODth} = (100 - \text{CT}) \cdot 0,48 \cdot 10$$

$$\text{PBD} = -0,17 \cdot \text{MAT} \cdot 10$$

$$\text{Emth} = 41 \cdot 0,17 \cdot \text{MAT} + 90 \cdot \text{MGr} \cdot 0,62 + 33 \cdot \text{CB} \cdot 0,55 + 35 \cdot \text{ENA} \cdot 0,43$$

$$\text{ENA} = 100 - \text{MAT} - \text{CB} - \text{MGr} - \text{CT}$$

$$\text{EB} = 57,7 \cdot \text{MAT} + 87,4 \cdot \text{MGr} + 50 \cdot \text{CB} + 40,6 \cdot \text{ENA}$$

$$\text{VEM} = \text{Emth} \cdot (0,2738 + 0,142 \cdot (\text{Emth} / \text{EB}))$$

$$\text{VEVI} = \text{Emth} \cdot (0,3358 \cdot (\text{Emth} / \text{EB})^2 + 0,6508 \cdot (\text{Emth} / \text{EB}) + 0,005) / (1,524 \cdot (\text{Emth} / \text{EB}) + 0,467)$$

$$\text{DVBE} = \text{MAT} \cdot 10 \cdot 1,11 \cdot 40 / 100 \cdot 70 / 100$$

$$\text{MOF} = \text{MODth} - \text{MGr} \cdot 10 - (\text{MAT} \cdot 10 \cdot 40 / 100) - (0 \cdot 10 \cdot 0 / 100)$$

$$\text{DVME} = \text{MOF} \cdot 0,15 \cdot 0,75 \cdot 0,85$$

$$\text{ODS} = 1000 - (\text{MODth} - 35 / 100 \cdot \text{CT} \cdot 10)$$

$$\text{DVMFE} = \text{ODS} \cdot 0,075$$

$$\text{DVE} = \text{DVBE} + \text{DVME} - \text{DVMFE}$$

$$\text{OEB} = (10 \cdot \text{MAT} \cdot (1 - 1,11 \cdot 40 / 100)) - (\text{MOF} \cdot 0,15)$$



**Annexe 5** : Équations des critères permettant d'évaluer la qualité d'un modèle prédictif (Requasud, 2021)

Standard Error of Differences	SED	$\sqrt{\frac{\sum(x - y - \text{BIAS})^2}{N - 1}}$ where: $\text{BIAS} = \frac{\sum(x - y)}{N}$ <b>OR</b> $\sqrt{\frac{\sum(x - y)^2 - \{[\sum x - y]^2/N\}}{N - 1}}$
Standard Error of Calibration	SEC	SED formula where: x = F.NIRS prediction y = laboratory constituent value
Standard Error of Cross-Validation	SECV	SED formula where: x = F.NIRS prediction w/o cross-validation samples in the model y = laboratory constituent value for cross-validation samples
Standard Error of Prediction	SEP	SED formula where: x = F.NIRS prediction y = laboratory constituent values for independent samples
Root Mean Square Error Difference	RMSE	$\sqrt{\frac{\sum(x - y)^2}{n}}$
Standard deviation of y	SDy	$\sqrt{\frac{\sum(y - \bar{y})^2}{n-1}}$
Ratio of SEP to SD	RPD	SDy/SEP
Bias	Bias	$\bar{x} - \bar{y}$

**Annexe 6** : Pourcentage de feuilles durant l'année 2020. ANOVA par stade séparé. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet de la date de semis tandis que les + représentent les résultats du test SNK de l'effet de l'interligne. Un + signifie une moyenne significativement supérieure. Pour le stade dernière feuille, étant donné l'interaction entre la date de semis et l'interligne, une ANOVA par date de semis séparée ainsi qu'une ANOVA par interligne séparé ont été réalisées.

		12,5 cm	25 cm	Moyenne I	ANOVA
<b>Redressement</b>	Mai	-	-	84,82±1,56 a	D *
	Août	-	-	79,35±1,17 b	I
	Moyenne D	83,88±1,58	80,29±1,61		R D*I
		*	***		
<b>Dernière feuille</b>	Mai	** 28,10±0,81	b + 25,56±0,33 b		D ***
	Août	31,46±0,45 a	33,46±0,39 a		I
	Moyenne D				R D*I **
<b>Floraison</b>	Mai	-	-	15,64±0,61 a	D
	Août	-	-	17,15±0,42 a	I
	Moyenne D	16,58±0,49	16,20±0,68		R D*I
<b>Récolte</b>	Mai	-	-	10,07±0,37 a	D
	Août	-	-	9,38±0,20 a	I *
	Moyenne D	10,15±0,35 +	9,30±0,20		R D*I

**Annexe 7** : Pourcentage de tiges durant l'année 2020. ANOVA par stade séparé. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet de la date de semis tandis que les + représentent les résultats du test SNK de l'effet du stade de développement. Un + signifie une moyenne significativement supérieure. Pour le stade dernière feuille, étant donné l'interaction entre la date de semis et l'interligne, une ANOVA par date de semis séparée ainsi qu'une ANOVA par interligne séparé ont été réalisées.

		12,5 cm	25 cm	Moyenne I	ANOVA
<b>Redressement</b>	Mai	-	-	15,18±1,58 b	D *
	Août	-	-	20,65±1,17 a	I
	Moyenne D	16,12±1,57	19,71±1,61		R D*I
		***	*		
<b>Dernière feuille</b>	Mai	** 71,90±0,81 a	74,44±0,33 a +		D ***
	Août	68,54±0,45 b	66,98±0,39 b		I
	Moyenne D				R D*I **
<b>Floraison</b>	Mai	-	-	69,99±0,61 a	D **
	Août	-	-	66,49±0,57 b	I
	Moyenne D	68,07±1,03	68,42±1,51		R D*I
<b>Récolte</b>	Mai	-	-	71,54±0,58 a	D ***
	Août	-	-	68,62±0,41 b	I
	Moyenne D	69,62±0,75	70,54±1,25		R D*I

**Annexe 8** : Teneurs en cendres pour l'année 2021. **A.** Résultats de l'ANOVA par stade séparé. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet de la date de semis tandis que les + représentent les résultats du test SNK de l'effet de l'interligne. **B.** Résultats de l'ANOVA par date séparée. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet du stade de développement tandis que les + représentent les résultats du test SNK de l'effet de l'interligne.

**A.**

ANOVA par stade		12,5 cm	25 cm	Moyenne I	ANOVA
<b>Redressement</b>	Mai	-	-	7,51±0,12	D
	Août	-	-	7,33±0,22	I *
	Moyenne D	7,33±0,13	7,83±0,22 +		R D*I
<b>Dernière feuille</b>	Mai	-	-	7,68±0,14 b	D **
	Août	-	-	8,41±0,08 a	I
	Moyenne D	8,13±0,14	7,96±0,21		R D*I

**B.**

ANOVA par date		12,5 cm	25 cm	Moyenne I	ANOVA
<b>Mai</b>	Redressement	-	-	7,51±0,12	S
	Dernière feuille	-	-	7,68±0,14	I
	Moyenne S	7,67±0,11	7,53±0,15		R S*I
		**			
<b>Août</b>	Redressement	* 7,19±0,25 b	8,12±0,12 +		S ***
	Dernière feuille	8,40±0,12 a	8,42±0,12		I **
	Moyenne S				R S*I *

**Annexe 9** : Teneurs en NDF, ADF, CB pour l'année 2020. ANOVA par stade séparé. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet de la date de semis tandis que les + représentent les résultats du test SNK de l'effet de l'interligne.

NDF					
ANOVA par stade		12,5 cm	25 cm	Moyenne I	ANOVA
		***			
<b>Redressement</b>	Mai	43,07±0,72 b	45,02±0,68 a		D ***
	Août	** 49,72±0,48 a	+ 46,37±0,53 a		I
	Moyenne D				R D*I ***
<b>Dernière feuille</b>	Mai			66,06±0,64 a	D *
	Août			63,82±0,46 b	I
	Moyenne D	64,77±0,56	65,11±0,81		R D*I
<b>Floraison</b>	Mai	-	-	69,49±0,64 a	D
	Août	-	-	70,04±0,62 a	I
	Moyenne D	69,88±0,59	69,65±0,68		R D*I
<b>Récolte</b>	Mai	-	-	61,08±0,95 a	D
	Août	-	-	60,06±0,49 a	I
	Moyenne D	61,01±0,69	60,13±0,83		R D*I
<b>Automne</b>	Mai	-	-	48,62±0,79 a	D
	Août	-	-	48,68±1,06 a	I
	Moyenne D	47,81±0,76	49,49±1,00		R D*I

ADF					
ANOVA par stade		12,5 cm	25 cm	Moyenne I	ANOVA
		**			
<b>Redressement</b>	Mai	19,46±0,58 b	21,13±2,49 a		D ***
	Août	23,46±0,58 a	22,25±0,63 a		I
	Moyenne D				R D*I *
<b>Dernière feuille</b>	Mai			36,93±0,38 a	D ***
	Août			33,92±0,43 b	I
	Moyenne D	35,52±0,51	35,32±0,85		R D*I
<b>Floraison</b>	Mai	-	-	41,33±0,56 a	D
	Août	-	-	40,50±0,40 a	I
	Moyenne D	40,52±0,31	41,31±0,62		R D*I
<b>Récolte</b>	Mai	-	-	36,76±0,68 a	D *
	Août	-	-	34,89±0,38 b	I *
	Moyenne D	35,86±0,55	35,80±0,75		R D*I
<b>Automne</b>	Mai	-	-	25,22±0,49 a	D
	Août	-	-	24,65±0,76 a	I
	Moyenne D	24,44±0,65	25,43±0,59		R D*I

CB						
ANOVA par stade		12,5 cm	25 cm	Moyenne I	ANOVA	
***						
<b>Redressement</b>	Mai	* 18,13±0,47	b	19,82±0,41	a +	D ***
	Août	* 22,79±0,17	a +	21,20±0,55	a	I
	Moyenne D					R * D*I ***
<b>Dernière feuille</b>	Mai			35,97±0,25	a	D ***
	Août			33,05±0,38	b	I
	Moyenne D	34,50±0,46	34,52±0,77			R D*I
<b>Floraison</b>	Mai	-		40,36±0,47	a	D
	Août	-		39,61±0,39	a	I
	Moyenne D	39,92±0,27	40,04±0,59			R D*I
<b>Récolte</b>	Mai	-	-	34,24±0,63	a	D
	Août	-	-	33,28±0,63	a	I
	Moyenne D	34,21±0,59	33,31±0,71			R D*I
<b>Automne</b>	Mai	-	-	22,84±0,55	a	D
	Août	-	-	22,73±0,69	a	I
	Moyenne D	22,32±0,67	23,24±0,51			R D*I

**Annexe 10 :** Teneurs en ADL pour l'année 2021. **A.** Résultats de l'ANOVA par stade séparé. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet de la date de semis. **B.** Résultats de l'ANOVA par date séparée. Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet du stade de développement tandis que les + représentent les résultats du test SNK de l'effet de l'interligne.

**A.**

ANOVA par stade		12,5 cm	25 cm	Moyenne I	ANOVA	
<b>Redressement</b>	Mai	2,28±0,06	2,01±0,08			D
	Août	2,13±0,04	2,08±0,10			I
	Moyenne D					R D*I *
<b>Dernière feuille</b>	Mai	-	-	3,63±0,06	a	D **
	Août	-	-	3,30±0,07	b	I
	Moyenne D	3,43±0,08	3,50±0,09			R D*I

**B.**

ANOVA par date		12,5 cm	25 cm	Moyenne I	ANOVA	
<b>Mai</b>	Redressement	-	-	2,15±0,07	b	S ***
	Dernière feuille	-	-	3,63±0,07	a	I *
	Moyenne S	2,79±0,30	2,99±0,27	+		R S*I
<b>Août</b>	Redressement	-	-	2,10±0,06	b	S ***
	Dernière feuille	-	-	3,30±0,05	a	I
	Moyenne S	2,72±0,23	2,68±0,24			R S*I

## Annexe 11 : Critères permettant d'estimer la qualité du modèle prédictif 1B.

Constituants	Calibration					Validation						
	N	Moyenne	SD	SEC	R <sup>2</sup>	N	Moyenne	SD	SEP	Biais	R <sup>2</sup>	RPD(SD/SEP)
		(% MS)	(% MS)	(% MS)			(% MS)	(% MS)	(% MS)	(% MS)		
MSa	88	93,43	0,88	0,18	0,959	32	93,45	1,10	0,41	0,41	0,714	2,66
Cendres	88	6,96	2,75	0,38	0,981	32	7,81	0,53	1,02	0,36	0,000	0,52
MAT	88	13,93	7,14	0,44	0,996	32	12,93	2,79	0,50	0,21	0,962	5,55
NDF	88	57,98	9,21	1,63	0,969	32	54,63	12,87	1,68	0,38	0,982	7,65
ADF	88	31,66	7,18	0,72	0,990	32	29,79	8,95	0,79	1,24	0,972	11,34
ADL	88	4,33	1,35	0,40	0,910	32	2,79	0,71	1,12	0,89	0,000	0,64
CB	88	30,10	7,34	0,81	0,988	32	27,50	8,70	1,13	0,37	0,981	7,71
DMO	33	60,65	15,57	1,11	0,995	12	69,66	16,61	8,26	1,08	0,748	2,01

## Annexe 12 : Critères permettant d'estimer la qualité du modèle prédictif Requasud.

Constituants	Calibration							Validation						
	N	Moyenne	SD	SEC	SECV	R <sup>2</sup>	RPD (SD/SECV)	N	Moyenne	SD	SEP	Biais	R <sup>2</sup>	RPD (SD/SEP)
		(% MS)	(% MS)	(% MS)	(% MS)				(% MS)	(% MS)	(% MS)	(% MS)		
MSa	88	93,43	0,88	0,19	0,23	0,955	3,78	32	93,45	1,10	0,39	0,50	0,875	2,81
CT	87	6,89	2,68	0,31	0,36	0,987	7,48	32	7,81	0,53	0,84	0,68	0,000	0,64
MAT	88	13,93	7,14	0,42	0,53	0,997	13,35	32	12,93	2,79	0,81	0,05	0,970	3,46
NDF	87	58,13	9,15	0,79	0,89	0,993	10,25	32	54,63	12,87	0,75	-0,49	0,997	17,10
ADF	88	31,66	7,18	0,71	0,88	0,990	8,19	32	29,79	8,95	0,72	1,40	0,996	12,40
ADL	88	4,33	1,35	0,55	0,63	0,832	2,14	32	2,79	0,71	0,69	-0,78	0,922	1,03
CB	87	30,11	7,38	0,57	0,73	0,994	10,11	32	27,50	8,70	0,49	1,25	0,997	17,92

### Annexe 13 : Représentation graphique de la calibration et validation du modèle 1B

