

Kernza (*Thinopyrum Intermedium*), une culture céréalière pérenne : Evaluation de ses performances sous différentes nutritons azotées en Belgique

Auteur : Fagnant, Laura

Promoteur(s) : Bodson, Bernard

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

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

Année académique : 2017-2018

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/5151>

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.

**KERNZA® (*THINOPYRUM INTERMEDIUM*),
UNE CULTURE CÉRÉALIÈRE PÉRENNE :
ÉVALUATION DE SES PERFORMANCES SOUS
DIFFÉRENTES NUTRITIONS AZOTÉES EN
BELGIQUE.**

FAGNANT LAURA

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

ANNÉE ACADÉMIQUE 2017-2018

PROMOTEUR: BERNARD BODSON

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.

**KERNZA® (*THINOPYRUM INTERMEDIUM*),
UNE CULTURE CÉRÉALIÈRE PÉRENNE :
ÉVALUATION DE SES PERFORMANCES SOUS
DIFFÉRENTES NUTRITIONS AZOTÉES EN
BELGIQUE.**

FAGNANT LAURA

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

ANNÉE ACADEMIQUE 2017-2018

PROMOTEUR: BERNARD BODSON

Organisations ayant contribué financièrement



Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mon promoteur, Bernard Bodson, de m'avoir proposé ce sujet passionnant. Son encadrement et ses conseils ont été très précieux et m'ont permis de mener à bien ce travail de fin d'étude.

Un tout grand merci à Olivier Duchêne, doctorant à l'ISARA de Lyon, pour m'avoir aiguillé tout au long de ce travail. C'est également pour sa patience et ses réponses à mes multiples questions que je tiens à le remercier, sans son aide, ce travail ne serait pas ce qu'il est.

Par ailleurs j'aimerais remercier l'ensemble de l'unité de phytotechnie tempérée de la Faculté et particulièrement l'équipe technique de la Ferme expérimentale pour leur accueil chaleureux et le temps qu'ils ont consacré au champ d'essai. Sans leur investissement, ce travail n'aurait pas été possible.

Je voudrais également remercier Georges Sinnaeve et l'équipe technique du département valorisation des productions du CRA-w de m'avoir permis de réaliser mes analyses. J'aimerais adresser un merci particulier à Sandrine Mauro pour sa sympathie et son aide précieuse. J'en profite pour remercier mon professeur Yves Beckers pour ses conseils avisés.

Je voudrais également remercier mes compagnons d'infortunes pour les échanges qu'on a pu avoir, leur aide en langage R ou même leur « maîtrise racinaire ». Ainsi que mes amis pour leur présence et les diverses réjouissances que j'ai pu partager avec eux pendant ce travail et durant ces 5 dernières années.

Un grand merci à ma famille, à mes parents, pour m'avoir donné la chance de suivre ces études et de ne jamais avoir cessé de croire en moi.

Enfin, je souhaite remercier Edouard pour son soutien, son écoute et son aide qui, même soumis à rudes épreuves, n'ont pas faiblis.

Résumé

La graminée pérenne *Thinopyrum intermedium* (Kernza®) fait l'objet d'une attention particulière aux USA et en Australie pour son potentiel d'utilisation en tant que nouvelle culture céréalière pérenne. Celle-ci serait particulièrement intéressante pour le contrôle de l'érosion tout en prodiguant un rendement en grains ainsi qu'un rendement fourrager sur plusieurs années. En Europe de l'Ouest, l'espèce pourrait constituer une alternative aux systèmes de culture actuellement utilisés.

La culture est capable de produire un fourrage de qualité moyenne et suffisante pour du bétail allaitant. Au stade 2 nœuds et fauchée au ras du sol, 850 VEM, 70g de DVE et -16g d'OEB ont été obtenus avec des digestibilités de la matière organique et de la matière sèche aux alentours de 70%. Une fertilisation de 100 unités d'azote appliquées au tallage permet d'augmenter sa teneur en protéines. Cette fertilisation fournit également la plus grande production de biomasse aérienne (7,4T de MS/ha au stade floraison) et devrait permettre d'obtenir le meilleur rendement en grains (nombre d'épis/m² et biomasse des épis à la floraison les plus élevés). En outre, l'application de produits de protection des plantes n'a pas été réalisée puisqu'aucun problème particulier vis-à-vis des maladies et des ravageurs n'a été observé. Finalement, le désherbage doit être approfondi que ce soit par voie chimique ou mécanique.

À l'avenir, les rendements en grains devraient être quantifiés et leurs voies de valorisation caractérisées. La production fourragère d'automne devra également être étudiée. Du fait de l'importante variabilité génétique au sein de la population de *Th. intermedium* (TLI-C5), l'utilisation de matériel provenant d'un plus grand nombre de cycles de sélection devrait améliorer les performances de la culture. En outre, l'implantation d'une culture compagne de trèfle est une voie à explorer.

Mots clés

Kernza - *Thinopyrum intermedium* – culture céréalière pérenne – fertilisation azotée

Abstract

The perennial grass, *Thinopyrum intermedium* (Kernza®) is the centre of special attention in the USA and in Australia for its potential to be used as a new perennial grain crop. This grass could be efficient for erosion control while providing grain and forage yields for several years. In Western Europe, the species could be an alternative to conventional cropping systems.

The crop is able to produce medium quality forage appropriate for suckling cows. At the stage 2 nodes and mowed on the ground level it produces 850 VEM, 70g of DVE and -16g of OEB. Organic matter and dry matter digestibilities are close to 70%. To maximize the protein content, 100kg N/ha applied at tillering are required. This nitrogen rate is also better for aerial biomass production (7,4T of DM/ha at flowering) and should provide the best grain yield (greater number of spikes per square metre and spike biomass at flowering). In addition, crop protection products haven't be used because the crop was not exposed to any disease or pest. Finally, mechanical or chemical weeding must be investigated.

In the future, grain yields must be quantified and their ways of valuation described. Forage production in fall should be studied as well. Genetic variability within TLI-C5 population of *Th. intermedium* is still high, using material coming from further breeding cycles should enhance crop performances. Furthermore, it could be interesting to explore clover as a companion crop.

Keywords

Kernza - *Thinopyrum intermedium* – perennial cereal – nitrogen fertilization

Liste des abréviations

ADF : *Acid Detergent Fiber*
ADL : *Acid Detergent Lignin*
BYVD : *Barley Yellow Dwarf Virus*
CEL : Cellulose
CT : Cendres Totales
DMO : Digestibilité de la Matière Organique
DMS : Digestibilité de la Matière Sèche
DVE : *Darm Verteerbaar Eiwit*
EB : Energie Brute
EM : Energie Métabolisable
ENA : Extractif Non Azoté
IWG : *Intermediate Wheatgrass*
OEB : *Onbestendige Eiwit Balans*
MOD : Matière Organique Digestible
MPT : Matières Protéiques Totales
MS : Matière Sèche
MSC : *Mean Stage by Count*
MSa : Matière Sèche analytique
MSet : Matière Sèche étuve
N : azote
NDF : *Neutral Detergent Fiber*
PMG : Poids de Mille Grains
QTL : *Quantitative Trait Loci*
S_{MSC} : *Standard deviation of mean stage*
SSt : Sucres Solubles totaux
TLI : *The Land Institute*
USDA : United States Department of Agriculture
VEM : *Voedereenheid Melk*
VEVI : *Veevoedereenheid Vleesvee Intensief*
WCM : *Wheat Curl Mite*
WSMV : *Wheat Streak Mosaic Virus*

Table des matières

1	Introduction	1
2	Revue de la littérature scientifique	3
2.1	<i>Thinopyrum intermedium</i>	3
2.1.1	Origine géographique	3
2.1.2	Classification	3
2.1.3	Synonymes	4
2.1.4	Utilisation	4
2.1.5	Diversité génétique	5
2.1.6	Caractérisation	6
2.2	Développement des cultures pérennes	8
2.2.1	Développement de céréales pérennes par large hybridation	8
2.2.2	Développement de céréales pérennes par domestication directe	9
2.3	<i>Thinopyrum intermedium</i> , Kernza® comme culture céréalière pérenne	11
2.3.1	Particularités	11
2.3.2	Services éco systémiques	14
2.3.3	Risques généraux	18
2.3.4	Potentiel d'utilisation	19
2.4	Diversité des céréales pérennes	28
2.4.1	Survie sur plusieurs années	28
2.4.2	Rendements en grains	29
2.4.3	Rendements fourragers	31
2.4.4	Système racinaire	31
2.4.5	Gestion à deux débouchés	31
3	Objectifs du travail	32
4	Matériels et méthodes	34
4.1	Localisation de l'essai	34
4.2	Analyse de sol	34
4.3	Conditions climatiques et données météorologiques	34
4.4	Facteurs étudiés	36
4.5	Dispositif expérimental	37
4.6	Opérations culturales	38
4.7	Observations et variables mesurées	39
5	Résultats et discussions	47

5.1	Suivi de la culture :	47
5.1.1	Estimation de la levée de Kernza®	47
5.1.2	Observation des maladies	48
5.1.3	Relevé des adventices	50
5.1.4	Développement de la culture	53
5.2	Caractéristiques morphologiques et de développement	57
5.2.1	Suivi du nombre de talles	57
5.2.2	Suivi du nombre d'épis	60
5.2.3	Hauteur des plantes	61
5.2.4	Longueur des épis.....	62
5.3	Caractérisation de la biomasse aérienne	64
5.3.1	Quantification de la biomasse aérienne.....	64
5.3.2	Analyse de la valeur alimentaire de la biomasse aérienne	68
5.4	Caractérisation de la biomasse racinaire	71
5.4.1	Comparaison de la biomasse racinaire de Kernza® et du froment	71
5.4.2	Comparaison de la biomasse racinaire de Kernza® sous différentes fertilisations azotées	72
6	Conclusions générales et perspectives	74
Références bibliographiques		
Annexes		

Table des figures

Figure 1 : <i>Thinopyrum intermedium</i> ©Barkworth, 2007.	7
Figure 2 : Localisation des différents essais du projet « Perennial grains project ».	33
Figure 3 : Schéma du champ d'essai de Kernza® avec les différentes parcelles (bandes blanches = parcelles de rendement grains, bandes grises = parcelles de prélèvement, bandes jaunes = parcelles de froment, bande verte = bande de Kernza®).	38
Figure 4 : Nombre de plantes par m ² en fonction des blocs aléatoires de la parcelle.	47
Figure 5 : Manque à la levée des plantules de Kernza®.	47
Figure 6 : (A) et (B) Photos de lésions sur une gaine foliaire, (C) photo d'une lésions sur une gaine foliaire et petite tache diffuse sur la tige, (D) photo d'une pourriture de la gaine foliaire 14-05-2018.	49
Figure 7 : (A) Photo de lésions sur une feuille, (B) et (C) photos des lésions sur une feuille de Kernza® prises au microscope binoculaire 20-06-18.	49
Figure 8 : Présence d'adventices (A) le 29-11-17 après le premier désherbage chimique et (B) le 07-05-18 après le deuxième désherbage chimique dans le champ d'essai de Kernza®.	50
Figure 9 : Effet du binage (A) le 24-05-18 et (B) le 04-06-18 dans le champ d'essai de Kernza®.	51
Figure 10 : Nombre d'adventices par m ² en fonction de la date d'échantillonnage dans le champ d'essai de Kernza®.	51
Figure 11 : Nombre d'adventices par m ² en fonction de la culture.	52
Figure 12 : Evolution des stades de développement (selon l'échelle BBCH) du froment et de Kernza® en fonction de la somme des degrés jours (°C).	54
Figure 13 : Evolution des stades de développement (selon l'échelle BBCH) du froment et de Kernza® en fonction de la date.	54
Figure 14: Evolution des stades de développement (selon la Table de Moore) de Kernza® en fonction de la somme des degrés jours (°C) et de la fertilisation azotée.	55
Figure 15 : Photos de Kernza® au stade végétatif (11-04-18).	56
Figure 16 : Photos de Kernza® au stade élongation (07-05-18).	57
Figure 17 : Photos de Kernza® au stade épiaison (28-05-18).	57
Figure 18 : Photos de Kernza® au stade développement et maturation des grains (6-08-18).	57
Figure 19 : Nombre moyen de talles par m ² de Kernza® en fonction de la fertilisation azotée et de la date de prélèvement.	58
Figure 20: Nombre moyen d'épis par m ² de Kernza® en fonction de la fertilisation azotée et de la date de prélèvement.	60
Figure 21 : Hauteur moyenne des plantes (cm) de Kernza® en fonction de la fertilisation azotée le 18 juin et le 30 juillet.	61
Figure 22: Longueur moyenne des épis (cm) de Kernza® en fonction de la fertilisation azotée le 18 juin et le 30 juillet.	63
Figure 23: Moyenne de la biomasse aérienne totale (poids sec (g/m ²)) en fonction de la fertilisations azotée et du stade de développement.	64
Figure 24: Moyenne de la biomasse des épis (poids sec(g)/ m ²) en fonction de la fertilisation azotée et du stade de développement.	66
Figure 25: Biomasse des épis sur la biomasse aérienne totale en fonction de la fertilisation azotée et du stade de prélèvement.	67
Figure 26: Biomasse des épis sur la biomasse aérienne totale pour le froment et Kernza® au stade floraison.	67
Figure 27 : VEM (A), DVE (B), OEB (C), en fonction du stade de développement de Kernza® et de la fertilisation azotée.	68
Figure 28 : CT (A), NDF (B), ADF (C), ADL (D), DMO (E), DMS (F), en fonction du stade de développement de Kernza® et de la fertilisation azotée.	69

Figure 29: MPT en fonction du stade de développement de Kernza® et de la fertilisation azotée.....	70
Figure 30: Biomasses racinaires (poids sec (g/m ²)) en fonction de la fertilisation azotée de Kernza®.	72

Table des tableaux

Tableau 1 : Classifications de l'espèce <i>Thinopyrum intermedium</i>	3
Tableau 2 : Résultats de l'analyse de sol du champ d'essai de Kernza®.	34
Tableau 3 : Température moyenne mensuelle (°c) sur la période de culture et les normales saisonnières.	35
Tableau 4 : Précipitations totales mensuelles (mm) sur la période de culture et les normales saisonnières.	35
Tableau 5 : Accumulation mensuelle des degrés jours (°c) sur la période de culture, saison en cours et les deux saisons précédentes.....	36
Tableau 6 : Accumulation mensuelle des degrés jours (°c) sur la période de culture, à partir du semis (22 sept) pour la saison en cours et les deux saisons précédentes.....	36
Tableau 7 : Modalités des facteurs étudiés du champ d'essai de Kernza®.	37
Tableau 8 : Ensemble des opérations culturales réalisées sur le champ d'essai de Kernza®...	39
Tableau 9 : Données issues de l'utilisation de la Table de Moore pour la quantification des stades de développement de Kernza®.....	56
Tableau 10 : Résultats du test SNK du nombre de talles par m ² en fonction de la date de prélèvement.	58
Tableau 11 : Résultats des tests SNK du nombre de talles pas m ² en fonction de la date de prélèvement pour chaque modalité de fertilisation azotée.	59
Tableau 12 : Résultats du test SNK du nombre de talles par m ² en fonction de la fertilisation azotée.....	60
Tableau 13 : Résultats du test SNK du nombre d'épis par m ² en fonction de la fertilisation azotée.....	61
Tableau 14 : Résultats du Test SNK de la hauteur des plantes (cm) en fonction de la fertilisation azotée pour les deux dates de prélèvement (18-06-18 et 30-07-18).	61
Tableau 15 : Résultats du Test SNK de la longueur des épis (cm) en fonction de la fertilisation azotée pour les deux dates de prélèvement (18-06-18 et 30-07-18).....	63
Tableau 16 : Résultats des tests SNK de la biomasse aérienne totale (poids sec (g/m ²)) en fonction de la fertilisation azotée pour les trois stades de prélèvements.	64
Tableau 17 : Biomasse aérienne totale (poids sec (g/m ²)) du froment au stade floraison.....	65
Tableau 18 : Résultats des tests SNK de la biomasse des épis (poids sec (g/m ²)) en fonction de la fertilisation azotée pour le stade épiaison et floraison.	66
Tableau 19 : Biomasse des épis (poids sec (g/m ²)) du froment au stade floraison.....	66
Tableau 20 : Répartition de la biomasse racinaire de Kernza® et du froment sur 90cm.....	71

Table des annexes

Annexe 1: Statistiques descriptives du nombre de plantules par m² en fonction de la répétition dans la parcelle de Kernza®.

Annexe 2: Statistiques descriptives du nombre d'adventices par m² en fonction de la date d'échantillonnage dans la parcelle de Kernza®.

Annexe 3: Statistiques descriptives du nombre d'adventices par m² en fonction de l'espèce cultivée.

Annexe 4 : Echelle BBCH améliorée des stades phénologiques des céréales (froment, blé = *Triticum* sp. L., orge = *Hordeum vulgare* L., avoine = *Avena sativa* L., seigle = *Secale cereale* L.) (Witzenberger *et al.* 1989 ; Lancashire *et al.* 1991).

Annexe 5: Stades de développement de Kernza® (selon l'échelle BBCH) tout au long de la saison.

Annexe 6 : Table de Moore (1991), n = numéro de l'événement (nombre de feuilles ou de nœuds), N = nombre d'événements dans le stade (nombre total de feuilles ou de nœuds développés).

Annexe 7: Ensemble des stades de développement de Kernza® suivis selon la table de Moore sur la saison.

Annexe 8 : Ecart-types du nombre de talles par m² en fonction de la fertilisation azotée et de la date de prélèvement.

Annexe 9 : Ecart-types du nombre d'épis par m² en fonction de la fertilisation azotée et de la date de prélèvement.

Annexe 10: Statistiques descriptives de la hauteur des plantes (cm) en fonction de la fertilisation azotée et de la date de prélèvement.

Annexe 11: Résultats du test SNK de la hauteur des plantes (cm) de Kernza® en fonction de la date de prélèvement pour les fumures confondues.

Annexe 12: Résultats du test SNK de la hauteur des plantes (cm) de Kernza® en fonction de la fertilisation azotée pour les deux dates de prélèvement confondues.

Annexe 13 : Statistiques descriptives de la longueur des épis (cm) en fonction de la fertilisation azotée et de la date de prélèvement.

Annexe 14: Résultats du test SNK de la longueur des épis (cm) de Kernza® en fonction de la date de prélèvement pour les fertilisations confondues.

Annexe 15: Résultats du test SNK de la biomasse des épis sur la biomasse aérienne totale en fonction de la fertilisation azotée pour le stade épiaison.

Annexe 16: Résultats du test SNK de la biomasse des épis sur la biomasse aérienne totale en fonction de la fertilisation azotée pour le stade floraison.

Annexe 17: Résultats du test SNK de la biomasse des épis sur la biomasse aérienne totale en fonction du stade de prélèvement.

Annexe 18: Biomasse des épis sur la biomasse aérienne totale du froment au stade floraison dans les parcelles bordant le champ de Kernza®.

Annexe 19: Composantes de la valeur alimentaire de Kernza® sous différentes fertilisations azotées et à différents stades de développement.

Annexe 20: Biomasse racinaire (g/m²) de Kernza® et du froment sur 90cm.

Annexe 21: Biomasse racinaire (poids sec (g/m²)) de Kernza® sous différentes fertilisations azotées.

1 Introduction

Dans le monde, les cultures annuelles sont majoritaires avec une production de céréales qui occupait, en 2000, plus de la moitié de la surface agricole mondiale (Schendel *et al.*, 2015). Concernant la production belge, selon STATBEL (2017), en 2016, la surface cultivée en blé (*Triticum aestivum* L.) était de 204 690ha. Suivant les données présentées par Delcour *et al.* (2014) on constate que le froment d'hiver représente environ un tiers des surfaces cultivées en Wallonie et possède un rendement avoisinant les 7,4T en grains par hectare, en plus d'un rendement en paille de 3T par hectare. Toutefois, cette valeur est à nuancer, car d'après les auteurs de l'article, ces moyennes de rendements masquent de fortes disparités entre les zones de production, avec des rendements en grains qui s'étalent de 9T/ha en Région limoneuse à 4,9T/ha en Haute Ardenne.

Peu de cultures pérennes sont présentes en Belgique outre les prairies permanentes qui occupaient 477 570ha en 2016 (STATBEL, 2017). Pourtant, l'utilisation de céréales pérennes est une piste à explorer. Par céréale pérenne, on entend une culture qui une fois implantée persiste pendant plusieurs années et procure un rendement annuel en grains. La pérennité est un moyen de réduire les coûts d'implantation (réduction du travail du sol et la quantité de semences). En outre, deux débouchés différents sont prodigués : la production de fourrages venant en complément au rendement en grains. Comme le mentionnent Jaikumar *et al.* (2012), les céréales pérennes procurent des services éco systémiques (gain de matière organique, conservation du sol, diminution des engrais, ...) par rapport aux annuelles et particulièrement sur les sites érodibles et marginaux. DeHaan & Van Tassel (2014) ajoutent que ce type de culture constitue une stratégie pour répondre aux problèmes de dégradation de la terre, de sécurité alimentaire, d'approvisionnement en énergie et de changement climatique.

En Australie ou en Amérique, l'intérêt portant sur l'utilisation de cultures pérennes n'a fait qu'augmenter ces dernières années. En effet, dans ces régions du monde, des problèmes climatiques, topographiques ou de sol apparaissent, comme pour la région du sud-est de l'Australie où historiquement, la production de céréales était faible. D'après Hochman *et al.*, (sd), la moyenne australienne des rendements en blé se situe aux alentours de 1,7T/ha. Y adapter des espèces annuelles très productives demeure un défi et les cultures pérennes pourraient être plus appropriées pour ces conditions, elles constituent un outil afin de gérer les sécheresses persistantes. Celles-ci contribuent à la conservation de l'eau, du sol et à l'amélioration de la rentabilité des fermes (augmentation de la capacité de charge en bétail et de la productivité) qui peuvent, en plus de la production des grains, jouir du pâturage. D'ailleurs, le développement initial des systèmes pérennes de céréales proviendrait de cette région du sud-est de l'Australie qui est dominée par les systèmes de pâturage permanent. Les cultures annuelles céréalières au stade végétatif y sont de plus en plus utilisées pour produire un fourrage d'hiver valorisable pour le bétail au moment où la croissance des prairies est limitée. Ensuite ces cultures sont récoltées pour le grain. Dans les Grandes Plaines américaines, les rendements en blé d'hiver sont inférieurs à 3T/ha selon les données de l'USDA (USDA (National agricultural Statistics service), sd). En outre, les risques d'érosion éolienne y sont importants. Dans les années 30, un énorme nuage de poussière, le « Dust bowl », a emporté la couche arable de plus de 40 millions d'hectares. Ce nuage a été la

résultante de pratiques agricoles inappropriées, laissant le sol sans couverture végétale, et d'une sécheresse persistante (Taylor, 2012). Dans ces régions, il est primordial de trouver des cultures rendant des services éco systémiques pour une agriculture plus durable (Cox *et al.*, 2010; Hayes *et al.*, 2012 ; Newell & Hayes, 2017).

En Belgique, introduire une céréale pérenne permettrait de contribuer à l'autosuffisance alimentaire des exploitations agricoles vivant d'élevage en leur apportant une source alimentaire par le fourrage tandis que les grains, eux, pourraient être vendus ou aplatis pour le bétail. Actuellement, en Amérique, les rendements en grains n'atteignent pas le niveau de rendements des blés conventionnels. Cependant, cette culture pourrait être rentable par la réduction des coûts de production provenant, notamment, de ses différents avantages écologiques (Culman *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2015; Pugliese, 2017).

2 Revue de la littérature scientifique

Les informations présentées dans ce travail sont issues d'articles scientifiques provenant de diverses régions du monde (Amérique, Australie, ...). L'ensemble de ces informations ne sera donc pas forcément transposable aux conditions pédoclimatiques de l'Europe de l'ouest.

2.1 *Thinopyrum intermedium*

2.1.1 Origine géographique

La graminée *Thinopyrum intermedium* (Host) Barkworth & D.R. Dewey provient des steppes Eurasiennes, elle est donc native des basses ceintures montagneuses de l'Europe du sud jusqu'au Moyen Orient et du sud de l'ancienne Union soviétique jusqu'à l'ouest du Pakistan (Jaikumar *et al.*, 2013; Jensen *et al.*, 2016).

2.1.2 Classification

Une classification de *Th. intermedium* est proposée par la base de données canadienne des plantes vasculaires (VASCAN). Celle-ci est basée sur la classification faite par Chase & Reveal (2009) afin d'accompagner la classification APG III. Tandis que la classification de Cronquist a été utilisée dans la flore américaine (Barkworth *et al.*, 2007) ainsi que par le service de conservation des ressources naturelles de l'USDA (USDA (Natural Resources Conservation Service), sd). Ces deux classifications sont présentées sur le Tableau 1.

Tableau 1 : Classifications de l'espèce *Thinopyrum intermedium*.

Classification	Chase & Reveal (2009)	Cronquist
Division		<i>Magnoliophyta</i> (Angiospermes)
Classe	<i>Equisetopsida</i>	<i>Liliopsida</i> (Monocotylédones)
Sous classe	<i>Magnoliidae</i>	<i>Commelinidae</i>
Super ordre	<i>Liliana</i>	
Ordre	<i>Poales</i>	<i>Cyperales</i>
Famille	<i>Poaceae</i>	<i>Poaceae</i>
Sous famille	<i>Pooideae</i>	<i>Pooideae</i>
Tribu	<i>Triticeae</i>	<i>Triticeae</i>
Sous tribu	<i>Triticinae</i>	
Genre	<i>Thinopyrum</i> Á Löve	<i>Thinopyrum</i> Á Löve
Espèce	<i>Thinopyrum intermedium</i> (Host) Barkworth & D.R. Dewey	<i>Thinopyrum intermedium</i> (Host) Barkworth & D.R. Dewey
Sous espèce	<i>Thinopyrum intermedium</i> (Host) Barkworth & D.R. Dewey subsp. <i>intermedium</i>	<i>Thinopyrum intermedium</i> (Host) Barkworth & D.R. Dewey subsp. <i>intermedium</i>
	<i>Thinopyrum intermedium</i> subsp. <i>barbulatum</i> (Schur) Barkworth & D.R. Dewey	<i>Thinopyrum intermedium</i> subsp. <i>barbulatum</i> (Schur) Barkworth & D.R. Dewey

Selon Jensen *et al.* (2016), l'espèce *Th. intermedium* est constituée de deux types, pubescent et glabre. En effet, le traitement de l'agropyre intermédiaire dans la flore nord américaine (Barkworth *et al.*, 2007) a reconnu ces deux sous-espèces : subsp. *intermedium*, type glabre et subsp. *barbulatum*, type pubescent. Aucune collection de l'USDA de *Th. intermedium* subsp. *barbulatum* n'est active. Tandis qu'actuellement, il y a 269 collections desquelles 219 sont désignées comme collections actives (semences disponibles) de *Th. intermedium* subsp.

intermedium. La différence entre ces deux types n'est pas toujours faite puisque des semences commercialisées de variétés fourragères (voir point 2.1.4) contiennent souvent les deux formes (pubescente et glabre) comme le signalent Ogle *et al.* (2011).

2.1.3 Synonymes

Thinopyrum intermedium (Host) Barkworth & D.R. Dewey subsp. *intermedium* possède différents synonymes :

- *Agropyron glaucum* var. *intermedium* (Host) Beck,
- *Ag. intermedium* (Host) P. Beauvois,
- *Ag. intermedium* subsp. *trichophorum* (Link) Ascherson & Graebner,
- *Ag. intermedium* var. *trichophorum* (Link) Halácsy,
- *Ag. trichophorum* (Link) K. Richter,
- *Elymus hispidus* (Opiz) Melderis,
- *Elytrigia intermedia* (Host) Nevski
- ...

En français, on la nomme agropyre intermédiaire tandis qu'en anglais, on retrouve fréquemment cette plante sous le nom « intermediate wheatgrass » (IWG) (VASCAN, 2018a).

Th. intermedium subsp. *barbulatum* (Schur) Barkworth & D.R. Dewey possède également différents synonymes :

- *Agropyron glaucum* var. *barbulatum* (Schur) K. Richter
- *Ag. intermedium* subsp. *elongatum* (Grisebach) Anghel & Morariu
- *Elymus hispidus* subsp. *barbulatus* (Schur) Melderis
- *Elytrigia intermedia* subsp. *barbulata* (Schur) Á. Löve
- ...

En français, son nom vernaculaire est agropyre à lemme pubescente et en anglais on la nomme « pubescent wheatgrass » (VASCAN, 2018b).

Le terme « wheatgrass » montre bien que ces deux sous espèces de graminée sont génétiquement apparentées au blé annuel (*Triticum aestivum* L.). En outre, en Europe, *Th. intermedium* forme des hybrides stériles avec le chiendent (*Elymus repens* (L.) Gould) (Hayes *et al.* , 2012 ; Zhang *et al.*, 2016; Barkworth *et al.*, 2007).

2.1.4 Utilisation

Th. intermedium a d'abord été introduite en Amérique dans les années 1930 (Nord-ouest et quelques zones plus à l'est) pour le contrôle de l'érosion, la revégétalisation et la production de fourrages. Son avantage est qu'elle s'établit rapidement dans beaucoup d'habitats différents et se développe dans des zones sèches avec des sols sableux ou rocaillieux (Wagoner, 1994; Barkworth *et al.*, 2007).

Actuellement, comme le dit Pugliese (2017), *Th. intermedium* est communément cultivée en tant que fourrage dans les Grandes Plaines et dans les régions montagneuses de l'ouest des Etats-Unis et Zhang *et al.* (2016) ajoutent qu'en produisant beaucoup de biomasse, elle fait partie des espèces fourragères « de saison fraîche » les plus productives. Selon Jensen *et al.*

(2016), elle a permis d'augmenter la productivité des terres marginales non adaptées au brome inerme (*Bromus inermis* Leyss.) et au dactyle (*Dactylis glomerata* L.). Un travail d'amélioration et de sélection pour les caractéristiques nutritionnelles et le rendement fourrager a été réalisé afin de créer des variétés fourragères. Les premières ont pu être lancées dès 1945. Aujourd'hui, les semences certifiées des différents cultivars sont disponibles à partir d'organismes publics ou commerciaux. Chacun de ces cultivars est bien caractérisé (rendements, qualités, adaptations, ...). Le type pubescent est légèrement plus résistant à la sécheresse et à la rudesse de l'hiver que le type glabre (Kruger, sd; Ogle, 2001; Ogle *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2016).

En parallèle à son utilisation fourragère, *Th. intermedium*, et plus précisément la sous espèce *intermedium* (*Th. intermedium* subsp. *intermedium*), est entrain d'être développée comme nouvelle culture céréalière pérenne par son bon potentiel. En effet, Pugliese (2017) fait remarquer que cette espèce possède beaucoup d'attributs comparativement à d'autres cultures pérennes de graminées comme la maturité synchrone des épis ou le faible taux d'égrenage pouvant ainsi produire de bons rendements. En outre, Marti *et al.* (2016) affirment que les dernières lignées sélectionnées possèdent un ensemble de traits agronomiques désirables : haut rendement en biomasse aérienne, résistance à la sécheresse et au froid, longue saison de croissance et donc biomasse racinaire importante, résistance à de multiples maladies,...

L'espèce est inter fertile avec le blé annuel (*Triticum aestivum* L.) et peut ainsi être utilisée dans les programmes d'amélioration du blé puisqu'elle constitue une bonne source de résistance à de multiples maladies communes du blé (Jaikumar *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2015, 2017; Marti *et al.*, 2016).

2.1.5 Diversité génétique

Selon Mahelka *et al.* (2011), il y a une hétérogénéité génomique dans l'espèce *Thinopyrum intermedium*, elle est capable d'hybridation avec plusieurs autres graminées de la tribu des *Triticeae* comme le blé. Ainsi, des transferts de matériels génétiques par un croisement extensif et l'introgression de *Th. intermedium* avec d'autres graminées peuvent avoir enrichi de façon importante le pôle génétique de l'espèce. Selon Wang *et al.* (2015), un désaccord persiste vis-à-vis de l'origine des différents génomes au sein de l'espèce dans la littérature scientifique. Cependant, celui-ci a trouvé que l'agropyre intermédiaire consisterait en deux génomes ancestraux J^b et J^c de *Thinopyrum bessarabicum* (Savul. & Rayss) Á. Löve et *Thinopyrum elongatum* (Host) D. R. Dewey respectivement ainsi qu'un génome *St* présent dans les espèces du genre *Pseudoroegneria*.

Th. intermedium est caractérisée par une faible histoire de sélection. Des variations entre les différentes accessions sont présentes au sein de cette graminée pérenne. Concernant les cultivars fourragers, certains possèdent des traits spécifiques pour l'amélioration des lignées de *Th. intermedium* en augmentant la qualité du fourrage, le potentiel de rendement ou la résistance au pâturage lors des sélections. Concernant la sélection des lignées pour la production céréalière, celle-ci est beaucoup plus récente et les populations ne sont pas encore stabilisées. Des variations de longévité, de hauteur de plantes ou encore de poids des grains sont présentes. Actuellement le Land Institute, au Kansas, est au moins à son 8^e cycle de

sélection (TLI-C8). Au sein de la population issue du 3^e cycle (TLI-C3), la variation pour la taille de la plante était de l'ordre du triple et pour le poids de l'épi celui-ci pouvait être jusqu'à 14 fois plus grand pour les épis les plus gros par rapport aux épis les plus petits. Pour certaines familles de *Th. intermedium*, le poids d'un grain était supérieur à 9mg tandis que pour d'autres la moyenne était à 7,5mg (Larkin *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2016; Jungers *et al.*, 2017).

2.1.6 Caractérisation

Th. intermedium est une graminée C3 à pollinisation croisée par le vent et occasionnellement par les insectes, hexaploïde ($2n = 6x = 42$) et pérenne (Kruger, sd; Trlica, 2013; Wang *et al.*, 2015; Jensen *et al.*, 2016).

- Caractéristiques morphologiques

L'USDA a publié une sorte de guide botanique rédigé par Ogle *et al.* (2011), les caractéristiques morphologiques de l'espèce y sont décrites. Du fait de son utilisation fourragère, celles-ci sont bien utiles, l'adaptation à l'environnement, le mode de gestion et les différents cultivars y sont également référencés. L'illustration des principales caractéristiques morphologiques est présente sur la Figure 1, celle-ci est tirée de la Flore nord-américaine (Barkworth *et al.*, 2007).

- Partie aérienne

- i. Plante souvent glauque, feuilles vertes à bleues-vertes (Barkworth, 2007; Ogle *et al.*, 2011).
- ii. Tiges de 50 à 115cm, glabres ou velues, parfois seulement velues au niveau des nœuds. Selon Wagoner (1995) cité par Pugliese (2017) la hauteur de la plante peut atteindre 150cm et ses tiges sont rigides (Barkworth *et al.*, 2007; Ogle *et al.*, 2011).
- iii. Entre-nœud le plus bas (avec la gaine) épais de 3-5mm (Barkworth *et al.*, 2007).
- iv. Gaines généralement glabres, parfois ciliées sur les bords, oreillettes de 0,5-1,8mm, ligules de 0,1-0,8 mm (Barkworth *et al.*, 2007).
- v. Feuilles de 2 à 8mm de large, planes, et parfois tombantes. Face abaxiale (supérieure) glabre, en général, quelques poils rigides (strigose) sur la face adaxiale (inférieure), parfois ensemble de poils avec diverses tailles. 7 à 30 nervures, non proéminentes, bords blanchâtres et plus larges que les veines (Barkworth *et al.*, 2007; Ogle *et al.*, 2011).
- vi. Nombre de talles important, plus élevé qu'un blé annuel (Gazza *et al.*, 2016).
- vii. Epis de 8 à 21cm de longueur, dressés ou lâches, entre-nœuds de 7-12 mm, rachis glabres ou poilus, rugueux sur les bords, particulièrement distaux et non désarticulés à maturité (Barkworth *et al.*, 2007). de Oliveira *et al.* (2018) rapportent qu'ils peuvent contenir plus de grains mais la taille actuelle des grains est aux alentours d'1/5^e de la taille de ceux des blés conventionnels. En effet, Pugliese (2017) dit que les graines sont visuellement similaires au blé mais de taille plus petite. Gazza *et al.* (2016) signalent que les grains vêtus possèdent des glumes très adhérentes à ceux-ci.
- viii. Epillets de 11-18mm, avec 3 à 10 fleurons, en général, moins de 7 fleurons. Désarticulation sous les fleurons (Barkworth *et al.*, 2007; Ogle *et al.*, 2011).

- ix. Glumes oblongues, glabres et principalement lisses, ou strigose de poils 1-1,5mm souvent distribués de façon non homogène, carénées faiblement et de façon distale, carènes rugueuses, nervures centrales souvent plus proéminentes et longues que les nervures latérales, bords non hyalins ou seulement près des apices, apices tronquées obliquement ou obtus à aigus, parfois mucronés (Barkworth *et al.*, 2007).
 - i. Glumes inférieures de 4,5 à 7,5mm de long, larges de 1,5 à 2,5mm, 5 à 6 nervures (Barkworth *et al.*, 2007).
 - ii. Glumes supérieures de 5,5 à 8,5mm de long, larges de 2-3 mm, 5 à 7 nervures (Barkworth *et al.*, 2007).
- x. Lemmes de 7,5-10mm, glabres ou avec des poils de 1-1,5mm, généralement distribués de façon non-homogène, parfois seulement sur la proportion extérieure du lemme, apices occasionnellement aristées, barbes jusqu'à 5mm (Barkworth *et al.*, 2007).
- xi. Paléoles de 7-9,5mm, carènes souvent rugueuses pour la moitié de leur longueur (Barkworth *et al.*, 2007).
- xii. Anthères de 5-7mm (Barkworth *et al.*, 2007).

La sous-espèce *intermedium* possède des glumes glabres, lisses ou rugueuses sur une ou plusieurs nervures. Les lemmes sont généralement glabres, parfois avec des poils sur les bords. Tandis que la sous-espèce *barbulatum* peut être distinguée de la première par ses glumes généralement entièrement velues, parfois simplement rugueuses sur les nervures. Ses lemmes sont entièrement hirsutes, parfois seulement sur les bords, poils de 1-1,5mm (Barkworth *et al.*, 2007).

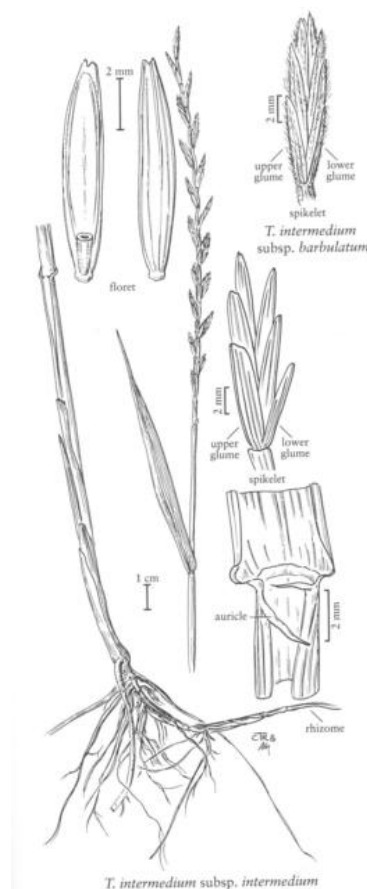


Figure 1 : *Thinopyrum intermedium* ©Barkworth, 2007.

- Partie souterraine

Les rhizomes sont courts et le système racinaire nourricier est profond, allant jusqu'à 3m de profondeur (Ogle *et al.*, 2011). Comme ajoutent de Oliveira *et al.* (2018), c'est plus du double de la profondeur du blé annuel et la densité de ce système est également plus importante. Grâce à sa persistance sur plusieurs années, une graminée pérenne peut mettre en place un important système racinaire. Crews *et al.* (2016) signalent que cette augmentation de l'allocation souterraine est liée à une pénétration plus profonde des racines dans le sol. Au nord des Grandes Plaines des USA, Sainju *et al.* (2017a) ont montré que sous des conditions sèches, *Th. intermedium* possède une plus grosse biomasse racinaire sur 120cm que *Bromus inermis* L. et *Panicum virgatum* L. lui permettant ainsi de bonnes performances (meilleure capture de l'eau et des nutriments) et plus d'apports en carbone dans le sol. La moyenne de la biomasse racinaire sur 3 ans (plantes âgées de 2 à 4 ans) était de 16T/ha. La différence avec le blé de printemps en fin de culture est marquante où la biomasse racinaire pour *Th. intermedium* âgé de 2 ans est 6 fois plus importante.

2.2 Développement des cultures pérennes

Actuellement, des programmes pour la recherche et le développement des cultures pérennes ont été initiés dans différents pays comme l'Argentine, l'Australie, la Chine, l'Inde, la Suède et les USA. Le but est d'identifier, d'améliorer et d'utiliser comme culture des espèces pérennes ou des populations hybrides dérivées de parents annuels et pérennes. Nous pouvons citer le riz, le maïs, le blé, le sorgho, le pois d'Angole ainsi que des cultures oléagineuses dérivant des familles de la moutarde, du tournesol ou du lin. Ces cultures pourraient être utilisées en alimentation ou encore converties en biocarburants (Glover *et al.*, 2010).

En 2010, il a été estimé qu'en 20 ans, des cultures de céréales pérennes commercialement viables seraient disponibles. Pour leur développement, deux techniques différentes sont utilisées. La première consiste en une hybridation entre une céréale annuelle et une espèce pérenne proche tandis que la deuxième option est la domestication directe de la plante pérenne sauvage (Glover *et al.*, 2010 ; DeHaan *et al.*, sd).

2.2.1 Développement de céréales pérennes par large hybridation

La large hybridation consiste en un croisement entre une céréale annuelle comme le blé (*Triticum aestivum* L.) avec une espèce parente pérenne. Les descendants de ces croisements sont ensuite améliorés. Une série de rétrocroisements peuvent être effectués, des gènes de croissance pérenne doivent être introgressés tout en conservant un phénotype ressemblant au parent annuel. En effet, les gènes contrôlant les traits intéressants des cultures annuelles doivent être disponibles dans l'espèce pérenne créée : rendement, taille du grain, facilité de battage et qualité. En addition aux traits de persistance dans le temps, les espèces pérennes peuvent amener des traits de qualités ou encore différentes résistances aux maladies (DeHaan *et al.*, sd; Doussinault *et al.*, 2001; Hayes *et al.*, 2012, 2018; Dehaan & Van Tassel, 2014).

Selon Cox *et al.* (2010) lorsqu'il y a un croisement, les nombres différents de chromosomes des deux parents, le manque d'homologie chromosomique ou d'autres facteurs peuvent causer la stérilité et restreignent les recombinaisons génétiques dans les descendants. Pour contrer cette stérilité, des amphiploïdes sont créés, cependant, leur stabilisation peut être longue. Ces

amphiploïdes devraient aider à comprendre la transmission de la pérennité : nombre de génomes des deux parents et pourcentage de chromosomes du parent pérenne nécessaires dans la descendance. Concernant le blé, le défi de ces hybrides est d'avoir une stabilité cytogénétique en préservant la pérennité et les traits de domestication. Le manque de pérennité reste le plus gros problème (DeHaan *et al.*, sd; Doussinault *et al.*, 2001; Hayes *et al.*, 2012, 2018; Dehaan & Van Tassel, 2014).

Cette pratique n'est pas récente puisque la Russie a déjà effectué ce genre de croisements dans les années 20. Ces hybrides ont souffert de différents problèmes lors de la période s'étalant de 1920 à 1980 où ils étaient instables d'un point de vue méiotique, manquaient de fertilité, les rendements diminuaient après la première année et un nouveau semis était nécessaire après 2 ou 3 ans. En outre, une série de traits agronomiques non désirables étaient présents comme une petite taille de grains, des tendances à la verse, une résistance à l'hiver réduite et un taux de mortalité élevé. De vraies formes de blés hybridés avec une graminée pérenne n'avaient jamais été développées et les efforts étaient limités par manque de technologies et de temps. Plus récemment des efforts de développement de cultures céréalières pérennes ont été faits indépendamment par le « Land Institute » et l'Université de l'Etat de Washington. Depuis 2001, un travail de développement d'un blé pérenne (*Agrotriticum*) en croisant différentes espèces de blé (*Triticum* spp.) avec différentes espèces pérennes du genre *Thinopyrum* (*Th. ponticum* (Podp.) Z.W.Liu & R.R.-C. Wang, *Th. junceiforme* (Á. Löve & D. Löve) Á. Löve, ...) a été réalisé. En outre, des tests ont également été réalisés sur les croisements d'espèces *Thinopyrum* avec le seigle (*Secale cereale* L.) ou le triticales (\times *Triticosecale* WITTM. ex A. CAMUS). Concernant *Agrotriticum*, quelques lignées stables avec une paire de chromosomes de *Thinopyrum* (12-14) et 42 chromosomes de blé ont pu être obtenues. Celles-ci ont de meilleures performances agronomiques au Kansas que les autres matériels mais il y a toujours un manque de pérennité. Des croisements entre le blé dur d'hiver (*Triticum durum* Desf.) et *Thinopyrum intermedium* ont été développés récemment, ils sont prometteurs en terme de pérennité, poids de grains, résistance à l'hiver et vigueur (DeHaan *et al.*, sd; Doussinault *et al.*, 2001; Hayes *et al.*, 2012, 2018; Dehaan & Van Tassel, 2014).

2.2.2 Développement de céréales pérennes par domestication directe

La domestication directe de plantes pérennes est caractérisée par un nombre répété de cycles de sélection pour atteindre un type domestique à haut rendement. Un des avantages est que ces populations de plantes pérennes sont normalement vigoureuses. Cependant, la variabilité génétique nécessaire pour la domestication de ces espèces peut faire défaut, ou le nombre d'années de sélection permettant d'atteindre les traits domestiques adéquats (rendement, taille de grains, ...) peut être important. Cette méthode est celle qui est utilisée pour le développement de *Th. intermedium* subsp. *intermedium* en tant que culture céréalière pérenne. Le « Land Institute » lui a donné un nom : Kernza®. Celui-ci représente le nom commercial des semences provenant de la domestication menée par l'institut. Tandis que le Centre de recherche Rodale en Pennsylvanie (USA) utilise le terme « Wild Triga » pour nommer cette plante. « Triga » dérive d'*Elytrigia*, nom scientifique de l'espèce qui est parfois utilisé en Europe (DeHaan *et al.*, sd; Wagoner, 1994; Glover *et al.*, 2010; Dehaan & Van Tassel, 2014; Marti *et al.*, 2016).

En 1983, l'Institut Rodale (Rodale Research Center), Kutztown, Pennsylvanie a initié la domestication de *Thinopyrum intermedium* parmi une centaine d'espèces de graminées pérennes évaluées pour leur potentiel de production de grains tout en procurant des services éco systémiques. L'évaluation était basée sur différents critères : croissance pérenne vigoureuse, battage facile, grands grains, maturité des grains synchronisée, résistance à l'égrenage, résistance à la verse, facilité de récolte mécanique et bon goût de la farine. En 1988 et en collaboration avec les scientifiques du département de l'agriculture aux USA (USDA) 2 cycles de sélection ont été effectués pour un large index de traits. Le « Land Institute » a commencé à travailler avec cette espèce en 2001 en reprenant le précédent travail de sélection de l'Institut Rodale. Depuis 2003, une sélection récurrente phénotypique basée surtout sur les rendements et les composantes de rendements (masse des grains, rendements par surface de la parcelle, ...) a été réalisée. Ensuite, une sélection massale pour cibler directement le poids des grains a également été faite permettant d'accélérer le progrès. Cependant, de nombreuses années restent nécessaires afin d'obtenir un rendement similaire au blé (*Triticum aestivum* L.) (DeHaan *et al.*, 2016, sd; Zhang *et al.*, 2017).

Le développement d'outils moléculaires pour Kernza® semble essentiel pour accélérer la domestication en augmentant l'efficacité de la sélection et la réduction du nombre de cycles de sélection. L'utilisation du génotypage par séquençage a permis d'identifier des marqueurs à large génome. Des QTL ont également été identifiés en utilisant les données phénotypiques. Un des défis de la sélection assistée par la génomique est l'existence d'un large génome polyploïde rendant cette sélection assez complexe. Actuellement le « Land Institute » n'est pas l'unique institution travaillant sur cette graminée. L'Université du Minnesota et l'Université de Manitoba, au Canada, poursuivent également des efforts de sélection pour améliorer le rendement en grains, la fertilité, la taille du grain, le battage, la résistance à l'égrenage, la résistance à la verse, la diminution de la propagation des plantes et développent des cultivars pour les fermiers. De plus, des recherches agronomiques sont menées pour identifier des méthodes d'amélioration et de maintien des rendements avec de faibles intrants tout en documentant les potentiels services éco systémiques de la culture. Le travail additionnel plus récent s'appuie aussi sur les qualités de mouture et de cuisson. Le grain de Kernza® a l'avantage d'avoir des qualités assez similaires au blé. De plus, la variabilité génétique au sein des populations de *Th. intermedium* est assez large et offre la possibilité de développer des variétés avec différentes caractéristiques technologiques des grains. Celles-ci permettraient l'obtention de produits tels que le pain, les pancakes ou la bière sur base de la seule espèce (*Th. intermedium* subsp. *intermedium*, Kernza®) ou en mélange avec le blé. Comme le dit Lubofsky (2016) une bière commercialisée existe déjà aux USA et se nomme « Long Root Ale » (DeHaan *et al.*, 2016, sd ; Zhang *et al.*, 2017).

2.3 *Thinopyrum intermedium*, Kernza® comme culture céréalière pérenne

2.3.1 Particularités

a) Allocation des ressources

Th. intermedium se propage via la production de talles, de rhizomes et de semences. A l'état sauvage, la survie des plantes pérennes sur plusieurs années dépend surtout des structures vivaces et moins des grains contrairement aux espèces annuelles. Ainsi, il y a un partage des ressources entre les organes pérennes et les grains, une partie significative des produits photosynthétiques est dirigée vers les racines et les tissus verts. Gazza *et al.* (2016) nous font par exemple remarquer que *Th. intermedium* possède un tallage et une hauteur de plante plus importants que le blé. Au Michigan Culman *et al.* (2013) indiquent que les plantes de Kernza® âgées de 2 ans ont alloué peu de ressources aux grains, l'indice de récolte était seulement de 0,1 (biomasse des grains/biomasse aérienne totale) contre 0,5 pour le blé annuel. Les espèces pérennes ont également de plus grosses biomasses racinaires et rhizomateuses. Le ratio racines/pousses aériennes est accru comme cela a été montré par Sainju *et al.* (2017a) au Minnesota où la biomasse racinaire de Kernza® était bien plus importante que celle d'un blé de printemps. Le ratio racines/pousses aériennes du blé était de l'ordre de (0,2 – 0,3) contre (2 – 3,5) pour des plantes de Kernza® âgées de 2 à 4 ans. En outre, il est important de rappeler que les cultures modernes annuelles ont pu bénéficier d'une sélection intense et à long terme pour l'augmentation de l'allocation des photoassimilats vers les grains (Cox *et al.*, 2006; Larkin *et al.*, 2014; Gazza *et al.*, 2016).

Au Michigan, Jaikumar *et al.*, (2013) ont comparé certains traits liés à la photosynthèse entre *Th. intermedium* et un blé annuel. Pour ce faire, l'assimilation photosynthétique de CO₂, sur base de la surface foliaire, a été mesurée sur les dernières feuilles grâce à un système échangeur de gaz. Les mesures ont été réalisées à la mi-saison, lorsque le blé annuel entre en stade reproducteur. La chlorophylle a été mesurée tandis que les protéines solubles de la feuille ont été extraites puis mesurées par absorbance. La carboxylation, l'utilisation de triose phosphate et le taux de transport par électrons ont été estimés par modélisation. L'assimilation photosynthétique de CO₂ de *Th. intermedium* a été plus élevée que le blé annuel et celle-ci est associée à une plus grande carboxylation, utilisation de triose-phosphate, taux de transport des électrons et plus de chlorophylle et de protéine solubles dans les feuilles. Les jeunes plantes de *Th. intermedium*, âgées d'un an, ont eu une assimilation photosynthétique de CO₂, une utilisation de triose-phosphate, une carboxylation et un taux de transport d'électrons plus élevés que les plantes plus âgées (2 ans). Ainsi, l'assimilation de CO₂ à la mi-saison plus élevée de *Th. intermedium* n'est pas totalement expliquée par une meilleure utilisation en eau du sol et pourrait être la conséquence d'un compromis entre l'allocation des ressources à la reproduction et l'acquisition de celles-ci par photosynthèse. *Th. intermedium* pourrait allouer plus d'azote aux feuilles que le blé annuel aux dépens d'une plus faible allocation aux grains induisant une compétition entre les tissus reproducteurs et la machinerie photosynthétique. Tandis que pour le blé annuel, la demande en azote pour le développement des tissus reproducteurs conduit à la dégradation des protéines des feuilles. Cela pourrait expliquer les différences photosynthétiques entre le blé et Kernza®.

b) Performance photosynthétique et la tolérance au froid

Jaikumar *et al.* (2016) ont démontré que sous un stress de froid, les plantes âgées de 5 ans atteignent de meilleures performances photosynthétiques que les plus jeunes plantes (assimilation photosynthétique de CO₂, utilisation du triose phosphate et capacité de carboxylation ou encore concentration en Rubisco). Sous des conditions optimales de croissance, l'inverse est observé. L'assimilation photosynthétique de CO₂ des plantes plus âgées de Kernza® diminue relativement aux plus jeunes plantes. Les capacités biochimiques pour l'assimilation du carbone sont plus faibles. En général, investir dans la résistance aux stress abiotiques se fait aux dépens d'une diminution du taux de croissance ou des performances photosynthétiques sous des conditions optimales. De plus, cela pourrait expliquer la perte de rendements des plantes avec l'âge (voir point 2.3.4 a).

En général, *Thinopyrum intermedium* bénéficie d'une haute performance photosynthétique et produit bien à des températures modérées. En outre, les feuilles émergentes de l'hiver maintiennent une production photosynthétique plus élevée sous des conditions froides que les nouvelles feuilles émergent au printemps. Les feuilles développées en automne et qui persistent tout l'hiver semblent perdre très peu de leur performance photosynthétique et s'acclimater fortement au froid (Jaikumar *et al.*, 2016).

c) Phénologie

Peu d'informations sont disponibles sur la phénologie des espèces de céréales pérennes. Pourtant, celle-ci est importante afin de connaître le potentiel de production de biomasse sur la saison qui permettra de générer un revenu supplémentaire aux grains. La différence entre l'espèce annuelle et l'équivalent pérenne peut également affecter la susceptibilité aux pathogènes et la vulnérabilité à la météo extrême. En outre, de multiples années sont nécessaires pour comprendre le potentiel de rendement en grains sur les différentes années de production (Jaikumar *et al.*, 2012).

Th. intermedium est une graminée C3 de « saison froide ». Aux Etats-Unis, cela se traduit par une croissance pendant les moments les plus frais de l'année entre 4 et 23°C. La plante pousse donc au début du printemps, dès que le sol est réchauffé et que les températures du jour favorisent son développement. Le terme « saison froide » est approprié pour les conditions climatiques des Etats-Unis car elle ne se développera pas pendant les périodes chaudes et sèches de l'été et y devient semi-dormante. Elle repousse ensuite à la fin de cette période quand les températures sont fraîches et que les précipitations augmentent l'humidité du sol (Trlica, 2013; de Oliveira *et al.*, 2018).

- Stades de développement

Moore *et al.* (1991) ont décrit les stades de développement pour les graminées pérennes fourragères et une table pour les quantifier a été créée (voir Annexe 6). Celle-ci convient bien pour *Th. intermedium* et a d'ailleurs été utilisée dans l'étude de Jungers *et al.* (2018).

- 1) Germination : ce stade englobe les événements compris entre le semis de la graine et l'émergence du coléoptile du sol. Il comprend donc l'imbibition, l'émergence de la racine, l'émergence du coléoptile, son élongation et enfin sa sortie du sol.

- 2) Végétatif : ce stade se réfère à la croissance des feuilles et leur développement. Il commence avec l'émergence de la première feuille du coléoptile. Chaque sous-stade se réfère au nombre de feuilles complètement émergées que ce soit sur le maître brin ou les talles (la différence entre les deux n'est pas faite).
- 3) Elongation : c'est le stade où l'élongation de la tige apparaît. Chaque sous-stade se réfère au nombre de nœuds palpables ou visibles sur la tige. Certaines talles sont dites stériles, plusieurs entre-nœuds vont s'allonger mais le méristème terminal étant végétatif, ces talles n'entreront pas en stade reproducteur.
- 4) Reproducteur : celui-ci commence par le gonflement traduisant l'enfermement de l'inflorescence (épis) dans la gaine de la feuille la plus haute. Ensuite, l'émergence de l'épi apparaît, celle-ci est décrite en sous-stades basés sur la proportion de l'épi qui est sortie de la gaine foliaire. La floraison et la fertilisation viennent terminer ce stade. Le développement de l'épi est basipétale, les épillets d'un même épi représentent une gamme de maturité. En outre, la floraison peut se prolonger sur plusieurs jours pour un même épi.
- 5) Maturation et développement des grains : ce stade se réfère au développement du caryopse. Il débute lorsque le caryopse est visible et se termine lorsqu'il est à maturité. Il comprend le sous-stade laiteux, pâteux mou, pâteux dur, endosperme dur et endosperme sec. La particularité du stade est que la maturité des grains varie selon leur position sur l'épi.

Dans le travail de Pugliese (2017) en Ohio, la croissance de la plante est plutôt importante de mai à juin, le développement végétatif se traduit par la prolifération de talles et de feuilles (température moyenne de 15,8°C et 158mm de pluies). La biomasse aérienne augmente de 88% sur cette période d'un mois. Ensuite, lors du passage au stade reproducteur, la biomasse aérienne reste plutôt constante, l'énergie se focalise sur le développement du grain. Cependant, un pic de hauteur de plante apparaît avec l'élongation des tiges portant l'inflorescence. En Ohio, sur un mois (juillet : température moyenne de 23,3°C et 90mm de pluies), la hauteur de la plante est passée de 50 à 150cm. Au Minnesota, Jungers *et al.* (2018) nous confirment que la fraction de biomasse allouée aux feuilles décline tandis que celle allouée aux tiges augmente avec l'accumulation des degrés jours. Cette même étude nous indique qu'il faut entre 2100 et 2500 degrés jours pour atteindre la floraison et 3500 et 3600 degrés jours pour atteindre le stade « pâte dur », idéal pour la récolte.

En Ohio, après la récolte du grain, la croissance de la plante s'est prolongée pendant deux mois et s'est arrêtée après octobre (novembre : température moyenne de 5,6°C et 57mm de pluies). Celle-ci est cependant moindre que celle du début de saison (Pugliese, 2017). En effet, au Montana quand on l'utilise pour la production de fourrages, elle a une repousse très lente après la fauche (Hybner & Jacobs, 2012). Au Kansas, de Oliveira *et al.* (2018) estiment que cette repousse consiste principalement en un développement des feuilles. Celle-ci a également été observée en Allemagne par Weik *et al.* (2002), en Australie par Newell & Hayes (2017) et en Italie où Gazza *et al.* (2016) ont constaté un pourcentage de repousse de 67% après la récolte, ce qui est plutôt élevé.

En Ohio, les racines de Kernza® ont été observées sur 20cm de profondeur. Celles-ci subissent également une dynamique saisonnière, la croissance est significative lors de la croissance végétative au printemps (augmentation de 61% de mai à juin) et ensuite elle décline tout au long du reste de l'année. La biomasse racinaire dépérit graduellement jusqu'à la fin de la saison. Il est probable que ces racines soient en continuel renouvellement et que le taux de mortalité racinaire soit plus élevé que celui de la croissance racinaire. Ainsi, cette croissance ne cesse pas, elle est juste insuffisante pour compenser le dépérissement. Cependant, ces observations ne prennent pas en compte la biomasse racinaire présente à de plus grandes profondeurs.

d) Capacité de survie sur plusieurs années

Comme le dit Larkin *et al.* (2014) un des intérêts de *Th. intermedium* est sa longévité dans le temps. Dans l'étude de Jungers *et al.* (2017) la graminée a été étudiée sur 4 années, la population de plantes n'a pas été mesurée mais les observations suggèrent que la densité n'a pas diminué, puisque la production de biomasse est restée relativement stable. Au Montana, lorsque la plante est utilisée pour la production de semences de variétés fourragères, celle-ci peut produire pendant 7 à 10 ans (Hybner & Jacobs, 2012).

2.3.2 Services éco systémiques

a) Résistance aux maladies

Th. intermedium est une source de résistance au piétin verse (*Oculimacula yallundae* (Wallwork & Spooner) Crous & W. Gams et *O. acufomis* (Boerema, R. Pieters & Hamers) Crous & W. Gams), à la rouille brune (*Puccinia triticina* Eriks.), à la rouille jaune (*Puccinia striiformis* Westend.), à l'oïdium (*Blumeria graminis* (D.C.) E.O. Speer), à la jaunisse nanisante de l'orge (BYVD) transmise par les pucerons (essentiellement *Rhopalosiphum padi* L.) ou encore à la mosaïque des stries du blé (WSMV) transmis par *Aceria tosichella* Keifer (WCM) (Arvalis (Institut du végétal), sd; Hongjie & Wang, 2009).

Bien que résistante à de multiples maladies communes des céréales cultivées, *Th. intermedium* présente des sensibilités à divers pathogènes. Dans les sols secs des Grandes Plaines nord-américaines ou d'Australie, le champignon ascomycète *Cochliobolus sativus* (S. Ito & Kurib.) Drechs. ex Dastur, forme téléomorphe de *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoem. est présent. Celui-ci forme des tâches helminthosporiennes sur les feuilles de *Th. intermedium* et des pourritures racinaires. Nous pouvons également citer *Ustilago spgazzinii* Hirschh. et *Ustilago hypodytes* [Schlect.] FR., deux maladies du charbon. Cependant, des résistances à ces champignons existent chez *Th. intermedium* subsp. *intermedium*. En effet, il est important de préciser que lorsque l'espèce *Th. intermedium* est utilisée comme graminée fourragère, elle est reconnue comme n'ayant pas de problèmes particuliers vis-à-vis des maladies (Karn & Krupinsky, 1983; Wills *et al.*, 1998; Chang & Howard, 2001).

b) Efficience de l'utilisation en eau

Les graminées pérennes comme Kernza® limitent fortement l'écoulement de l'eau de surface. Cela évite le ruissèlement et la saturation des champs en eau lorsqu'il pleut. Dans les zones où la pluviométrie est suffisante, la majorité des précipitations qui n'ont pas été perdues par évapotranspiration servent à recharger l'eau profonde, ces précipitations étant excédentaires

par rapport aux besoins immédiats de la plante. Cette eau profonde correspond donc en une source additionnelle d'humidité pour les plantes par rapport aux seules précipitations de la saison. En effet, lorsque les pluies sont déficitaires, les plantes ont la capacité d'aller puiser l'eau (de périodes de pluies passées) dans les couches profondes du sol. Cela est permis par un système racinaire plus profond et plus dense comparativement à un blé annuel. Ainsi, cette dynamique permet une haute efficacité de l'utilisation en eau et en nutriments tout au long de la saison de croissance, même quand les pertes par évapotranspiration tendent à assécher les premières couches du sol (lorsque que les pluies sont déficitaires) (de Oliveira *et al.*, 2018; Ryan *et al.*, 2018).

Il est à noter que pour des climats plus sec, où les précipitations sont limitées, une plus grande utilisation en eau pourrait vider les réserves du sol et limiter la persistance de la culture ainsi que les futurs rendements (Ryan *et al.*, 2018).

c) Réduction de l'érosion du sol

L'érosion des sols apparaît surtout dans les exploitations produisant des céréales à grande échelle situées aux USA, au Canada, en Russie, en Chine ou encore en Australie. En outre, la faible diversité de cultures de la production industrielle de grains peut exacerber les pertes de sol et sa dégradation selon Crews *et al.* (2016). À titre d'exemple, dans la région des prairies palousiennes (Etat de Washington), l'érosion par l'eau inflige, à elle seule, des pertes approximatives de 31,5T/ha de sol par an dans un système conventionnel basé sur la culture de blé en seule rotation avec le pois de printemps d'après Reganold *et al.* (1987) cité par Murphy *et al.* (2010). Selon le Service public wallon (sd), la moyenne sur l'ensemble du territoire wallon est située à 3T/ha/an où certains sols cultivés peuvent excéder 5T/ha/an. Effectivement, Crews *et al.* (2016) expliquent que le nord-ouest de l'Europe ne subit pas une érosion considérable, le risque y est faible. De son climat tempéré humide, les pluies sont douces et ne créent pas de fortes érosions mais celles-ci sont suffisantes pour maintenir une végétation couvrant le sol. Toutefois, le risque d'érosion augmente dans le sud de l'Europe où il y est modéré à élevé (Espagne, Italie, Grèce et Suisse).

Les cultures annuelles sont plus sensibles à l'érosion du sol que les cultures pérennes, Crews (2017) note que sur une année, une culture annuelle expose le sol au vent et à la pluie pendant des semaines. Le sol est vulnérable jusqu'à la fermeture de la canopée de la jeune plantule. Les cultures pérennes peuvent être une solution à ce problème puisque l'érosion du sol y est réduite. Ceci est permis par une plus longue saison de croissance, à une couverture permanente du sol ou encore à de profondes racines, l'eau excédentaire étant notamment stockée en profondeur (Rasche *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2017).

d) Efficacité de la nutrition azotée

Dans les agro systèmes, l'azote est, le plus souvent, limiteur de leur productivité seul ou en combinaison avec le phosphore. Cependant, la fertilisation azotée peut être une source de contaminations pour l'environnement. Le nitrate, l'azote ou à plus faible mesure l'azote organique dissout peuvent être perdus à la surface ou dans les eaux souterraines via le cheminement hydrologique et sont les causes de contaminations locales des sources d'eau douce ou de l'eutrophication des écosystèmes marins. Ensuite, l'azote des cultures fertilisées

peut être perdu sous forme de gaz à effet de serre comme l'ammoniaque ou l'oxyde nitreux (Crews *et al.*, 2016).

L'utilisation de cultures pérennes peut diminuer la demande en engrais synthétisés. Effectivement, les nitrates se sont pas bien retenus par les sols laissés avec peu de racines ou des racines non actives comme le mentionne Crews (2017). Grâce à de plus profondes racines et une plus longue saison de croissance, les graminées pérennes utilisent l'eau et les nutriments plus efficacement. En outre, elles offriront un couvert précieux pour le sol. Au Michigan (sol profond, bien drainé, limon fin), lors de la première année d'implantation, l'étude de Culman *et al.* (2013) a révélé un taux similaire de lessivage d'azote de Kernza® et du blé annuel. La deuxième année d'implantation de Kernza®, grâce à un système racinaire extensif, la capture d'engrais appliqués a été plus importante et le lessivage du nitrate a pu être réduit de 86% pour une fertilisation recommandée (90kg de N/ha), de 98% pour une fertilisation excessive (120kg de N/ha) et de 99% pour une fertilisation organique (90kg de N/ha) relativement au blé annuel sur la saison de croissance (Jaikumar *et al.*, 2012; Schendel *et al.*, 2015; Jungers *et al.*, 2017).

e) Qualité de l'eau

Si Kernza® est introduite aux abords d'un cours d'eau ou sur une parcelle en pente, la qualité de l'eau pourrait être améliorée. En effet, le lessivage des nitrates y serait réduit ainsi que les ruissèlements de l'eau et l'érosion grâce à une meilleure infiltration et un meilleur taux de rétention. Cela est expliqué par une bonne couverture du sol, un système racinaire extensif ou encore à une période de végétation plus importante (Jungers *et al.*, 2017; de Oliveira *et al.*, 2018; Ryan *et al.*, 2018).

f) Séquestration du carbone

L'augmentation de la séquestration en carbone d'une plante pérenne par rapport à une plante annuelle pourrait permettre de réduire la quantité de CO₂ atmosphérique.

Au Montana, Sainju *et al.*, (2017a) ont trouvé que la biomasse racinaire produite par des plantes de Kernza® âgée de 2 ans est 6 fois plus importante que la biomasse racinaire produite par du froment de printemps. Pour les auteurs, les racines forment le composant principal d'apport en carbone pour sa séquestration dans le sol. En plus de la biomasse des racines, les rhizodépôts sous la forme d'exsudats, de sécrétions, des cellules de la coiffe, de lysates ou encore de mucillages sont aussi des sources importantes de carbone pour enrichir le carbone organique du sol. Selon King & Blesh (2018), bien que les plantes pérennes puissent restituer moins de carbone provenant de la biomasse aérienne dans le sol comparé à une plante annuelle, l'apport en carbone racinaire pourrait le compenser. En effet, Rasse *et al.*, (2005) expliquent que le carbone racinaire présente une forme de carbone plus facilement stabilisée dans le sol relativement au carbone apporté par les parties aériennes. Différents mécanismes de protection de la matière organique provenant des racines sont présents (protection physico-chimique, interactions chimiques avec les ions métalliques, récalcitrance chimique, ...).

Toujours au Montana, Sainju *et al.*, (2017b) ont déterminé les teneurs totales en carbone et en azote du sol sous culture de 4 ans de Kernza® et sous culture d'un an de blé de printemps. Les échantillons de sol ont été broyés puis brûlés dans un four à haute induction analysant le carbone et l'azote. Globalement les teneurs totales en azote et carbone du sol sont plus importantes dans les sols de culture de Kernza® (plantes âgées de 2 à 4 ans) que des sols cultivés en blé de printemps, grâce à des apports racinaires de carbone et d'azote plus élevés. Pour le sol sous culture de Kernza® depuis deux ans, les apports racinaires étaient de 6T/ha.an pour le carbone et de 200kg/ha.an pour l'azote contre 0,44T de C/ha.an et 8,9kg de N/ha.an pour le blé de printemps. Les teneurs moyennes en carbone et azote total du sol sur trois années de culture de Kernza® (plantes âgées de 2 à 4 ans) étaient de 326,9T de C/ha.an et 11,4T de N/ha.an contre 299,3T de C/ha.an et 10,6T de N/ha.an en culture de froment de printemps. En outre, de plus gros apports racinaires (en azote et en carbone) en profondeur (jusqu'à 120cm) se sont retrouvés sous culture de Kernza® que sous culture de blé de printemps.

Au Kansas, 4 ans après l'implantation de Kernza®, de Oliveira *et al.* (2018) ont mesuré les flux de CO₂ de la plante avec l'écosystème pendant 4 années (plantes âgées de 4 à 7 ans) grâce à un analyseur de gaz infrarouge. La fertilisation azotée a changé au cours du temps avec une diminution progressive de 110kg de N/ha la première année à 80kg de N/ha la dernière année. Sur ces quatre saisons de culture, Kernza® a été un puits de carbone avec une quantité totale de carbone fixée qui était 50% plus grande que la quantité perdue par la respiration. 2952g de carbone par m² ont été fixés sur ces 4 années, la moyenne annuelle d'absorption nette de carbone était de 590,4g C/m² (échange net avec l'écosystème). Cette valeur ne prend pas en compte la production de biomasse aérienne. Lorsque celle-ci est considérée (moyenne annuelle de 675g/m² pour les 4ans), la culture de Kernza® absorbe relativement moins de carbone mais en reste fixatrice nette. Selon la quantité de biomasse récoltée, l'écosystème peut passer d'un puits à une source de carbone. L'importance du puits de carbone peut être affectée par différents facteurs : l'humidité, la fertilisation, le climat, la texture du sol, la température, la productivité de l'écosystème, les pratiques de gestion comme la hauteur et la fréquence de fauche ou encore l'âge des graminées comme ajoutent Ryan *et al.* (2018), Crews *et al.* (2016) et Sainju *et al.*, (2017b).

g) Diminution des intrants

Kernza® ne doit pas être implantée chaque année, la quantité de semences ainsi que la demande en énergie pour la préparation de la terre et l'émission de CO₂ qui en résulte sont réduites (de Oliveira *et al.*, 2018; Ryan *et al.*, 2018).

Ensuite, elle est efficace pour l'absorption de l'eau et de l'azote, ce qui diminue le lessivage. La quantité d'engrais devrait donc s'amenuiser. De plus, *Th. intermedium* présente des résistances à différents champignons pathogènes et virus, les besoins en produits phytosanitaires devraient être moindres que pour un blé conventionnel (Sainju *et al.*, 2017a).

Il est peut être bon de préciser qu'aucune irrigation n'est nécessaire sous notre climat tempéré recevant environ 850mm de pluies annuellement en Belgique (IRM, sd). En effet, *Th.*

intermedium supporte des conditions de sécheresse allant de 300 à 350mm de pluies par an (Ogle *et al.*, 2011; Hybner & Jacobs, 2012).

h) Bioénergie

La biomasse aérienne de *Th. intermedium* pourrait être utilisée comme source de bioénergie en produisant du bioéthanol de seconde génération. Celui-ci étant moins controversé que le bioéthanol de première génération (compétition pour la surface allouée à l'alimentation humaine et animale, pertes potentielles de biodiversité, conversion de forêts et de prairies, ...) (Cacho *et al.*, 2017; Sainju *et al.*, 2017a; Ryan *et al.*, 2018).

Différentes manières de produire cette bioénergie sont possibles. Concernant Kernza®, ses grains peuvent produire de la farine tandis que les tiges et les enveloppes des grains pourraient alimenter les biocarburants. Il serait intéressant de placer les cultures pérennes là où des risques de contamination de l'eau et de lessivage des éléments sont présents comme dans des zones pentues ou des zones tampons. La production en zones marginales, pour être envisageable, devrait être suffisante pour être économiquement viable et ces zones ne devraient pas être trop éloignées pour des raisons logistiques (Cacho *et al.*, 2017; Sainju *et al.*, 2017a; Ryan *et al.*, 2018).

2.3.3 Risques généraux

a) Diminution potentielle des rendements avec le temps

Vico *et al.* (2016) indiquent que l'accumulation de maladies du sol, d'insectes nuisibles, d'adventices ou encore de conditions environnementales rudes et périodiques (gel, sécheresse) peuvent influencer négativement les rendements. Jaikumar *et al.* (2012) adjoignent qu'une diminution potentielle de ces rendements peut apparaître suite à une prolifération de faibles talles non productives ou à une faible durée de vie.

b) Pression des plantes adventices

Rasche *et al.* (2017) nous font remarquer que la pression des adventices pourra être assez importante au moment de la conversion d'un système annuel vers un système pérenne. Le labour ne pourra plus être réalisé après l'implantation. Celui a pourtant l'avantage de détruire les adventices et d'enfouir les semences à des profondeurs où leur germination n'est pas possible (Colbach *et al.*, 2006). La dynamique des mauvaises herbes et la composition de la communauté sont difficiles à prévoir lors de la transition. Les semences d'adventices risquent de s'accumuler dans les 5 premiers cm du sol. Cependant, le besoin de contrôle des mauvaises herbes, majeur pendant la transition vers le système pérenne, devrait diminuer à long terme. L'ombrage de la canopée lorsque les plantes seront bien établies devraient permettre de contrôler les adventices (Rasche *et al.*, 2017). En effet, dans l'étude de Weik *et al.* (2002), *Th. intermedium* (semée en Mai) a montré un bon contrôle, probablement grâce à l'ombrage procuré par la canopée. En outre, d'après Ryan *et al.* (2018) récolter la végétation peut limiter la production de semences de ces adventices.

c) Accumulation des maladies et des insectes nuisibles

Le cycle des maladies ou des insectes peut être perturbé dans les systèmes annuels en déployant la diversité par les rotations. La population de ravageurs s'attaquant à une culture

particulière est réduite si on remplace cette culture par une autre. Dans les systèmes pérennes, ce n'est pas possible de perturber les nuisibles en éliminant leur hôte. En outre, les sols en culture de céréales pérennes sont laissés sans perturbations pendant quelques années, cela pourrait entraîner un risque de pression par les parasites et les organismes se nourrissant des racines. Les dommages sur les racines des plantes pourraient procurer une opportunité pour les autres pathogènes d'envahir les racines et ainsi affaiblir encore plus la plante. Concernant les virus, ceux-ci pourraient être d'importance grandissante puisque les plantes infectées non détruites pourraient jouer le rôle d'hôte pendant de multiples années. Cependant, récolter le fourrage pourrait permettre de diminuer la pression des nuisibles (Crews, 2017; Curwen-McAdams & Jones, 2017; Rasche *et al.*, 2017; Ryan *et al.*, 2018).

La gestion des maladies pourrait être un défi lors du passage des cultures annuelles vers les cultures pérennes. Les techniques de lutte intégrée comme l'utilisation des rotations, du semis décalé ou encore du labour y sont plus difficiles à effectuer ou simplement non réalisables. L'utilisation des microorganismes rhizosphériques supprimant les pathogènes des plantes ou des agents de bio contrôle pourrait être une voie de solution. Ensuite, la diversité devrait être maximisée avec par exemple, certains types de polyculture ou encore une diversité de variétés différant dans les fonctions de résistances. Par conséquent, la sélection de résistances envers les maladies et les ravageurs d'importance économique est un outil essentiel dans les systèmes pérennes (Crews, 2017; Rasche *et al.*, 2017).

d) Contamination vers les cultures annuelles

Il y a une augmentation de la menace des maladies sur les cultures conventionnelles quand les deux cultures (pérennes et annuelles) sont cultivées dans le même voisinage. En effet, la plus longue longévité des plantes pérennes induit une plus grande opportunité pour les pathogènes de s'accumuler dans le temps (particulièrement pour les virus et les pathogènes fongiques des racines qui peuvent s'accumuler dans les collets et les racines). De plus, la période de croissance étendue des plantes pérennes pourrait améliorer la survie des pathogènes d'années en années (Hayes *et al.*, 2012). En Belgique, Kernza® pourrait, par exemple, devenir un hôte pour les pucerons, vecteurs de la jaunisse nanisante de l'orge.

e) Volatilité du marché

Les cultures annuelles donnent l'avantage à l'agriculteur de pouvoir adapter les cultures selon la demande du marché. Pour ce qui est des cultures pérennes, le marché devrait rester stable sur plusieurs années afin d'assurer une certaine rentabilité (Rasche *et al.*, 2017).

2.3.4 Potentiel d'utilisation

Concernant l'adoption potentielle de cette nouvelle culture par les agriculteurs, une étude a été réalisée par Adebiyi *et al.* (2015) aux Etats-Unis et celui-ci a trouvé une multitude de critères influençant la transition d'une culture annuelle vers une culture pérenne. En effet, le choix des agriculteurs est dynamique et plutôt compliqué, tout comme les circonstances dans lesquelles ceux-ci travaillent. Cela est également souligné par Marquardt *et al.* (2016) en Suède, où l'introduction de céréales pérennes est vue comme très complexe et dépendante du système agricole dans lequel elles seraient adaptées. Les facteurs économiques, les caractéristiques de la culture (grains, croissance, compétition avec les adventices,...), les

valeurs de l'agriculteur et ses préoccupations vis-à-vis de l'environnement ou de la qualité du sol, la taille et le type de l'exploitation ainsi que l'attitude envers les risques, peuvent tous influencer la décision.

Ryan *et al.* (2018) nous font remarquer que la gestion de la culture de Kernza® est assez complexe et pourrait limiter son adoption. D'autres préoccupations sont également présentes comme les rendements qui devraient être comparables à ceux du blé annuel. Cependant, différents traits peuvent venir contrebalancer cet aspect (protéines du grain, vigueur des plantules, résistance aux maladies). En effet, la rentabilité est capitale et dirige les décisions. Ainsi, développer différentes formes de céréales pérennes, de multiples produits, pourrait être intéressant afin de répondre à de nouveaux marchés économiques et utilisations à la ferme. Ces formes ne devraient donc pas nécessairement être compétitives, point de vue rendement, avec les céréales annuelles pour leur adoption (Adebiyi *et al.*, 2015; Ryan *et al.*, 2018).

a) Rendements

Les résultats sont prometteurs en termes de services éco systémiques ou de qualités pour l'usage final mais il reste deux gros problèmes : premièrement les rendements sont moindres lorsqu'ils sont comparés à ceux d'un blé annuel et deuxièmement, un déclin dans le temps des rendements grains est observé (Pugliese, 2017).

I. Potentiel

Concernant Kernza®, seulement une dizaine de cycles de sélection ont été réalisés par le « Land Institute ». Dans cette population, il y a une variation importante dans les traits agronomiques : hauteur des plantes, biomasse aérienne, rendement en grains et poids du grain (Zhang *et al.*, 2017). En effet, Kernza® a montré un large degré de diversité génétique qui peut être manipulée pour améliorer l'espèce et permettre une progression rapide comme le rapportent DeHaan *et al.* (2018). D'après Culman *et al.* (2013), des augmentations de rendements grains de 10 à 20% par cycle de sélection ont été précédemment montrées. Dans l'étude de DeHaan *et al.* (2018) 5 cycles de sélection ont été effectués, ceux-ci cumulés, les gains de rendement en grains par épis étaient de 143%, en pourcentage de graines nues de 181% et en masse de grains de 60%. En outre, il n'y aurait pas de corrélation négative entre l'augmentation des rendements et la durabilité de la pérennité.

DeHaan & Van Tassel (2014) ajoutent qu'il n'y a probablement pas de barrière absolue contre de hauts rendements ou indices de récolte chez les espèces pérennes. Pour obtenir un indice de récolte élevé, il faudrait, selon eux, modifier l'environnement en augmentant les disponibilités des ressources et ensuite en sélectionnant strictement pour la production de semences par surface. Au Canada, Cattani & Asselin, (2018) ont comparé des plantes de *Th. intermedium* au 3^e cycle de sélection du TLI avec des plantes non sélectionnées provenant des ressources de germoplasme de l'USDA. L'indice de récolte a bien augmenté avec la sélection du TLI pour l'augmentation des rendements en grains.

II. Rendement en grains

- Composantes de rendements

Gazza *et al.* (2016) rappellent l'importance de l'équilibre entre l'énergie allouée à la production de grains et aux organes pérennes comme expliqué précédemment. Un moindre poids des grains et poids spécifique comparé au blé annuel en résulte. En Australie, Newell & Hayes (2017) ont obtenu un plus faible indice de récolte pour *Th. intermedium* relativement au blé annuel. Le poids de mille grains était 6 fois plus important pour le blé annuel relativement à *Th. intermedium*. Ces faibles rendements seraient en grande partie dus au faible poids des grains.

- Ordre de grandeur

En Australie, Larkin *et al.* (2014) ont observé des poids de mille grains de *Thinopyrum intermedium* (en 2^e cycle de la sélection massale) de 6 à 8g comparé à 35 à 40g pour le blé témoin, soit 6 fois moins. Aux USA, en moyenne les grains de blé boulangers pèsent 30mg, pour la population initiale de sélection de Kernza® par le TLI, les grains étaient aux environs de 4mg. Après 8 cycles de sélection massale, le poids a doublé, au Minnesota, la population dérivant du 3^e cycle de sélection a une moyenne de poids de 8mg. Zhang *et al.* (2015) ajoutent que des tailles de grains plus grandes que 15mg ont été observées (Zhang *et al.*, 2016, 2017).

Selon Zhang *et al.* (2016) au Minnesota, la moyenne de la production de semences par plante de *Th. intermedium* (issue du 3^e cycle de sélection récurrente du « Land Institute ») était de 44g la première année et 84g de semences la seconde.

Les premiers rendements en grains décortiqués d'IWG au début de la domestication (sélection précédente de l'institut Rodale et de l'USDA) étaient d'environ 0,3T/ha (Cox *et al.*, 2010). Selon Zhang *et al.* (2015), après le 4^e cycle de sélection récurrente, le meilleur germoplasme récolté au Minnesota a avoisiné un rendement en graines nues de 1T/ha. Les rendements sont bien en dessous du blé annuel car celui-ci avoisine 3,5T/ha au Minnesota. Dans le sud-ouest de l'Allemagne et sur des sols marginaux (sols pierreux avec un profil peu profond), Weik *et al.* (2002) ont, quant à eux, observé un rendement maximal de 0,5T/ha (semences provenant du centre de recherches Rodale). Dans les environnements du nord de l'Amérique, Kernza® peut atteindre des rendements en grains de plus de 1,5T/ha. Effectivement, Culman *et al.* (2013) ont observé des rendements grains de *Th. intermedium* (au 1^{er} cycle de sélection du TLI) de seconde année d'implantation allant de 1,4 à 1,7T/ha et correspondant à environ 33% du rendement d'un blé conventionnel (grains non décortiqués) au Michigan. Les terres y sont plus fertiles et reçoivent des précipitations plus importantes que dans les Grandes Plaines et les régions montagneuses de l'ouest des USA. Jungers *et al.* (2017) ont observé pour ces populations, issues de la sélection pour les rendements en grains et ayant reçu un taux modéré de fertilisation azotée, un rendement grains correspondant à 4 fois le rendement typiquement obtenu par des variétés fourragères. Dans l'étude de Pugliese (2017), en Ohio, les meilleurs rendements étaient aux alentours de 1T/ha la première année de production.

- Déclin des rendements

Zhang *et al.* (2016), au Minnesota, ont remarqué une augmentation importante des rendements en grains et en biomasse de Kernza® la seconde année de production tout comme

Culman *et al.* (2013) au Michigan et Jungers *et al.* (2017) au Minnesota. Cependant, dans l'étude de Zhang *et al.* (2016) le poids des grains, la hauteur des plantes et le poids de l'épi sont similaires sur les deux années. Les résultats de Pugliese (2017) en Ohio ont montré une baisse de rendement la deuxième année passant de 0,5 à 1T/ha la première année de production à une variation de 0,003 à 0,7T/ha la deuxième année. Cette baisse de rendement pourrait être due à la météo non favorable de la deuxième année mais il y a encore un manque d'informations à ce sujet. Weik *et al.* (2002) a également obtenu des rendements de seconde année inférieurs qui pourrait être expliqués par une forte pression des adventices et une application mineure d'engrais.

Au Minnesota, dans l'étude de Jungers *et al.* (2017) portant sur quatre années de culture, les rendements grains ont effectivement augmenté la deuxième année, cependant, un déclin a été observé les deux années suivantes (3 et 4^e année suivant l'implantation). Pourtant, dans l'étude de Cattani & Asselin (2018), des individus produisant de bons rendements la troisième année d'implantation ont été observés. Le potentiel pour sélectionner des individus avec de bons rendements sur plusieurs années serait donc présent. En outre, aux USA, lorsque *Th. intermedium* est utilisée pour la production de semences de variétés fourragères, la plante peut produire pendant 7 à 10 ans. Cependant, après environ 4 ans de production les rendements en grains diminuent fortement (Hybner & Jacobs, 2012).

Selon Jungers *et al.* (2017), la diminution des rendements en grains ne serait pas expliquée par la mortalité des plantes car la production de biomasse aérienne n'est pas réduite avec l'âge de la culture. Cependant, il a observé moins d'épis par plante et l'indice de récolte était plus faible. L'hypothèse serait une diminution de rendements liée à l'augmentation de la densité de plantes par mètre carré. Avec l'âge de la culture, l'espace entre les lignes devient progressivement colonisé par de nouveaux individus depuis les graines tombées au sol et les rhizomes. Si une augmentation de densité est présente, les plantes individuelles peuvent exprimer le syndrome d'évitement de l'ombre en réponse à la diminution du ratio rouge/rouge lointain. Cette diminution a été montrée comme diminuant les rendements en grains et l'indice de récolte sur le blé.

III. Qualité du grain

L'espèce *Th. intermedium* est caractérisée par un haut taux protéique, de l'ordre de 20%, ainsi qu'un contenu élevé en fibres insolubles. Ces taux seraient dus à la petite taille du grain augmentant le ratio péricarpe/endosperme. De ce fait, le contenu en fibres et protéines est supérieur aux autres céréales comme le blé d'hiver ou le seigle. En outre, le travail de Schendel *et al.* (2015) avait pour but de décrire les arabinoxylanes, constituants hemicellulosiques majeurs faisant partie du complexe des fibres alimentaires, dans les grains de *Th. intermedium* (provenant du TLI) puisque ceux-ci varient entre les espèces de céréales. L'intérêt est qu'ils sont discutés comme potentiels ingrédients alimentaires fonctionnels en ayant des propriétés prébiotiques et en constituant des antioxydants solubles dans l'eau dans les systèmes in vitro. Les arabinoxylanes féruloylés ont pu être décrits comme relativement simples et similaires à ceux du seigle et du blé annuel. En plus d'un haut taux en protéines, Newell & Hayes (2017) mettent en évidence une concentration en ADF, NDF, carbohydrates solubles dans l'eau et un contenu en cendres (lignée CPI148055) plus élevés qu'un blé

panifiable (variété « Wedgetail ») avec cependant, une digestibilité de la matière sèche plus faible. Le taux d'acide aminés essentiels des grains de *Th. intermedium* (provenant de différentes variétés fourragères) comparé au blé panifiable est plus élevé avec un contenu en cystéine et méthionine 1,4 fois plus élevé (Becker *et al.*, 1990). Zhang *et al.* (2015) n'ont cependant pas observé un meilleur taux de lysine pour les grains provenant du 4^e cycle de sélection du TLI. Zhang *et al.*, (2016) ont observé un plus grand contenu en acides aminés soufrés des grains descendants de parents issus du 3^e cycle de sélection récurrente, la qualité nutritionnelle est ainsi améliorée (DeHaan *et al.*, sd; Schendel *et al.*, 2015; Marti *et al.*, 2016; Moffat, 1996 cité par Hayes *et al.*, 2012).

Quant à DeHaan *et al.* (N.D.) ceux-ci indiquent qu'il y a une plus faible qualité de gluten dans les grains de *Th. intermedium* qui limite son utilisation dans les pains à pâte levée. Marti *et al.* (2016) ajoutent que les protéines de gluten sont des α et γ gliadines et quelques gluténines à faible poids moléculaire. Toutes les variétés étaient déficientes en gluténines à haut poids moléculaire, suggérant une faible capacité de formation de gluten. Zhang *et al.* (2015) et Marti *et al.* (2016) confirment que ces unités sont essentielles pour de bonnes performances dans la fabrication du pain. En effet, quand on complémente la farine avec des grains de *Th. intermedium*, la stabilité de la pâte diminue, indiquant un plus faible réseau de gluten dans la pâte. Marti *et al.* (2016) notent que les protéines issues des grains de Kernza® ne se développent pas en un réseau viscoélastique comme la pâte issue des grains de blé le fait. Ce comportement peut être dû à un taux élevé de fibres, mais aussi à la différence dans le profil des protéines et dans la structure secondaire. Bien que les performances pour la fabrication du pain et sa qualité finale sont médiocres, Marti *et al.* (2016) affirment que fabriquer des cookies ainsi qu'une variété de produits cuits avec une farine issue de *Th. intermedium* est possible.

Il est intéressant de noter que Zhang *et al.* (2015) ont testé différentes lignées de *Th. intermedium* (TLI-C4) et a observé une variabilité de la qualité de ces différents génotypes. Les auteurs mentionnent que dans les études précédentes, *Th. intermedium* est caractérisée par un faible contenu en gluten, cependant, la diversité du pourcentage de protéines est telle que certains génotypes possèdent une grosse quantité de protéines polymères comparable à celle d'un blé panifiable. Les génotypes à haut taux de protéines non gluténiques et faibles caractéristiques de mélange peuvent créer de bon pancakes, muffin ou cookies. Tandis que les génotypes à grande quantité de protéines polymères et ayant de bonnes propriétés de mélange ont un grand potentiel pour la fabrication du pain ou pourraient au moins être mélangés à la farine de blé. Les farines de Kernza® peuvent être des ingrédients valorisables dans la cuisine puisqu'elles contiennent des protéines gluténiques ainsi que d'autres protéines et acides aminés essentiels à taux élevés.

IV. Rendement fourrager

Kernza® est l'une des graminées de saison froide parmi les plus productives de l'ouest des USA, avec une importante production de biomasse aérienne. Les rendements sont comparables aux variétés cultivées pour la production de fourrages ou de bioénergies. Les efforts de sélection pour améliorer les rendements en grains n'ont pas changé les traits physiologiques liés à la production de biomasse aérienne. D'ailleurs, les lignées issues du 2^e

cycle de sélection du TLI (TLI-C2) ont obtenu une production fourragère, lors de la récolte du grain, de l'ordre de 9 à 12 T/ha au Minnesota (Jungers *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2016, 2017).

Les rendements fourragers totaux en Ohio varient de 4 à 13T/ha la première année et de 2,5 à 9T/ha la deuxième, sans oublier que des variations de rendements entre les sites d'expérimentation existent. Effectivement, de plus gros rendements en fourrages ont été observés dans les Grandes Plaines et dans la région de « the Upper Midwest » que dans les régions du Nord-est (l'inverse a été remarqué pour les rendements en grains) (Pugliese, 2017).

Newell & Hayes (2017) ont vu une production de matière sèche de *Thinopyrum intermedium* meilleure en automne qu'au printemps de la première année. Un faible niveau de biomasse aérienne lors de l'année d'établissement et surtout au printemps a déjà été observé dans les graminées pérennes tempérées qui sont généralement lente à l'établissement. Larkin *et al.* (2014) ajoutent que le niveau de production, peu importe la saison, est influencé par les conditions saisonnières et particulièrement par l'eau. Culman *et al.*, (2013) ont observé une biomasse végétative plus importante pour Kernza® que le blé annuel et celle-ci a augmenté la deuxième année d'implantation. La biomasse végétative du blé annuel a atteint 93% de Kernza® de première année et la deuxième année seulement 29% de la graminée pérenne.

- **Culture compagne de légumineuses**

Comme fait remarquer Ryan *et al.* (2018), le fourrage de légumineuses peut être incorporé à celui des céréales pérennes. Associer ces deux types de plantes peut réduire le besoin en azote de la culture. De plus, l'implantation d'une légumineuse augmenterait la qualité du fourrage. Pour implanter un trèfle, par exemple, l'idéal serait de le semer dans sa propre ligne afin d'augmenter sa résistance. Une réduction des rendements de Kernza® pourrait être observée mais l'utilisation de la végétation comme fourrage pourrait temporiser la perte de rendements par la bonification de ce fourrage.

V. Qualité du fourrage

de Oliveira *et al.* (2018) rapportent que *Th. intermedium* constitue un excellent aliment pour le bétail des Grandes Plaines aux USA.

En Australie, Newell & Hayes (2017) ont étudié la qualité du fourrage de *Thinopyrum intermedium* récolté à la fin de l'hiver et au milieu du printemps. Pour ces deux fourrages, les concentrations en protéines brutes (environ 30%) sont plus élevées que le blé annuel (variété Wedgetail) ainsi que les concentrations en Calcium (0,4%), Magnésium (0,13%), Potassium (5%) et Phosphore (0,6%). La concentration en Sodium (0,002%) était plus faible que le blé annuel. Les fourrages étaient hautement digestibles et denses en énergie, à plus de 80% de digestibilité de matière sèche et 12 MJ/kg.

La qualité du fourrage de Kernza® (au 2^e cycle de sélection du TLI) au moment de la récolte en grains, lorsque la fertilisation azotée est optimale (entre 60 et 96kg de N/ha) a été étudiée. Elle est comparable au cultivar fourrager « Rush » de *Th. intermedium*, caractérisé par une haute production fourragère (Ogle *et al.*, 2011). La valeur de digestibilité in vitro (IVTD, système américain) était comparable au type fourrager et significativement plus grande que la

panic raide (*Panicum virgatum* L.). La valeur alimentaire relative RFV du système américain, reflétant la digestibilité avec le pourcentage d'ADF et le potentiel d'ingestion avec le pourcentage de NDF (Jeranyama & Garcia, 2017) est comprise entre 68 et 80 et est comparable au cultivar fourrager de *Th. intermedium*. Cependant, avec une valeur alimentaire relative de moins de 130, le foin est catégorisé comme « utilitaires » aux USA et reçoit le plus faible prix aux enchères (Jungers *et al.*, 2017).

Le travail de Jungers *et al.* (2018) a permis d'évaluer l'évolution de la qualité fourragère de Kernza® avec le temps. Lorsque le nombre de degrés jours augmente, la biomasse allouée aux feuilles diminue alors que celle allouée aux tiges augmente, à maturité, ces deux biomasses représentent des proportions égales de la biomasse aérienne. Ainsi, au printemps, il y a un déclin linéaire de la qualité du fourrage avec le temps. Les tiges ont une haute teneur en NDF et un plus faible contenu en azote ainsi qu'une plus faible digestibilité. Le fourrage est donc de meilleure qualité avant l'élongation des tiges et l'utiliser à ce moment peut limiter les dommages sur le développement des inflorescences et assurer une production de grains la même année.

VI. Gestion améliorant les rendements

Comme Cattani (2017) le fait remarquer justement, la productivité peut être impactée par différents facteurs : les pratiques agronomiques, les périodes de gel, l'humidité, ...

- Conditions saisonnières

Selon Cattani (2017), des conditions automnales favorables (précipitations) permettent une repousse adéquate de *Thinopyrum intermedium* en automne et améliore la production de matière sèche et les rendements grains les années suivantes. Tandis que Cattani & Asselin (2018), nous indiquent que la chaleur et le manque de précipitations lors de la floraison et du développement du grain engendre une baisse probable de rendements. Lors du remplissage des grains, l'eau peut permettre un plus grand poids de grains ainsi qu'un contenu en amidon plus élevé et une meilleure formation de protéines dans ces grains. Jungers *et al.* (2018) ajoutent que le manque d'eau peut limiter le nombre de talles.

- Fertilisation

Comme le disent Hayes *et al.* (2018) les apports d'engrais azotés et phosphorés devraient jouer un rôle sur les rendements de seconde année, il est donc nécessaire d'adapter les pratiques agronomiques pour améliorer la productivité. Le moment de fertilisation doit être étudié ainsi que la quantité d'éléments apportés. de Oliveira *et al.* (2018) ajoutent que des taux élevés d'azote ont résulté en une production rapide et importante de biomasse aérienne au début du printemps. Selon Jungers *et al.* (2017) l'optimum agronomique en engrais azoté serait situé entre 64 et 96 kg N/ha, ce qui est plus faible que la quantité requise pour maximiser les rendements en grains d'un blé au Minnesota qui a besoin de minimum 100kg d'azote par hectare. La graminée devrait être fertilisée chaque année avec cette quantité optimale pour maximiser ces deux types de rendements (en grains et fourrager).

- Utilisation de régulateurs de croissance

Des pertes de rendements peuvent être provoquées par la verse, lorsque celle-ci est importante, ces pertes peuvent être de l'ordre de 20 à 80% concernant les céréales. Différents

facteurs en sont responsables : la date d'implantation, la densité de semis et la fertilité du sol. Ces événements de verse fluctuent de façon saisonnière et apparaissent le plus souvent entre la floraison et le développement du grain. Lorsque la verse apparaît à la floraison, la distribution du pollen peut être réduite et donc le rendement en grains est amoindri. Si la verse apparaît plus tard dans la saison, la qualité du grain peut être affectée négativement. Dans l'étude de Jungers *et al.* (2017), une importante verse a été observée à 160 et 200kg de N/ha faisant chuter les rendements, celle-ci a pu interférer avec le développement du grain. Le diamètre de la tige ou sa composition pourrait aussi être des causes importantes de verse (Frahm *et al.*, 2018).

Utiliser un régulateur de croissance pourrait permettre aux plantes d'allouer plus de produits photosynthétiques aux semences plutôt qu'à la production végétative par la réduction de la longueur des entrenœuds. L'indice de récolte serait ainsi amélioré. Dans l'étude, l'application de trinexapacethyl (régulateur de croissance), à une dose déterminée pour la production de semences des graminées, a permis de réduire la verse sans diminuer la production de biomasse aérienne. En effet, le diamètre des tiges s'est accru, ce qui augmentant la biomasse des tiges a pu compenser la perte de biomasse par la réduction de la hauteur des plantes. En outre, le régulateur a amélioré l'uniformité de la hauteur des plantes de Kernza® car il y a une faible stabilité génétique entre les plantes. Dans les environnements où le risque de verse est important, le diminuer sans nuire aux rendements fourragers est économiquement prometteur (Frahm *et al.*, 2018).

- Semis

Au Minnesota, Jungers *et al.* (2017) ont comparé différents moments d'implantation. Les plantes semées au printemps n'ont pas produit de graines la première année contrairement aux plantes semées en automne. En outre, les plantes semées en automne ont subi un déclin moins rapide des rendements en grains. *Th. intermedium* cultivée en tant que céréale devrait donc être semée en automne pour maximiser la production de grains. Culman *et al.* (2013) pensent que les rendements en grains de Kernza® seraient sensibles au semis tardif relativement au blé annuel, sûrement du fait d'un développement végétatif plus lent de la part de *Th. intermedium*. Planter tôt résultera souvent en des dates de floraison plus précoces et un plus gros rendement la première année, ce qui est valable aussi pour la biomasse aérienne.

Ensuite, selon Jungers *et al.* (2017), pour prolonger les rendements, on peut augmenter la largeur de l'interligne. Effectivement, d'après Cattani & Asselin (2018), lorsque les plantes sont espacées, les rendements ne déclinent pas forcément avec l'âge, la sélection a augmenté la stabilité des rendements avec les années pour des individus espacés. Les variétés fourragères cultivées pour la production de semences sont plantées en lignes largement espacées. Un interligne de 60cm serait conseillé et celui-ci doit être maintenu dans le temps (Kruger, sd). Dans l'étude de Culman *et al.* (2013), les lignes étaient espacées de 15cm, mais la seconde année, les rhizomes de Kernza® ont créés d'épaisses touffes, augmentant considérablement la densité de talles relativement à la première année et pouvant expliquer les meilleurs rendements de seconde année. Oliveira *et al.* (2018) ont, eux, mis en place des interlignes de 75cm, pour que les plantes puissent se propager dans le champ pendant 6 ans.

- **Gestion à deux récoltes : fourrage et grain**

Un moyen d'optimiser la production de Kernza® est la gestion à deux récoltes, récolte du grain et du fourrage. En effet, la culture produit un meilleur rendement grains en moyenne la seconde année d'implantation lorsque la biomasse restant après la moisson est retirée du champ. C'est ce qui découle de l'étude de Pugliese (2017) en Ohio. Réaliser une unique récolte de fourrages en été, au même moment que la moisson des grains ou deux récoltes de fourrages : en été, lors de la récolte des grains et en automne lors de la repousse de Kernza® seraient les deux meilleures options pour maximiser les rendements grains de la culture. Les producteurs, en plus de ces meilleurs rendements, auraient une source additionnelle de revenus avec le fourrage récolté. En Australie, Newell & Hayes (2017) ont également observé que la production de grains n'est pas affectée par la défoliation (fréquence et moment de fauche). Ces défoliations ont même des conséquences positives sur celle-ci.

La fauche additionnelle pour le fourrage peut aider à diminuer le déclin de production de grains avec le vieillissement de la plante. La perturbation causée par cette fauche aide à réduire la compétition intra-spécifique puisque les touffes des plantes se mélangent avec l'âge. L'augmentation de la densité des plantes réduit le nombre de talles reproductrices et donc le rendement en grains est affecté (moins d'épis par m²) (Pugliese, 2017). Aux USA, lorsque *Th. intermedium* était utilisée pour la production de semences des variétés fourragères, Canode (1965) nous informe que différentes perturbations étaient réalisables pour diminuer l'effet de l'âge sur les rendements. Les pailles et les chaumes pouvaient être brûlées en septembre de chaque année, un sous-solage de chaque côté de la ligne de semis à 40-45 cm réalisé en automne (pour des plantes plus âgées, environ 5 ans), ...

Les modalités de fauches optimisant la production de fourrages sont moins claires que pour la maximisation du rendement en grains. Globalement, sur les deux ans d'implantation, la fauche supplémentaire au printemps tend à diminuer la quantité de fourrages récoltée lors de la moisson en été, mais sans forcément diminuer le rendement fourrager annuel. Tandis que la fauche additionnelle en automne tend à augmenter la quantité de fourrages produite sur l'année. Cependant, une variation en fonction du moment de la fauche ou encore de la météo a été vue. La fauche additionnelle de printemps peut procurer des rendements fourragers annuels plus faibles ou plus élevés par rapport à la fauche additionnelle d'automne. Afin de maximiser la quantité de fourrages totale annuelle lors de la première année d'implantation et d'éviter de potentielles baisses de rendement, récolter le fourrage lors de la récolte du grain et une fois de plus en automne serait recommandé. Cependant, il est essentiel de réaliser des recherches afin de connaître les différentes qualités de ces fauches (Pugliese, 2017).

b) Rentabilité

Pour combler la faible productivité, Kernza® devrait être multifonctionnelle par, notamment, ses différents services éco systémiques (Ryan *et al.*, 2018).

Bell *et al.* (2007) ont exécuté une analyse économique dans les régions sèches du sud de l'Australie sur l'introduction potentielle d'un blé pérenne (issus de croisements ou de domestication) dans les rotations culturales. Celui-ci peut être rentable si 40% du rendement grains du blé annuel est atteint et combiné à 800kg/ha de fourrages additionnels par an (en

plus du fourrage apporté par l'annuel) pour une exploitation agricole mixte (élevage et culture). Newell & Hayes (2017) renchérissent en disant que la valeur de la matière sèche pâturée procurée au printemps ou après la récolte diminue le rendement relatif requis pour la rentabilisation du blé pérenne. Ainsi, pour optimiser la compétitivité de Kernza®, il est essentiel de valoriser au mieux les deux débouchés et de tirer profit du fourrage qu'elle peut procurer, celui-ci ayant une qualité modérée à la récolte mais constituant un meilleur produit que la paille comme le font remarquer Ryan *et al.* (2018). Une production décente de fourrages en complément au rendement en grains est un atout pour la rentabilisation de la culture dans nos conditions. En outre, les qualités de grains et les valeurs alimentaires du fourrage devraient être connues afin de déterminer le marché valorisant au mieux les productions de la culture de Kernza®.

Une autre piste proposée par Ryan *et al.* (2018) serait le paiement de primes aux producteurs associées à des qualités uniques du grain (meilleur contenu en fibres et en protéines). Cela amènerait une valeur ajoutée aux cultures de céréales pérennes et profiterait aux consommateurs cherchant des produits plus durables.

2.4 Diversité des céréales pérennes

Th. intermedium constitue la seule vraie graminée pérenne en cours de domestication directe pour le développement des cultures céréalières pérennes. Cependant elle ne représente pas la seule possibilité pour ce genre de culture. En effet, différents croisements ont été réalisés afin de mettre au point des lignées capables de produire un rendement en grains et de persister pendant plusieurs années au champ. Des croisements tels que *Triticum* spp x *Thinopyrum* spp ou *Secale cereale* L. x *S. montanum* Guss. ont été faits.

2.4.1 Survie sur plusieurs années

Hayes *et al.* (2012) ont évalués une large gamme de blés (*Triticum aestivum*, *T. cartholicum* Nevski, *T. durum*) hybridés avec différentes espèces du genre *Thinopyrum* spp. en parallèle avec diverses espèces pérennes comme *Th. intermedium*. Seulement une proportion mineure a été capable de produire une repousse la troisième année d'implantation. Cette proportion était principalement composée des accessions de l'espèce pure *Th. intermedium* provenant de la domestication du TLI plutôt que les accessions provenant de croisements. Dans l'étude de Larkin *et al.* (2014), des lignées issues de croisements avec *Thinopyrum intermedium* et *Th. elongatum* ont persisté et donné des rendements en grains jusque 4 ans. Cependant les rendements tendent à décliner avec le temps, certainement avec l'augmentation de la mortalité. Pourtant, la diversité génétique existe pour sélectionner des lignées prometteuses avec une longévité améliorée. Certains hybrides sont capables de repousser l'année suivant leur implantation comme cela a été observé par Jaikumar *et al.* (2012). Cependant, cette repousse doit être évaluée sur plusieurs années, ce qui augmente le temps de sélection comme le mentionnent Hayes *et al.* (2018).

Les résultats d'Hayes *et al.* (2012) sur de nombreuses accessions de céréales pérennes ont montré qu'il y a une association entre la capacité de repousse et le nombre de chromosomes, et plus strictement, une association avec la présence d'au moins un équivalent du génome provenant de l'espèce *Thinopyrum*. Quand le blé parent est un blé hexaploïde ($2n = 42$),

l'accension doit avoir au moins 56 chromosomes pour pouvoir repousser. Cependant, la présence de ces chromosomes, étant une condition nécessaire à la repousse, n'indique pas que la plante aura la capacité de repousser après la récolte. La garantie de repousse n'est pas assurée. Il y a probablement une interaction entre le génome du blé et celui de *Thinopyrum* dans l'expression de la pérennité.

2.4.2 Rendements en grains

- Ordre de grandeur

Au Michigan, Jaikumar *et al.* (2012) ont réalisé une étude sur des lignées de blés issues du croisement entre *Triticum aestivum* L. et *Thinopyrum* spp. Sur le site expérimental, les conditions environnementales ne sont pas propices à un bon niveau de rendement (conditions météo, faible taux de matière organique et sol grossier). Les rendements avoisinent 50% (1 à 1,6T/ha) du rendement du blé annuel. À Washington, Murphy *et al.* (2010) ont trouvé des rendements allant jusqu'à 93% du rendement du blé annuel pour certaines accessions de blé pérenne dérivant du croisement (*Thinopyrum elongatum* x *T. aestivum*). Ces rendements sont très variables, de l'ordre de 20 à 93% du rendement du blé conventionnel. Il y a de grandes variations entre les différents croisements mais l'auteur pense que le potentiel existe pour sélectionner simultanément la capacité de repousse et de hauts rendements en grains dans les lignées hybrides. En effet, en Australie, Hayes *et al.* (2012) ont observé une lignée produisant plus de 130% du rendement en grains du témoin de blé annuel et assurant une repousse correcte. Celui-ci ajoute que la stabilisation de ces amphiploïdes peut prendre du temps et qu'une série de générations pourrait être requise avant que les génomes se concilient et que ceux-ci puissent être correctement évalués.

Jaikumar *et al.* (2012), au Michigan, ont également étudié un seigle pérenne issu du croisement (*Secale cereale* x *S. montanum*) celui-ci a atteint 73% (1,3T/ha) du rendement du seigle annuel. Weik *et al.* (2002) a lui obtenu un rendement en seigle pérenne de 2,7T/ha dans un sol non adapté aux grandes cultures du sud-ouest de l'Allemagne.

Newell & Hayes (2017) ont observé de plus faibles rendements en grains de *Th. intermedium* relativement aux blés croisés avec *Thinopyrum* spp. Hayes *et al.* (2012) ajoutent que ces lignées sont moins productives (rendement en grains, indice de récolte et taille des grains).

- Composantes de rendements en grains

Dans l'étude de Jaikumar *et al.* (2012), les lignées provenant des croisements (*Triticum aestivum* x *Thinopyrum* spp.) et (*Secale cereale* x *S. montanum*) ont eu un rendement en grains plus faible que les espèces annuelles de blé et de seigle. Les rendements peuvent être décrits par leurs composants : le ratio grains sur paille, l'indice de récolte ainsi que la masse des grains, ceux-ci étaient moindre. Dans l'étude de Hayes *et al.* (2018), un taux élevé de stérilité des fleurons est présent dans les céréales pérennes hybridées, un épi complet de grains est ainsi très rare.

- Déclin des rendements

Peu de données sont disponibles et celles-ci sont contradictoires afin de connaître la productivité des nouvelles cultures de céréales pérennes. Dans certaines études, il y a un

déclin des rendements grains par unité de surface du à la mortalité. Dans d'autres études ce déclin n'est pas présent (Vico *et al.*, 2016).

Effectivement, en Australie et sur 4 ans, Larkin *et al.* (2014) a observé une diminution des rendements avec l'âge des plantes. Quant à Hayes *et al.* (2012), ils ont pu comparer les rendements grains de blés issus de divers croisements avec des espèces de *Thinopyrum* sur 3 années. Ceux de seconde année étaient très variables selon les lignées, allant de nul à visiblement plus élevés, relativement aux plantes de premières années. Dans l'étude de Jaikumar *et al.* (2012) au Michigan, l'effet de l'âge n'a pas impacté les rendements, les plantes pérennes (seigle et blé) issues des croisements (*Secale cereale* x *S. montanum* et *Triticum aestivum* x *Thinopyrum* spp.) âgée de 2 ans ont produit autant de grains que les plantes âgées de 1 an. En outre, l'indice de récolte reste également inchangé d'une année à l'autre. Celles-ci n'ont été récoltées qu'une seule fois par saison et ont reçu une fertilisation unique à chaque automne. En Allemagne, Weik *et al.* (2002) avait, lui, de plus faibles rendements en deuxième année pour le seigle pérenne qu'en première année. Cependant, cela pourrait être expliqué par une forte pression des adventices ainsi que par une application mineure d'engrais.

En Australie, Larkin *et al.* (2014) et Newell & Hayes (2017) estiment que le déclin des rendements avec le temps des lignées pérennes de blés issus de croisements sont liés à la mortalité des plantes. Effectivement, les rendements en grains par plante étaient maintenus voire augmentés. Dans les sélections futures, un aspect clefs d'augmentation des rendements est l'amélioration de la longévité des plantes.

- **Qualité du grain**

Le croisement entre *Thinopyrum elongatum* et *Triticum aestivum* a montré un contenu en protéines 3,5 à 4,5% plus élevé que le blé annuel ainsi que plus de 44% de concentration supplémentaire en certains minéraux. Il y a plus de micro- (Cu, Fe, Mn, Z) et macronutriments dans ces blés hybridés (Ca, Mg, P). En outre, les grains sont plus petits et plus légers ce qui donne un poids spécifiques plus faible. Ceci explique certainement le rendement médiocre en farine. De plus, le volume du pain produit est plus faible ce qui indique une force moindre des protéines et une qualité inférieure en gluten pour la fabrication de pains. Le taux élevé en protéines (qui ne sont pas de qualité boulangère et en nutriments pourrait avoir un impact sur la consommation humaine et du bétail grâce à de potentielles qualités nutritionnelles (Murphy *et al.*, 2009).

Dans les blés pérennes hybrides issus de divers croisements entre *Triticum aestivum* et *Thinopyrum* spp, le grain récolté possède une plus grande concentration en protéines brutes, en ADF et NDF, en carbohydrates solubles dans l'eau et en contenu de cendres que le blé annuel. Par contre, la digestibilité de la matière sèche est plus faible (Newell & Hayes, 2017).

Hayes *et al.* (2012) ont observé une diversité de dureté des grains dans le matériel testé (divers croisements entre blé annuel et espèces pérennes) variant du dur à doux. Certaines lignées auraient ainsi une farine très utile et des propriétés boulangères.

2.4.3 Rendements fourragers

En Australie, Newell & Hayes (2017) ont montré que certains blés issus de croisements de *Triticum* spp. avec *Thinopyrum* spp. ont une repousse significative après la récolte. Au vu de cette repousse d'automne, il y a un potentiel d'utilisation du fourrage à la fin de la saison. Cette repousse a également été observée par Jaikumar *et al.* (2012) pour *T. aestivum* x *Thinopyrum* spp. ainsi que pour le seigle issu du croisement *Secale cereale* x *S. montanum*.

La biomasse était équivalente voire plus élevée chez les espèces pérennes de blé et de seigle relativement aux annuelles et celle-ci reste comparable le première et la deuxième année (Jaikumar *et al.*, 2012).

La qualité du fourrage de blés issus de croisements (*Triticum* spp. X *Thinopyrum* spp.) et récolté à la fin de l'hiver et au milieu du printemps qui a été étudiée par Newell & Hayes (2017) était relativement similaire à la qualité du fourrage de *Th. intermedium*.

2.4.4 Système racinaire

Selon Larkin *et al.* (2014) en Australie, les lignées pérennes dérivées de croisements ont un système racinaire moins extensif que les véritables graminées pérennes comme *Th. intermedium*. Cependant, ce système racinaire reste plus extensif que le blé annuel (variété Wedgetail) et devrait donc délivrer les services éco systémiques désirés.

2.4.5 Gestion à deux débouchés

Deux études australiennes ont montré que le retrait de végétation lors des fauches procure différents bénéfices. En termes de rendement en grains, les lignées pérennes de blé ne sont pas vraiment sensibles à l'augmentation du nombre de défoliations (maximum trois) sur la saison, contrairement aux blés annuels. Les rendements en grains des blés croisés avec une espèce pérenne ont même augmentés par rapport à la modalité ne recevant pas de fauches sur la saison. Les blés hybridés (*Triticum* spp x *Thinopyrum* spp) ont la capacité de recouvrir leur potentiel de rendement avec une et deux fauches en hiver et produire le même rendement en grains que s'il n'y avait pas eu de défoliations. En outre, la repousse après récolte a permis une production importante de biomasse aérienne à la fin de l'été et à l'automne. La défoliation et sa fréquence n'a pas eu d'influence sur la survie des plantes après la récolte et la maturité des lignées issues de croisements a été moins affectée par la défoliation que le blé annuel, sauf pour la modalité à trois défoliations où la floraison a été décalée de 11 jours par rapport à aucune défoliation avant la récolte (Newell & Hayes , 2017 ; Larkin *et al.*, 2014).

3 Objectifs du travail

Aux Etats-Unis, Kernza® est prête pour des tests à petite échelle dans les exploitations agricoles afin d'élaborer les pratiques agronomiques, l'utilisation et la transformation (Cox *et al.*, 2010). Actuellement, la plupart des données proviennent d'Amérique ou d'Australie. Il n'est donc pas possible de transposer l'ensemble de ces informations à nos conditions pédoclimatiques d'Europe de l'ouest. Par son potentiel pour la diversification des systèmes de cultures, *Th. intermedium* devrait être étudiée dans nos conditions afin d'éprouver sa capacité à y être implantée comme culture céréalière viable.

Cette année, le projet « Perennial grains project » a été lancé en France suite à la collaboration de l'ISARA-Lyon, école d'ingénierie en agriculture avec plusieurs universités Nord-Américaines (Cornell, Madison, Wisconsin et Manitoba). Ce programme, sous la conduite de l'ISARA-Lyon, est appuyé par l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) et Arvalis, Institut du Végétal. Le programme bénéficie également de l'appui de certains acteurs importants de la recherche sur les céréales pérennes aux Etats-Unis ainsi qu'en Suède avec l'Université des Sciences Agronomiques de Suède (SLU). De plus, il implique plusieurs partenaires professionnels, des agriculteurs volontaires et partenaires d'Arvalis dans le centre de la France et la Coopérative Dauphinoise présente en région Auvergne-Rhône-Alpes. D'autres partenaires sont également impliqués, dont Walagri et Gembloux Agro-Bio Tech en Belgique.

Sur une durée de trois ans, le projet vise à étudier *Th. intermedium* pour la première fois dans nos contextes agricoles. Trois grands axes constituent le projet. Premièrement, la caractérisation écophysiological et agronomique de l'espèce ainsi que l'évaluation de ses performances sur trois années consécutives. Deuxièmement, l'étude des qualités et des propriétés du grain de l'espèce en termes de valeurs technologique, énergétique, nutritionnelle et organoleptique. Différents tests de transformation agro-alimentaires seront par exemple réalisés. L'étude des qualités du fourrage sera également exécutée. Troisièmement, l'étude des pratiques culturales et des stratégies d'insertion de l'espèce au sein de nos systèmes de culture.

L'ISARA-Lyon a, de plus, lancé une thèse de doctorat sur les céréales pérennes qui a débutée en octobre 2017. Son développement s'est réalisé en totale collaboration avec le *Land Institute* (responsable du programme de sélection du Kernza® et d'autres cultures pérennes), l'Université de Cornell (qui co-encadre le doctorat), l'Université de Madison et du Wisconsin (échange de données et publications communes), et l'Université des Sciences Agronomiques de Suède qui disposent d'expérimentations de longue-durée sur les céréales pérennes et qui participe au comité de pilotage du doctorat. Cette thèse a permis d'implanter le premier réseau d'expérimentation. Plusieurs essais sont en cours en France et en Belgique et sont consacrés à la céréale Kernza®, ceux-ci sont visibles sur la Figure 2. Elle vise à obtenir une première caractérisation des conditions de développement de cette céréale implantée dans des situations pédoclimatiques variées, avec ou sans apport de fertilisants en cours de culture. Les travaux du doctorant alimenteront le projet.

En outre, en collaboration avec l'INRA, une expérimentation en micro-parcelles a pu être implantée en octobre 2017 sur le site de Crouel (Clermont-Ferrand). Cette expérimentation accueille 7 génotypes de céréales pérennes, dont *Thinopyrum intermedium* ainsi que 4 génotypes de blé pérenne (*Triticum* spp. \times *Thinopyrum* spp.) et 2 de seigle pérenne (*Secale cereale* \times *S. montanum*). Cette expérimentation alimentera directement le projet qui permettra de faire un suivi éco physiologique, agronomique et épidémiologique approfondi.



Figure 2 : Localisation des différents essais du projet « Perennial grains project ».

Différents résultats du programme de recherche sont attendus comme la confirmation ou l'infirmerie des services éco systémiques, la connaissance des performances de la culture et les voies de valorisations des produits récoltés ou encore les retours et la perception des agriculteurs vis-à-vis de la culture.

Dans le cadre de ce projet, un champ d'essai a été implanté sur les terres agricoles de la Ferme expérimentale de Gembloux Agro-Bio Tech. Celui-ci vise à suivre les performances de Kernza® dans les conditions pédoclimatiques et agronomiques de la région limousine et constitue la première année d'implantation de la graminée en Belgique. Les objectifs initiaux sont l'analyse du rendement et des qualités des grains ainsi que la quantification de la biomasse aérienne en réponse à différentes modalités de fertilisation azotée (moments d'application et quantités d'azote appliquées).

Ce travail de fin d'étude est exploratoire et vise différents objectifs. Premièrement, les recherches dans la littérature scientifique serviront à alimenter les connaissances vis-à-vis de l'espèce *Th. intermedium*, encore jamais implantée en Belgique. Ensuite, un suivi technique de la culture permettra d'entrevoir les pratiques agronomiques optimales pour permettre à la culture d'exprimer tout son potentiel. Enfin, les performances de la culture ainsi que l'évolution de son développement et de sa croissance seront suivies.

4 Matériels et méthodes

La mise en place de l'essai ainsi que l'établissement des différentes méthodes de suivis se sont faits en totale collaboration avec les partenaires du projet « Perennial grains project ».

4.1 Localisation de l'essai

Le champ d'essai est situé à Gembloux (50°33'58,9''N, 4°42'22,7''E), dans la région agricole limoneuse de Hesbaye. Les conditions pédoclimatiques de cette région sont particulièrement avantageuses puisque le sol est limoneux à drainage naturel favorable (WalOnMap, 2014). D'ailleurs, dans cette parcelle, les rendements des grandes cultures sont généralement très bons allant jusqu'à 80T/ha pour la betterave et 10T/ha pour le froment d'hiver.

4.2 Analyse de sol

Une analyse de sol a été réalisée par le Centre Provincial de L'agriculture et de la Ruralité (membre du réseau REQUASUD). Les résultats sont visibles sur le Tableau 2. Le sol est décrit comme « Limon fin argileux très battant », un risque d'instabilité structurale est présent lors de pluies importantes.

Tableau 2 : Résultats de l'analyse de sol du champ d'essai de Kernza®.

Eléments			Optimum
Phosphore	10,83	mg/100g	4,6 - 7,5
Potassium	17,67	mg/100g	15,6-23,3
Magnésium	11,67	mg/100g	9,8 - 14,5
Calcium	204,00	mg/100g	
pH_KCl	6,23		6,0 -7,0
Carbone organique	8,01	g/kg	>11,0
Humus	1,63	%	
Manganèse	177,00	mg/kg	100-200
Cuivre	3,20	mg/kg	<4
Zinc	5,53	mg/kg	<8
Azote total	0,07	%	
Carbone/azote	11,33		8,0-12,0
pH_eau	7,37		
Texture			
Argile (<0,002mm)	18,37	%	
Limon fin (0,002-0,02mm)	30,77	%	
Limon grossier (0,02-0,05mm)	43,67	%	
Sable fin (0,05-0,2mm)	5,77	%	
Sable grossier (0,2-2mm)	1,47	%	
Indice de battance	2,31		

La mesure de l'ensemble des paramètres démontre que les teneurs en composants chimiques sont optimales, la fertilité est assurée bien qu'un déficit en matière organique du sol est présent (démonstré par la teneur en carbone organique).

4.3 Conditions climatiques et données météorologiques

Le climat tempéré de la Belgique offre généralement des étés frais et humides et des hivers doux et pluvieux, bien que certaines années peuvent montrer des exceptions. La quantité de

précipitations par an est en moyenne de 850mm de pluies et la température moyenne annuelle est de 10,5°C selon les données IRM de la station météorologique de Uccle (IRM, sd).

Afin de suivre les conditions météorologiques au plus près de la parcelle d'essai, ce sont les données du poste climatologique d'Ernage-Gembloux du Centre wallon de Recherches agronomiques (CRA-W) qui sont utilisées. Cette station a permis de quantifier les températures moyennes mensuelles (Tableau 3), les précipitations totales mensuelles (Tableau 4) ainsi que l'accumulation mensuelle des degrés jours (Tableau 5 et Tableau 6).

Tableau 3 : Température moyenne mensuelle (°C) sur la période de culture et les normales saisonnières.

Température moyenne mensuelle (°C)		
	Normales	2017-2018
Septembre	14,1	13,6
Octobre	10,6	12,6
Novembre	6,2	5,8
Décembre	3,3	3,7
Janvier	2,5	5,1
Février	2,8	0,2
Mars	6	4,9
Avril	8,7	11,8
Mai	12,6	15,3
Juin	14,6	16,9
Juillet	17,3	/
Août	17,1	/

Tableau 4 : Précipitations totales mensuelles (mm) sur la période de culture et les normales saisonnières.

Précipitations totales mensuelles (mm)		
	Normales	2017-2018
Septembre	62,4	63,8
Octobre	69,2	37,1
Novembre	67,9	83,7
Décembre	75,8	126
Janvier	69,4	97,9
Février	58,1	30,5
Mars	67,4	64,2
Avril	53,1	61,4
Mai	69,7	18,9
Juin	76,3	20,2
Juillet	71,4	/
Août	82	/
Total	927,3	583,5

L'année 2017 peut être considérée comme sèche et chaude (IRM, sd). Lors de la saison de croissance de Kernza®, l'automne a été doux avec des précipitations suffisantes. Le début de l'hiver a été pluvieux avec des quantités importantes de pluies dès la fin du mois de novembre 2017 jusqu'au mois de janvier 2018. Le mois de février et de mars ont quant à eux été assez froids. À partir du mois d'avril les températures ont été anormalement élevées et un déficit en eau est apparu dès le mois de mai. La tendance du début du mois d'août ne semble pas changer. Le printemps et l'été peuvent donc être considérés comme secs et chauds.

Tableau 5 : Accumulation mensuelle des degrés jours (°c) sur la période de culture, saison en cours et les deux saisons précédentes.

Accumulation mensuelle des degrés jours (°c) (entièreté du mois de septembre)			
	2015- 2016	2016- 2017	2017- 2018
Septembre	396,5	527	407,3
Octobre	699,4	815,8	798,5
Novembre	980,8	989,9	971,7
Décembre	1265,8	1123	1088,4
Janvier	1414	1163,4	1248,1
Février	1543,1	1321,7	1284,5
Mars	1695,2	1594,7	1445
Avril	1930,7	1823,9	1799,6
Mai	2335,4	2281	2274,1
Juin	2828,2	2815,7	2782
Juillet	3401	3362,3	/
Août	3962,2	3902,4	/
Total	3962,2	3902,4	2782

Tableau 6 : Accumulation mensuelle des degrés jours (°c) sur la période de culture, à partir du semis (22 sept) pour la saison en cours et les deux saisons précédentes.

Accumulation mensuelle des degrés jours (°c) (à partir du 22 septembre)			
	2015- 2016	2016- 2017	2017- 2018
Septembre (22->30)	107,2	138,1	125,2
Octobre	410,1	426,9	516,4
Novembre	691,6	601	689,6
Décembre	976,5	734,1	806,3
Janvier	1124,7	774,5	966
Février	1253,8	932,8	1002,4
Mars	1405,9	1205,8	1162,8
Avril	1641,4	1435	1517,5
Mai	2046,1	1892,1	1992
Juin	2538,9	2426,8	2499,9
Juillet	3111,7	2973,4	/
Août	3672,9	3513,5	/
Total	3672,9	3513,5	2499,9

4.4 Facteurs étudiés

L'objectif de l'expérimentation est le suivi des performances de la graminée pérenne, Kernza® sous différentes conditions de fertilisation azotée. De ce fait, différentes quantités d'azote et plusieurs moments d'application, selon les stades de développement de l'espèce, sont mis en place. Au printemps, deux moments d'application ont lieu : au stade tallage ainsi qu'au stade floraison. Le troisième moment sera effectué à l'automne, lors de la repousse après récolte des grains. L'engrais utilisé est du nitrate d'ammonium à 27%.

L'étude devait également porter sur l'implantation d'un couvert de trèfle afin d'observer les effets de sa présence et de son absence. Malheureusement l'implantation du trèfle blanc à l'automne 2017 n'a pas été concluante. Celui-ci a été détruit par deux applications d'herbicides ciblant les dicotylédones ainsi que par les basses températures de l'hiver. Si l'humidité est suffisante, un trèfle devrait être semé après la récolte de la graminée.

Les différentes modalités des facteurs étudiés sont résumées sur le Tableau 7. Le Facteur 1, concernant la culture compagne de trèfle ne sera donc pas pris en compte dans ce travail de fin d'étude.

Tableau 7 : Modalités des facteurs étudiés du champ d'essai de Kernza®.

Facteur 1	Facteur 2			Modalités
	Fertilisation tallage	Fertilisation floraison	Fertilisation automne	
Sans couvert (SC)	0 kg N	0 kg N	0 kg N	1
	50 kg N	0 kg N	0 kg N	2
	50 kg N	0 kg N	50 kg N	3
	100 kg N	0 kg N	0 kg N	4
	100 kg N	0 kg N	50 kg N	5
	0 kg N	100kg N	0 kg N	6
	0 kg N	100 kg N	50 kg N	7
Couvert de Trèfle (IC)	0 kg N	0 kg N	0 kg N	8
	50 kg N	0 kg N	0 kg N	9
	50 kg N	0 kg N	50 kg N	10
	100kg N	0 kg N	0 kg N	11
	100 kg N	0 kg N	50 kg N	12
	0 kg N	100 kg N	0 kg N	13
	0 kg N	100 kg N	50 kg N	14

Autour du champ d'essai de Kernza®, des bandes de froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.) ont été implantées. Cela permet de mettre en relation le développement de *Th. intermedium* et du froment, les rendements grains, l'indice de récolte et les biomasses aériennes et racinaires sont également comparés.

4.5 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est un criss-cross avec deux facteurs fixes : la présence ou non d'un couvert de trèfle et la fertilisation azotée. Comme cela est visible sur la Figure 3, chaque objet, dans chaque répétition, possède deux parcelles. L'une sert à mesurer le rendement en grains et la deuxième parcelle sert uniquement à faire des observations et des prélèvements tout au long de la saison de culture.

Entre les deux répétitions R1 et R2 et les deux autres répétitions R3 et R4, il existe une bande de Kernza® qui ne fait, normalement, pas partie de l'essai en tant que tel. La fertilisation qui y a été appliquée est la même que celle des bandes de froment entourant l'essai avec une dose de 100 unités d'azote par hectare.

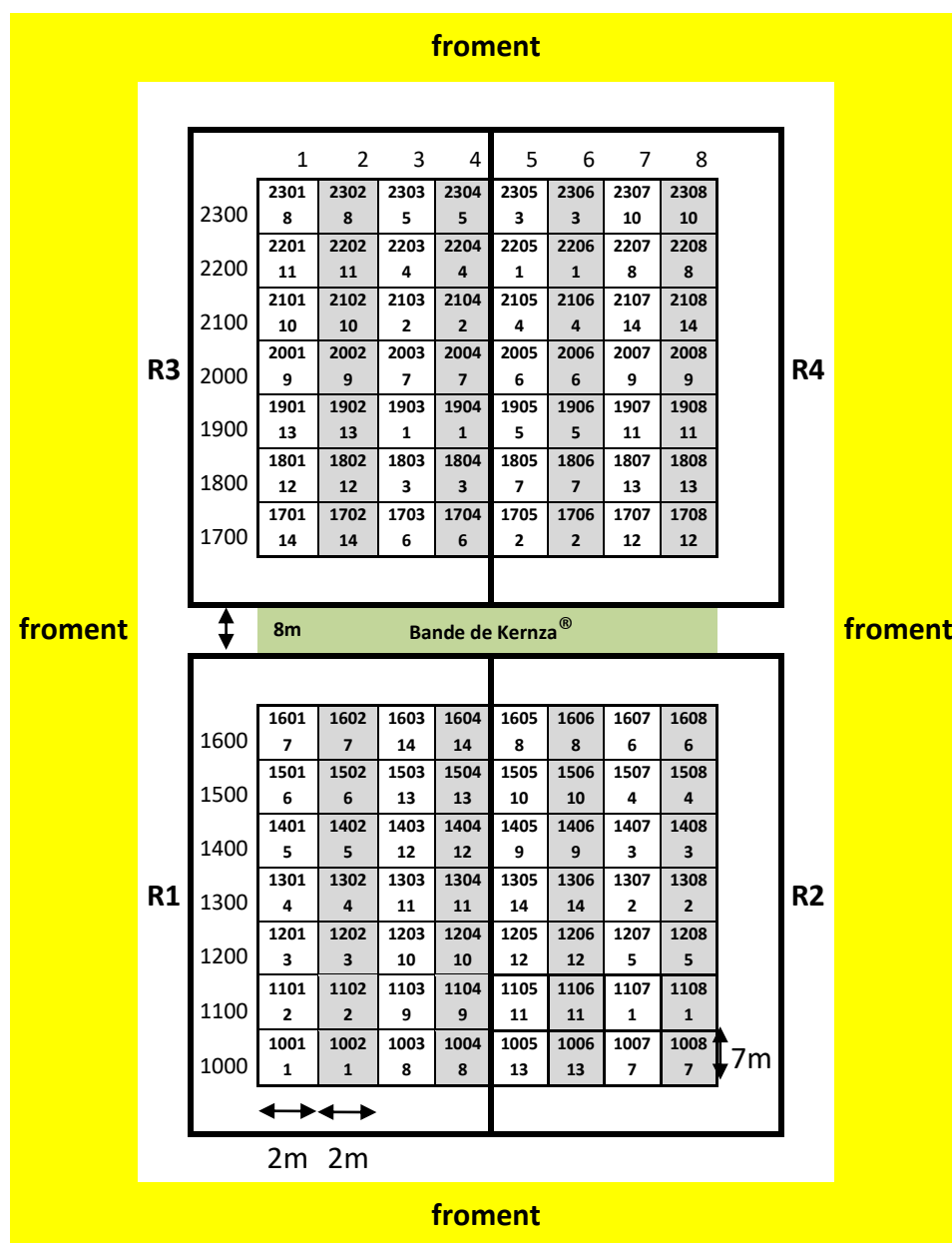


Figure 3 : Schéma du champ d'essai de Kernza® avec les différentes parcelles (bandes blanches = parcelles de rendement grains, bandes grises = parcelles de prélèvement, bandes jaunes = parcelles de froment, bande verte = bande de Kernza®).

4.6 Opérations culturales

L'ensemble des opérations culturales réalisées sur la parcelle d'essai de Kernza® sont résumées sur le Tableau 8.

Tableau 8 : Ensemble des opérations culturales réalisées sur le champ d'essai de Kernza®.

Date	Opérations culturales
22-sept-18	Semis de Kernza® (TLI-C5) après préparation du sol (labour) - Interligne de 25cm - Dose de 20kg/ha, PMG de 8,05g Semis du trèfle blanc dans les interlignes - Dose de 5kg/ha
25-sept-18	Roulage du semis
19-oct-18	Semis des bandes de froment entourant le champ d'essai - Variété précoce : RGT Sacramento - Interligne de 12,5 cm
17-nov-18	Désherbage chimique : Bofix® à 4l/ha (clopyralid 20g/l, fluroxypyr 40 g/l et 2,4 MCPA 200 g/l)
23-mars-18	Fertilisation tallage : 0, 50 ou 100kg de N/ha
13-avr-18	Désherbage chimique : Basagran® à 2l/ha (87%Bentazon) et Gratil® à 40g/ha (75 % amidosulfuron)
17-avr-18	Fertilisation des bandes de froment et de la bande de Kernza® : 100kg de N/ha
24-mai-18	Désherbage mécanique : passage de la bineuse
28-mai-18	Désherbage mécanique : passage de la bineuse
15-juin-18	Fertilisation floraison : 0 ou 100kg de N/ha

4.7 Observations et variables mesurées

4.7.1 Estimation de la levée de Kernza®

- Méthode

Afin d'estimer la levée des plantules, un comptage a été réalisé un mois après le semis (19 octobre). Le nombre de plantes a été compté sur 50 cm d'une ligne de semis. Ce comptage a été effectué 4 fois aléatoirement dans chacune des parcelles de prélèvement. La densité de plantes par m² a ensuite été estimée.

N.B. : pour calculer le nombre de grains semés par m², la formule suivante est utilisée :

$$\text{Densité en grains/m}^2 = \frac{\text{Quantité en } \frac{\text{kg}}{\text{ha}}}{\text{PMG}} \times 100$$

Le poids de mille grains (PMG) a été estimé en pesant quatre lots de 500 semences. Le poids moyen de 500 grains a ensuite été multiplié par deux pour obtenir le PMG.

- Traitement statistique des données

Une transformation des données a été réalisée grâce à la fonction BOXCOX du logiciel R studio afin de rencontrer les conditions d'application de l'ANOVA (testées sur les résidus de l'ANOVA), p-valeur>0,05. Une ANOVA du nombre de plantules par m² en fonction du facteur « Blocs aléatoires » a ensuite pu être effectuée. Ce facteur a été considéré comme fixe afin d'observer les différences de levée, si il y a, entre les blocs aléatoires de la parcelle.

4.7.2 Observation des maladies

Une simple observation des symptômes présents sur les plantes de *Th. intermedium* a été réalisée. Par la présence mineure de ces symptômes, le suivi n'a pas été approfondi.

4.7.3 Relevé des adventices

- Composition de la flore adventice

Afin de caractériser la flore d'adventices présente dans le champ d'essai, les espèces ont été identifiées pendant la saison de culture.

- Relevé du nombre d'adventices avant et après passage de la bineuse

Un relevé des adventices a été réalisé le 18 mai après la pulvérisation des deux herbicides et avant les passages de la bineuse. Dix quadrats (0,5m x 0,5m) ont été placés aléatoirement dans la parcelle de Kernza®, le nombre d'adventices y a simplement été dénombré (sans notification de l'espèce et du stade de développement). Le nombre d'adventices par m² a ensuite été calculé. Après les passages de la bineuse, le 20 juin, la même méthode de comptage a été appliquée dans la parcelle.

- Relevé du nombre d'adventices entre Kernza® et le froment

Le 20 juin, 10 quadrats ont également été placés aléatoirement dans les bandes de froment entourant la parcelle de Kernza® afin de comparer le nombre d'adventices présent par m² dans les deux cultures.

- Traitement statistique des données

○ Relevé du nombre d'adventices avant et après passage de la bineuse

Après transformation des variables (fonction BOXCOX), une ANOVA du nombre d'adventices par m² en fonction du facteur fixe « Date d'échantillonnage » a été réalisée grâce au logiciel R studio. Les conditions d'application ont été testées sur les résidus de l'ANOVA (p-valeur>0,05).

○ Relevé du nombre d'adventices entre Kernza® et le froment

Une ANOVA du nombre d'adventices par m² à un facteur fixe « Espèce cultivée » a été utilisée grâce au logiciel R studio. Les conditions d'application ont été testées sur les résidus de l'ANOVA (p-valeur>0,05).

4.7.4 Observation du stade de développement de Kernza®

4.7.4.1 Utilisation de l'échelle BBCH

- Méthode

L'observation du stade de *Th. intermedium* selon l'échelle BBCH pour les céréales (Annexe 4) a débuté le 19 octobre. Durant l'automne et l'hiver trois observations ont été effectuées : le 19 octobre, le 29 novembre et le 12 mars. À partir du 30 mars, le relevé a été hebdomadaire. Les dates d'observation sont celles-ci : 30 mars, 6 avril, 18 avril, 24 avril, 30 avril, 7 mai, 14 mai, 22 mai, 28 mai, 4 juin, 11 juin, 18 juin, 25 juin, 2 juillet, 9 juillet, 16 juillet, 23 juillet, 30 juillet. Pour chaque relevé, 20 plantes ont été prélevées aléatoirement dans la parcelle.

- **Comparaison du développement de Kernza® avec celui du froment**

Afin de comparer le développement de Kernza® avec celui du froment d'hiver implanté autour de la parcelle d'essai, l'échelle BBCH pour les céréales a également été utilisée (Annexe 4). Le stade a été observé sur 20 plantes de froment prises aléatoirement dans les bandes à partir du 24 avril. Les dates de prélèvement sont celles-ci : 24 avril, 30 avril, 7 mai, 14 mai, 22 mai, 28 mai, 4 juin, 11 juin, 18 juin, 25 juin, 2 juillet, 9 juillet, 16 juillet.

- **Mise en relation du stade de développement avec la somme des degrés jours**

Les différents stades ont été mis en lien avec la somme des degrés jours. Ceux-ci sont comptés comme suit (données météorologiques du poste climatologique d'Ernage-Gembloux) :

$$DJ = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base}$$

T_{max} = Température maximale du jour

T_{min} = Température minimale du jour

T_{base} = Température de base à 0°C (Jungers *et al.*, 2018)

- **Traitement statistique des données**

Sur le logiciel R studio, une ANOVA à un facteur fixe « Espèce cultivée » du stade moyen de développement selon l'échelle BBCH a été réalisée. Les conditions d'application ont été vérifiées sur les résidus de l'ANOVA (p-valeur >0,05).

4.7.4.2 Utilisation de la Table de Moore *et al.* (1991)

- **Méthode**

Le stade a également été observé avec la table de Moore (Annexe 6), table spéciale pour les graminées pérennes fourragères où *Thinopyrum intermedium* a pu être décrite (Moore *et al.*, 1991).

Ce suivi a débuté le 14 mai, dès le stade élongation et s'est terminé le 2 juillet. Chaque semaine et dans chacune des parcelles de prélèvement, 15 cm d'une ligne de semis ont été prélevés à un endroit aléatoire de la parcelle. Dans toutes les talles prélevées, 5 talles ont été aléatoirement sélectionnées sur lesquelles le stade de développement a été estimé. À partir de l'épiaison, le stade de développement a été déterminé uniquement pour les tiges fertiles.

Comme pour l'utilisation de l'échelle BBCH, les différents stades sont mis en relation avec la somme des degrés jours.

L'utilisation de la table au stade élongation est un peu particulière. Le chiffre représentant le stade ne peut être déterminé qu'à l'initiation du stade gonflement. À ce stade, le nombre maximal de nœud des talles fertiles est considéré comme atteint et permet de caractériser les stades antérieurs. Le même principe est utilisé au stade végétatif pour le nombre de feuilles.

- **Calcul du MSC (mean stage by count)**

Beaucoup de variations dans les stades de développement sont présentes au sein des populations de graminées à pollinisation croisée comme *Th. intermedium*. Il est intéressant de

calculer le stade de développement moyen au sein de la population qui peut être décrit comme suit :

$$MSC = \sum_{i=0}^{4,9} \frac{S_i \times N_i}{C}$$

S_i = stade de développement (table de Moore), 0 à 4,9

N_i = nombre de talles au stade S_i

C = nombre total de talles

(Moore *et al.*, 1991)

- **Calcul du S_{MSC} (standard deviation of the mean stage by count)**

La déviation standard du stade moyen permet d'interpréter la variabilité de maturité qui existe dans la population de *Th. intermedium*.

$$S_{MSC} = \sqrt{\sum_{i=0}^{4,9} \frac{(S_i - MSC)^2 \times N_i}{C}}$$

MSC = mean stage by count

S_i = stade de développement (échelle de Moore), 0 à 4,9

N_i = nombre de talles au stade S_i

C = nombre total de talles

(Moore *et al.*, 1991)

Un faible S_{MSC} indiquera que la plupart des talles ont le même degré de maturité et devraient avoir une maturité proche du MSC.

- **Traitement statistique des données**

Avec le logiciel R studio, une première ANOVA du stade moyen de développement (table de Moore) selon les 2 facteurs fixes « Fertilisation azotée » et « Date de prélèvement » et le facteur aléatoire « Blocs » a été réalisée. Cependant, les conditions d'application (testées sur les résidus de l'ANOVA) n'ont pas été respectées (p -valeur < 0,05) même après transformation des données. Du fait de l'interaction entre les deux facteurs fixes, indiquée par l'ANOVA, un test non paramétrique a été réalisé pour chacune des dates de prélèvement. Un test de Kruskal-Wallis à un facteur « Fertilisation azotée » a été réalisé sur le stade moyen de développement.

4.7.5 Caractéristiques morphologiques et de développement

4.7.5.1 Nombre de talles et d'épis

- **Méthode**

Ce suivi s'est effectué en même temps que le celui du stade de développement selon la table de Moore. Il a donc débuté le 14 mai pour se terminer le 2 juillet, celui-ci était hebdomadaire. La méthode est la même que pour l'estimation du stade de Moore, 15cm d'une ligne de semis sont prélevés aléatoirement dans chaque parcelle de prélèvement. Sur ces 15 cm, le nombre de talles a été dénombré. Dès le stade épiaison, le nombre d'épis a également été relevé en

comptant séparément le nombre de tiges fertiles (portant un épi) et de tiges stériles. Les nombres d'épis et de talles par m² ont ensuite été calculés.

- ***Traitement statistique des données***

Sur le logiciel R studio, une transformation des données à l'aide de la fonction BOXCOX a été réalisée pour rendre les données normales. Les conditions d'application étant respectées (p-valeur >0,05, testées sur les résidus de l'ANOVA). Deux ANOVA à deux facteurs fixes « Date de prélèvement » et « Fertilisation azotée » et un facteur aléatoire « Blocs » ont été réalisées. L'une pour le nombre de talles par m² et l'autre pour le nombre d'épis par m². Pour compléter l'analyse du nombre de talles par m², deux tests SNK ont été faits, l'un en fonction du facteur « Fertilisation azotée » et l'autre en fonction du facteur « Date de prélèvement », les deux facteurs étant indépendants. Un seul test SNK a été réalisé pour le nombre d'épis et celui-ci était en fonction du facteur « Fertilisation azotée ».

4.7.5.2 Hauteur des plantes et longueur des épis

- ***Méthode***

Le 18 juin, 15 cm d'une ligne de semis ont été prélevés aléatoirement pour chacune des parcelles de prélèvement. Les plantes ont été coupées au ras du sol. Dans ces 15 cm, 5 tiges fertiles ont été choisies aléatoirement. Sur celles-ci, la hauteur du sol à l'extrémité de l'épi a été mesurée ainsi que la longueur de l'épi. Le 30 juillet, un deuxième relevé de la hauteur des plantes ainsi que de la longueur des épis a été réalisé. Pour ce faire, 5 tiges fertiles ont été mesurées aléatoirement dans chacune des parcelles de prélèvement.

- ***Traitement statistique des données***

Deux ANOVA à deux facteurs fixes « Fertilisation azotée » et « Date de prélèvement » et un facteur aléatoire « Blocs » ont été réalisées. L'une pour la longueur des épis et l'autre pour la hauteur de la plante. Les conditions d'application ont été vérifiées sur les résidus de l'ANOVA (p-valeur>0,05). L'égalité des variances n'a cependant pas été respectée pour la hauteur des plantes, même après transformation des données. Des tests SNK de la hauteur des plantes et de la longueur des épis en fonction du facteur « Fertilisation azotée » ont ensuite été réalisés sur le même logiciel (R studio) pour les différentes dates de prélèvement.

4.7.6 Caractérisation de la biomasse aérienne

4.7.6.1 Quantification de la biomasse aérienne

- ***Méthode***

La biomasse aérienne a été échantillonnée dans chacune des parcelles de prélèvement et à différents stades de développement. Les différents stades de prélèvements étaient ceux-ci : redressement (3 mai), épiaison (6 juin), floraison (27 juin). L'échantillonnage s'est fait sur 50 cm de 2 lignes de semis, les plantes ont été fauchées au ras du sol. Pour les deux derniers prélèvements, la biomasse des épis a été écartée de la biomasse aérienne. Les plantes ont ensuite été placées à l'étuve à 60°C pendant au moins 72h (jusqu'à poids constant). Une fois la biomasse sèche, chaque échantillon a été pesé. Pour les deux derniers prélèvements, la biomasse des épis et celle du reste de la partie aérienne ont pu être pesées séparément. Enfin, la biomasse aérienne totale et des épis ont été calculées par m².

- **Comparaison de la biomasse aérienne de Kernza® avec le froment**

À titre de comparaison, deux prélèvements de biomasse ont été faits dans les bandes de froment entourant la parcelle. Un premier au stade floraison (6 juin) et un deuxième au moment de la récolte (17 juillet). La méthode d'échantillonnage était la même que pour Kernza® et quatre répétitions ont été réalisées. Les épis ont également été écartés de la biomasse aérienne afin de pouvoir les peser séparément. La biomasse aérienne totale et des épis ont ensuite été calculées par m².

- **Traitement statistique des données**

Sur le logiciel R studio, le poids sec de la biomasse aérienne totale (épis compris) et le poids sec des épis par m² de Kernza® ont été étudiés en fonction des deux facteurs fixes « Stade de prélèvement » et « Fertilisation azotée » et du facteur aléatoire « Blocs ». Etant donné l'interaction entre les facteurs fixes, plusieurs ANOVA à un seul facteur fixe « Fertilisation azotée » ont été réalisées pour chacun des stades de développement. La condition d'application (testées sur les résidus des ANOVA) de normalité est respectée (p-valeur > 0,05), ce qui n'a pas toujours été le cas pour l'égalité des variances. Un test SNK selon le facteur « Fertilisation azotée » a ensuite été réalisé.

Sur le même logiciel, la proportion de la biomasse des épis relativement à la biomasse aérienne totale a également été étudiée. Pour Kernza®, elle a été étudiée en fonction des facteurs fixes « Fertilisation azotée » et « Dates de prélèvements » et du facteur aléatoire « Blocs ». Ensuite, deux ANOVA à un facteur fixe « Fertilisation azotée » pour les deux dates de prélèvements ont été réalisées. Les conditions d'application (testées sur les résidus de l'ANOVA) n'ont pas été respectées pour le stade épiaison (p-valeur < 0,05). Ensuite un test SNK selon le facteur « Fertilisation azotée » a été réalisé.

En outre, cette proportion a été comparée au froment. La normalité n'étant pas rencontrée (p-valeur < 0,05), le test non paramétrique de Kruskal-Wallis de cette proportion en fonction du facteur fixe « Espèce cultivée » a été réalisé (sur R studio).

4.7.6.2 Analyse de la valeur alimentaire de la biomasse aérienne

- **Méthode**

La biomasse aérienne a été prélevée à différents stades de développement : 2 nœuds (15 mai), 3 nœuds (24 mai), épiaison (6 juin) et floraison (27 juin). Le facteur fertilisation a également été pris en compte. Les différentes modalités de fertilisation étaient les suivantes : 0, 50 et 100 unités d'azote par hectare, toutes apportées lors du tallage. Ainsi, 6 parcelles ont été choisies aléatoirement dans l'ensemble du champ d'essai afin de posséder deux répétitions pour chaque modalité de fertilisation, ces parcelles étaient les mêmes à chaque stade de prélèvement.

Les différents échantillons ont été réalisés dans les parcelles de prélèvement où 50 cm de deux lignes de semis ont été fauchés au ras du sol, les plantes ont ensuite été placées à l'étuve (60°C) pendant au moins 3 jours (jusqu'à poids constant). Une fois la biomasse bien sèche, les plantes ont été broyées à 2mm (particules fines et homogènes). Une fois broyées, les échantillons ont été mélangés lentement pour homogénéiser et ramener les particules fines qui

auraient sédimenté dans le fond du récipient. Pour chaque échantillon, deux prélèvements d'environ 20g ont été placés, chacun, dans une cellule de mesure « quarter cup » afin d'être passés au spectromètre XDS FOSS- VISS/NIR (400nm – 2500nm, dispersive monochomator). Enfin, pour estimer les différents composants de la valeur alimentaire, une moyenne des deux mesures a été réalisée et Kernza® a été comparée à un ensilage herbe - herbe foin de la base de données du réseau REQUASUD. Les paramètres estimés ont permis de calculer les différentes valeurs nutritives (VEM, VEV, DVE, OEB) du système hollandais.

- ***Traitement des données***

Etant donné le faible nombre de répétitions (2), aucune analyse statistique n'a été réalisée. Les données ont simplement été moyennées afin de connaître l'ordre de grandeur des différentes composantes de la valeur alimentaire en fonction du stade de développement et de la fertilisation azotée.

4.7.7 Caractérisation de la biomasse racinaire

4.7.7.1 Comparaison de la biomasse racinaire de Kernza® et du froment

- ***Méthode***

Afin de comparer les biomasses racinaires du froment et de Kernza®, des prélèvements de biomasse ont été réalisés par carottage. Pour ces prélèvements, deux endroits aléatoires ont été choisis, l'un dans les bandes de froment entourant Kernza® et l'autre dans le champ de Kernza® (bandes vertes Figure 3).

Une sonde de 3 cm de diamètre a été enfoncée par la force du tracteur jusqu'à 90cm de profondeur. Pour chaque culture, le prélèvement était identique, quatre carottages au même endroit de la parcelle ont été réalisés sur trois horizons : 0-30 cm, 30-60cm et 60-90cm. Les deux premiers carottages ont été faits dans la ligne de semis et les deux autres carottages ont été faits dans l'interligne. Cette méthode ne permet pas de prendre en compte la variabilité du champ et a été réalisée à titre indicatif.

Les prélèvements ont été faits au même stade de développement, à la floraison. Pour le froment, les carottages ont eu lieu le 6 juin, tandis que pour Kernza®, ils ont eu lieu le 26 juin. La fertilisation azotée a été la même.

Une fois la biomasse prélevée, les racines ont été lavées et triées des résidus de culture. Ensuite, les échantillons ont été placés à l'étuve pendant au moins 3 jours (jusqu'à poids constant) puis pesés.

- ***Traitement des données***

Aucune analyse statistique n'a été réalisée. Les données ont simplement été moyennées en fonction de l'endroit de prélèvement (ligne, interligne, horizon 0-30 cm, horizon 30-60 cm et horizon 60-90 cm) et la biomasse racinaire par m² a été calculée. Celle-ci a été comparée entre les deux cultures.

4.7.7.2 Comparaison de biomasse racinaire de Kernza® sous différentes fertilisations azotées

- Méthode

Pour comparer la biomasse racinaire entre les différentes fertilisations azotées, les modalités 1, 2 et 4 ont été choisies pour représenter la fumure 0, 50 et 100 unités d'azote par hectare appliquées au tallage respectivement. Ces parcelles ont été prélevées pour chacun des blocs aléatoires du champ et la mesure a été effectuée à la floraison, le 26 juin.

Le prélèvement s'est fait à l'aide de tubes en PVC d'un diamètre de 11cm et d'une hauteur de 25cm. Cette méthode est moins destructive pour la parcelle que le carottage sur 90cm. La mesure permet uniquement d'obtenir un aperçu de la biomasse racinaire sur ces premiers cm, la répartition de celles-ci dans les horizons du sol n'est pas étudiée.

Une fois la biomasse prélevée sur les 25 cm, les racines ont été lavées et triées des résidus de culture. Ensuite, les échantillons ont été placés à l'étuve pendant au moins 3 jours (jusqu'à poids constant) puis pesés. La biomasse racinaire moyenne par m² a pu être calculée.

- Traitement statistique des données

Une ANOVA à un facteur fixe « Fertilisation azotée » et un facteur aléatoire « Blocs » a été réalisée. Pour que les conditions d'application soient vérifiées (testées sur les résidus de l'ANOVA), une transformation logarithmique des données a été appliquée. Cette ANOVA a été réalisée grâce au logiciel R studio.

5 Résultats et discussions

5.1 Suivi de la culture :

5.1.1 Estimation de la levée de Kernza®

Les statistiques descriptives du comptage du nombre de plantules par m² en fonction des différents blocs aléatoires de la parcelle sont résumées dans l'Annexe 1. L'ANOVA a révélé une égalité des moyennes du nombre de plantes par m² entre les blocs aléatoires avec une p-valeur >0,05 comme cela est visible sur la Figure 4.

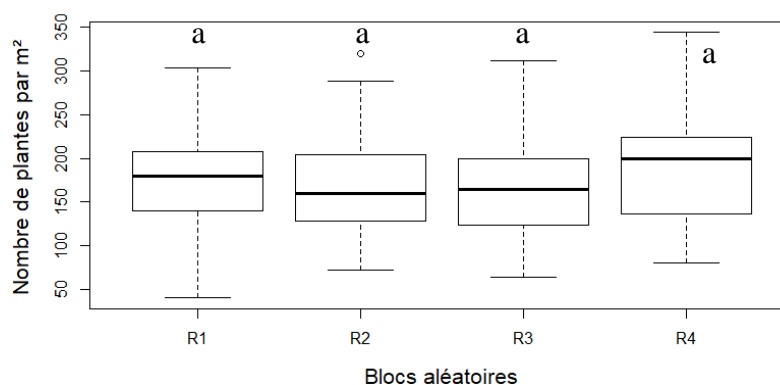


Figure 4 : Nombre de plantes par m² en fonction des blocs aléatoires de la parcelle.

La levée a donc été similaire entre les différents blocs aléatoires de la parcelle d'essai. La densité moyenne de plantes par m² était, avant l'hiver, de 176 plantules/m². La densité après l'hiver n'a pas pu être mesurée du fait du développement des plantules, celui-ci ne permettait pas de distinguer les différentes plantes dans la ligne de semis.

La densité de semis était de 20kg/ha avec un poids de mille grains (PMG) faible de 8,05g. Les semences étant vêtues, ce PMG comprend les enveloppes des grains. Ainsi, le nombre de grains par m² était de 248 grains/m². Globalement, la levée a été assez hétérogène où des manques à la levée pouvaient être visibles sur plusieurs centimètres de la ligne de semis (Figure 5). Le pourcentage de levée était d'environ 70%. Environ un tiers des graines n'aurait pas germé. A titre indicatif, SECOBRA, en France, a réalisé des tests de germination cette année sur les semences de Kernza® (TLI-C5) et le taux de germination dans des conditions contrôlées était de 88%.



Figure 5 : Manque à la levée des plantules de Kernza®.

Différentes causes peuvent expliquer ces petits manques à la levée : une mauvaise structure de sol lors du semis, un équipement de semis non adapté ou le semis de petites graines encore vêtues. La taille des semences était assez variable, les petites semences peuvent ne pas avoir eu l'énergie germinative suffisante pour émerger du sol. En outre, au Canada, lorsque que l'espèce est implantée pour la production de semences des variétés fourragères, Kruger (sd) conseille un semoir avec différentes caractéristiques. Un dispositif pour le contrôle de la profondeur sur le disque ouvreur devrait être présent pour maintenir une pénétration superficielle. De plus, dans la trémie du semoir, les semences devraient être mélangées pour éviter leur agrégation. L'écoulement des graines à la sortie du semoir doit être fluide.

Lawrence *et al.*, (1991) ont observé, en serre, une germination de 65% quand les graines sont semées à 2cm de profondeur, dans l'étude, ce pourcentage diminue avec la profondeur. Au Montana, Hybner & Jacobs (2012) conseillent un semis à 1,2 cm de profondeur pour 11 à 14kg de semences pures par hectare pour les variétés fourragères de *Th. intermedium*. Un placement peu profond de la graine et un bon tassement sont essentiels pour obtenir un bon taux de germination. Dans notre champ d'essai, les semences ont été placées à moins de 2 cm de profondeur et un passage de rouleau a été réalisé après le semis pour assurer un bon contact entre la graine et le sol. Un sol suffisamment tassé en profondeur dès 2 à 3 cm permet à l'eau de remonter par capillarité et d'obtenir une humidité suffisante dans le lit de germination (Widar *et al.*, sd).

Prêter un soin particulier à l'implantation de la culture devrait améliorer la germination des graines. Une bonne préparation du sol optimisant les conditions du lit de germination (oxygène, humidité, contact graine et terre,...) (Livre Blanc Céréales, 2017), un placement peu profond de la graine (entre 1 et 2 cm) et surtout un tri des semences en éliminant les grains les plus petits devraient permettre d'améliorer le pourcentage de levée.

5.1.2 Observation des maladies

Des signes de maladies ont été observés, notamment des pourritures au bas de la tige ainsi que de petites taches sur le feuillage.

- Lésions sur la tige

Les lésions observées se trouvaient sur la gaine foliaire, au bas de la tige, sous le premier nœud. Les symptômes sont relativement semblables au Piétin verse (*Oculimacula yallundae* ou *O. acutiformis*) avec des taches ocellées bordées d'un liseré brun diffus (ARVALIS-Institut du végétal, sd). En général, les lésions n'étaient pas présentes sur la tige lorsque que la gaine foliaire est enlevée. Cependant de très petites taches diffuses pouvaient tout de même s'y retrouver, celles-ci sont visibles sur la Figure 6. La contamination par le Piétin verse peut créer une ou deux taches diffuses sous le premier nœud de la tige lorsque la gaine est soulevée. Cependant aucun point noir n'a pu être observé sur la tige avec le microscope binoculaire, ceux-ci correspondent aux amas mycéliens (stroma). Aucun diagnostic ne peut être donné, l'observation des symptômes au champ n'est pas suffisante. Pour confirmer le diagnostic, des méthodes d'analyses moléculaires, sérologiques ou encore microbiologiques devraient être utilisées (ARVALIS-Institut du végétal, sd).

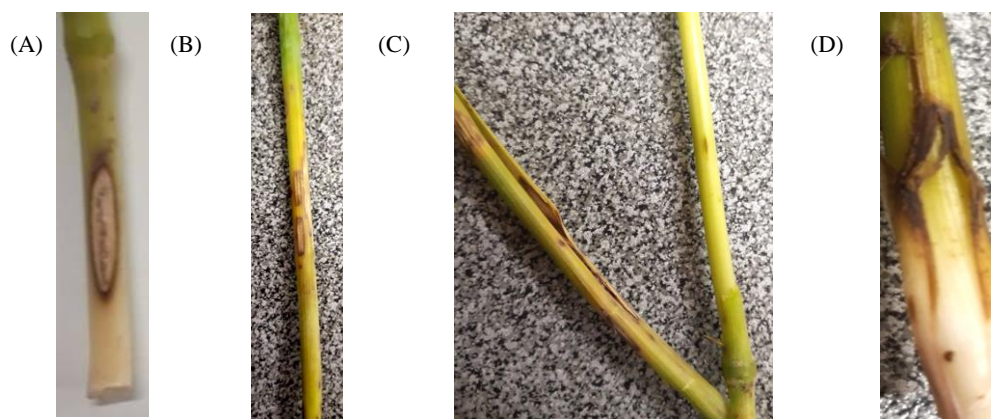


Figure 6 : (A) et (B) Photos de lésions sur une gaine foliaire, (C) photo d'une lésions sur une gaine foliaire et petite tache diffuse sur la tige, (D) photo d'une pourriture de la gaine foliaire 14-05-2018.

- Maladies foliaires

Le feuillage de Kernza® a été relativement sain tout au long de la saison ce qui est en accord avec Wills *et al.* (1998) qui nous signale que la graminée ne présente pas de problèmes particuliers vis-à-vis des maladies. Cependant, quelques plantes ont présenté de petites lésions brunâtres sur leurs feuilles, visibles sur la Figure 7.

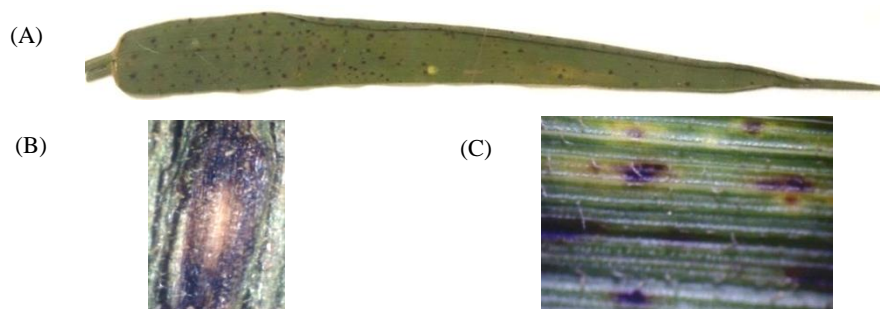


Figure 7 : (A) Photo de lésions sur une feuille, (B) et (C) photos des lésions sur une feuille de Kernza® prises au microscope binoculaire 20-06-18.

Lors de l'inspection des lésions au microscope binoculaire, aucune structure de champignons pathogènes n'a été observée. Ces petites taches n'ont pas évolué au cours de la saison de croissance. En général, les symptômes étaient présents sur les feuilles les plus jeunes. Il est difficile de savoir si ceux-ci proviennent d'une infection fongique ou si ces taches représentent simplement une expression physiologique de la plante. En effet, les jeunes feuilles peuvent être sensibles à différents stress (Arvalis-Institut du végétal, sd). Si les symptômes persistent et s'accroissent, des recherches approfondies sur les potentiels pathogènes et des tests complémentaires en laboratoires devraient être réalisés afin d'émettre un diagnostic.

À présent aucun pathogène n'a été identifié en France, dans le réseau d'expérimentation. De même, sur notre champ d'essai, la présence de pathogènes ou de ravageurs connus en céréales n'a pas été détectée. L'utilisation de produits de protection des plantes n'a donc pas été nécessaire lors de la saison culturale. Si la situation reste identique les prochaines années, les coûts de production relativement à un blé annuel seraient réduits. Effectivement, le blé annuel peut nécessiter plusieurs applications de produits fongicides et insecticides (variables selon les années et la pression).

5.1.3 Relevé des adventices

- *Composition de la flore adventice*

La composition de la flore adventice est celle-ci :

- Achillée millefeuille : *Achillea millefolium* L.
- Brome mou : *Bromus hordeaceus* L.
- Coquelicot : *Papaver rhoas* L.
- Chénopode blanc : *Chenopodium album* L.
- Gaillet gratteron : *Galium aparine* L.
- Jouet du vent : *Apera spica-venti* (L.) P.B.
- Lampsane commune : *Lapsana communis* L.
- Liseron des champs : *Convolvulus arvensis* L.
- Matricaire camomille : *Matricaria chamomilla* L.
- Morelle noire : *Solanum nigrum* L.
- Mourons des oiseaux : *Stellaria media* Vill.
- Pâturin annuel : *Poa annua* L.
- Pensée des champs : *Viola arvensis* Murray
- Véronique de perse : *Veronique persica* Poir.
- Vulpin des champs : *Alopecurus myosuroides* Huds.

Au début de la saison, on pouvait également retrouver:

- Des repousses de colza : *Brassica napus* L.
- Lamier pourpre : *Lamium purpureum* L.

La culture a été semée relativement tôt, de ce fait, les conditions étaient encore idéales pour la germination des graines d'adventices et celles-ci se sont ainsi bien développées comme le montre la Figure 8.

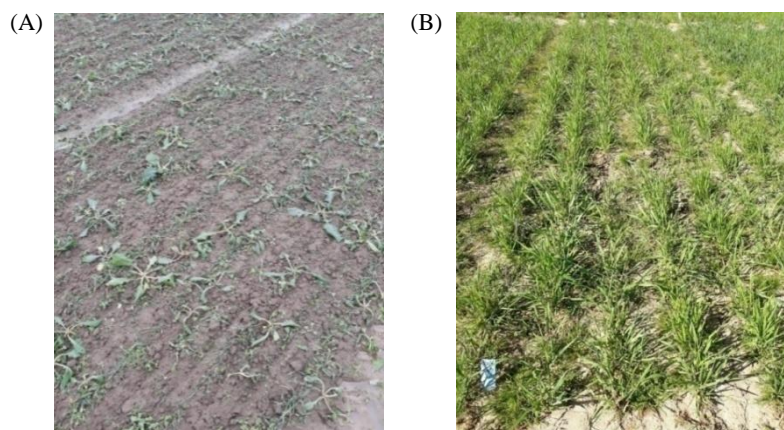


Figure 8 : Présence d'adventices (A) le 29-11-17 après le premier désherbage chimique et (B) le 07-05-18 après le deuxième désherbage chimique dans le champ d'essai de Kernza®.

Au vu de l'important développement des adventices et d'une trop faible concurrence de Kernza® vis-à-vis de celles-ci, un premier traitement anti-dicotylédones a été réalisé le 17 novembre afin de les éliminer. Celui-ci a permis de détruire les repousses de colza qui étaient assez gênantes mais la majorité des autres adventices n'ont pas été suffisamment affectées par le traitement et ont persisté après l'hiver. L'établissement de la culture a été relativement lent, la compétition de ces adventices pour les ressources était bien présente tout au long de la

saison. Au printemps, une deuxième application d'herbicide anti-dicotylédones a été réalisée, cependant celle-ci n'a pas été très efficace, les conditions n'étaient pas idéales avec une faible humidité et un stade de développement trop avancé des espèces présentes. En outre, ces herbicides n'ont pu cibler que les dicotylédones, un herbicide ciblant les monocotylédones aurait pu détruire la culture. Les graminées n'ont donc pas pu être contrôlées. Du fait de la forte pression des adventices (nombre élevé et développement important), nous avons testé deux passages de bineuse en guise de rattrapage. En plus de retirer un certain nombre d'adventices, cela a permis de casser la croûte de battance entre les lignes de Kernza® qui s'est établie en hiver, améliorant la pénétration de l'eau dans le sol (Figure 9). Cependant, rien n'a pu être fait contre les espèces présentes dans les lignes de semis.

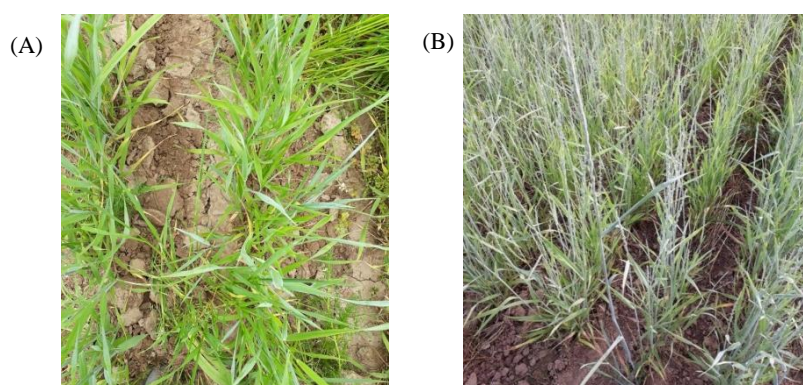


Figure 9 : Effet du binage (A) le 24-05-18 et (B) le 04-06-18 dans le champ d'essai de Kernza®.

Au printemps, la canopée formée par les plantes de Kernza® n'était pas suffisamment étouffante et la lumière a pu passer au travers de celle-ci. Les interlignes sont importants et ont offert un espace plutôt dégagé pour les petites adventices qui ont eu l'occasion de germer après les passages de bineuse. Tandis que la majorité des espèces présentes depuis le début de la culture, non éliminées par les passages de bineuse, ont atteint le stade de reproduction. Des graines de graminées ou de pensées des champs ont par exemple été libérées sur la parcelle. Après l'épiaison, la canopée est devenue suffisamment étouffante et les plantes de Kernza® semblaient dominer l'ensemble des adventices.

- Relevé du nombre d'adventices avant et après passage de la bineuse

Les résultats de l'analyse statistique du nombre d'adventices par m² en fonction de la date d'échantillonnage (avant et après les passages de la bineuse) nous indique une différence hautement significative entre les moyennes p-valeur <0,01 (Figure 10).

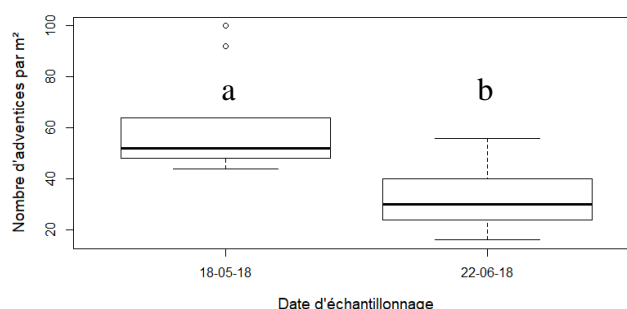


Figure 10 : Nombre d'adventices par m² en fonction de la date d'échantillonnage dans le champ d'essai de Kernza®.

Le nombre moyen d'adventices par m² avant le désherbage mécanique était de 60 et a été réduit à 34 après les passages de bineuse, les statistiques descriptives sont présentées dans l'Annexe 2. L'effet immédiat de ce désherbage a donc été positif. Pour avoir une estimation plus juste de l'effet des deux binages, des quadrats auraient pu être placés aléatoirement dans la parcelle de manière permanente. L'effet à différents moments sur les mêmes adventices (endroits fixes) aurait été observé. La distribution aléatoire des adventices aurait ainsi pu être mieux contrôlée.

- **Relevé du nombre d'adventices entre Kernza® et le froment**

L'analyse statistique du nombre d'adventices par m² en fonction de l'espèce cultivée (Kernza® ou froment) montre une différence de moyenne hautement significative, p-valeur <0,01 (Figure 11). Les statistiques descriptives du nombre d'adventices par m² en fonction de l'espèce sont disponibles dans l'Annexe 3.

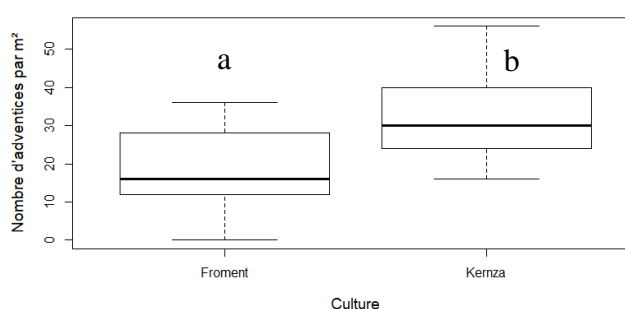


Figure 11 : Nombre d'adventices par m² en fonction de la culture.

La compétition des adventices par leur nombre est plus forte dans la parcelle de Kernza® que dans les bandes de froment entourant la parcelle (Figure 11). La moyenne du nombre de plantes par m² était de 34 dans la culture de Kernza® et de 18 dans les bandes de froment (Annexe 3). Dans les bandes de froment, la flore adventice était principalement constituée de jouet du vent (*Apera spica-venti* (L.) P.B.) ainsi que de petites dicotylédones dont le développement n'était pas très important. En effet, la lumière passant au travers du feuillage du froment est moins importante que celle traversant la canopée de la culture de Kernza®, ainsi les adventices présentes au niveau du sol ont pu capturer moins d'énergie lumineuse pour leur croissance.

Le plus faible nombre d'adventices dans les bandes de froment peut être expliqué par une date de semis plus tardive, celui-ci ayant été semé le 19 octobre soit 27 jours plus tard que Kernza®. Cela a été démontré par Colbach *et al.* (2006) où le modèle étudié est le vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides* Huds.). Placer le semis après le premier pic de germination des semences, et donc le retarder, permet de détruire ces adventices par le travail du sol lors du semis, le nombre d'adventices pouvant lever en culture est ainsi réduit.

La méthode utilisée ici (simple comptage) ne constitue pas une mesure totale de la pression des adventices étant donnée la variabilité au sein de la parcelle de leur nombre, de leur espèce et de leur stade de développement. Une plus forte compétition pour les ressources sera par exemple exercée par une plante en plein développement relativement à un stade juvénile (besoins nutritionnels plus importants). La pression est donc plus élevée dans la parcelle de

Kernza® au vu de l'important développement des espèces présentes. Au contraire, la pression est plus faible dans la parcelle de froment où la majorité des adventices restent cantonnées au niveau du sol sans avoir la possibilité de bien se développer.

- **Conclusion**

La gestion des adventices est primordiale étant donné la pérennité de la culture. Les besoins en degrés jours de la culture sont importants et le développement est lent. Décaler la date de semis en implantant la culture après le pic de germination des semences d'adventices semble donc compliqué. Le stade de développement de Kernza® doit être optimal avant l'hiver afin qu'elle soit suffisamment résistante au froid. Au Canada, White & Currie (sd) ont démontré que les plantes de *Th. intermedium* subsp. *barbulatum* devaient être au stade 3 – 4 feuilles pendant l'hiver pour ne subir trop de dommages (mort des tissus de la plante). Au Canada, la date de semis idéale se trouve entre fin août et début septembre. À noter que l'espèce est considérée comme très résistante au froid et celui-ci ne devrait pas poser de problèmes puisque les températures minimales de nos régions sont plus élevées que celles du Canada (Jaikumar *et al.*, 2016).

Les espèces présentes dans la parcelle pourraient être contrôlées avant l'implantation de la culture. Lorsque *Th. intermedium* est utilisée pour la production de semences le contrôle des adventices peut se faire par un herbicide à large spectre ainsi que par un labour avant le semis (Kruger, sd). Dans ce type de culture, les techniques utilisées sont radicales, les semences ne doivent pas être contaminées par des graines d'adventices. Lorsque la culture est implantée, leur élimination à un stade juvénile est conseillée. L'implantation qui en résulte devrait être plus homogène et rapide (Jouy, 1993). Le suivi de ces adventices doit être régulier la première année d'implantation, celle-ci représente une phase critique où l'établissement de la culture de Kernza® est lent et où sa compétition vis-à-vis des adventices n'est pas suffisante. Empêcher les adventices de se reproduire permettrait d'éviter leur persistance pendant plusieurs années. Une fois, la culture bien implantée, *Th. intermedium* devrait normalement former de grosses touffes et se propager grâce à ses rhizomes. Cela a été observé dans les études de Pugliese (2017) et Culman *et al.* (2013). La nuisibilité des adventices devrait donc être plus faible les années suivantes.

En outre, il serait intéressant de tester divers herbicides afin de connaître leur sélectivité vis-à-vis de *Th. intermedium* et gérer au mieux les espèces présentes. À l'avenir, le contrôle des graminées risque d'être un problème, ainsi, il serait pertinent de tester les herbicides anti-graminées utilisés en céréales d'hiver afin de connaître leur sélectivité vis-à-vis de la culture. Les passages de bineuse ont offert une bonne solution de rattrapage et les méthodes de désherbage mécanique, comme le passage de herse étrille à l'automne, devraient être approfondies.

5.1.4 Développement de la culture

- **Utilisation de l'échelle BBCH**

L'analyse statistique a révélé une inégalité des moyennes du stade de développement entre le froment et Kernza® p-valeur < 0,05. Les évolutions du développement (selon l'échelle BBCH)

de Kernza® et du froment en fonction de la somme des degrés jours est présentée sur la Figure 12.

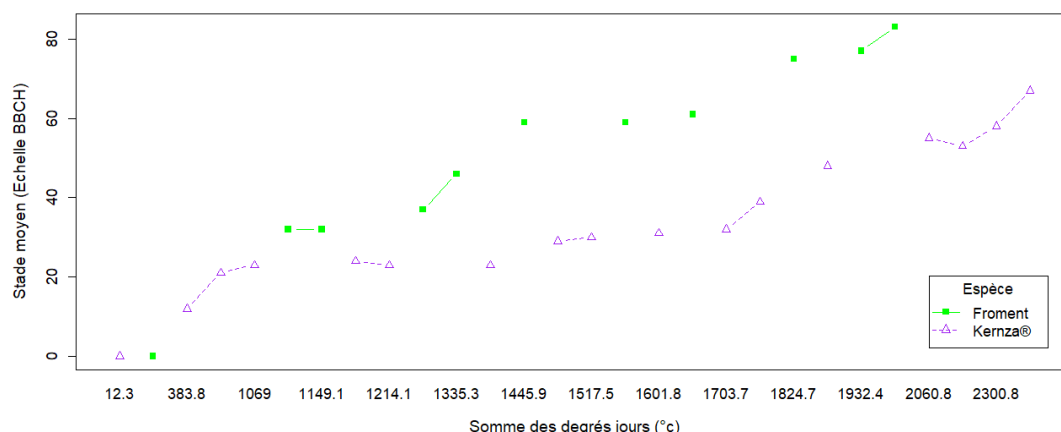


Figure 12 : Evolution des stades de développement (selon l'échelle BBCH) du froment et de Kernza® en fonction de la somme des degrés jours (°C).

On voit clairement sur la Figure 12, que les besoins en degrés jours de *Th. intermedium* sont plus importants que ceux du froment. Ainsi, le froment en ayant été implanté un mois plus tard que la graminée atteint sa maturité plus rapidement. Le développement de la graminée est relativement lent et elle a besoin de 3500 à 3600 degrés jours pour atteindre la maturation complète (Jungers *et al.*, 2018), un blé d'hiver n'aurait besoin que d'une accumulation de 2350°C (de Parcevaux & Huber, 2007). Dans notre étude, à 2030 degrés jours, le froment était presque à maturité (stade 83).

Kernza® a été semée à la fin du mois de septembre. Après le développement des feuilles, le stade tallage (stade 20) a pu débuter à la mi novembre lorsque 688 degrés jours ont été atteints. *Th. intermedium* est restée à ce stade de développement jusqu'à la fin du mois d'avril. L'élongation (stade 30) a été observée à 1518 degrés jours pendant environ un mois. Celle-ci a cédé la place à la montaison (stade 40) à la fin du mois de mai lorsque 1932 degrés jours ont été atteints. Le mois de juin a été caractérisé par la sortie de l'inflorescence (stade 50), initiée entre 1932 et 2061 degrés jours ainsi que la floraison (stade 60) à un peu moins de 2404 degrés jours. Enfin, le mois de juillet a été consacré au développement des grains et leur maturation (Figure 13). Les différents stades en fonction de la date et des degrés jours sont décrits dans l'Annexe 5.

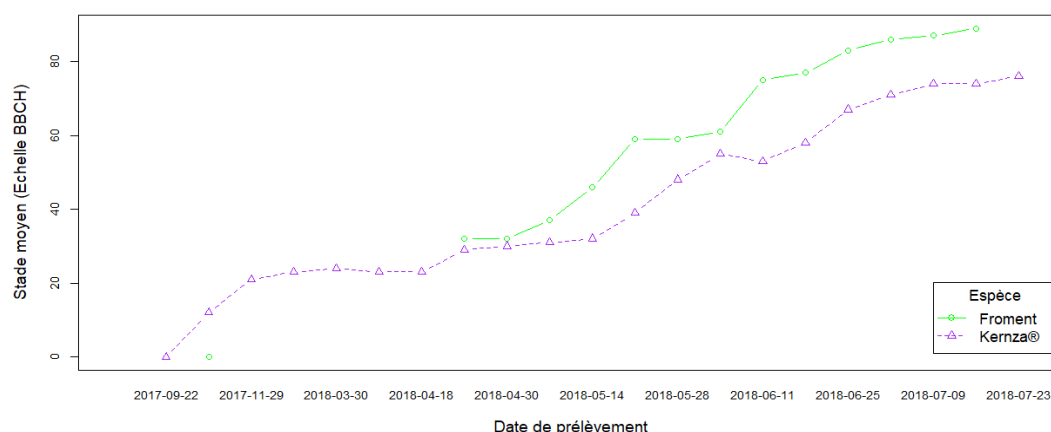


Figure 13 : Evolution des stades de développement (selon l'échelle BBCH) du froment et de Kernza® en fonction de la date.

Au vu de ses besoins en degrés jours, il est nécessaire de planter *Th. intermedium* le plus tôt possible. A la fin de l'été, dès que les conditions agronomiques et météorologiques le permettent (précédent cultural récolté et humidité optimale). Cette année, la graminée a pu être récoltée le 7 août. Cependant, depuis le mois d'avril, l'année a été caractérisée par des températures moyennes plus élevées que les normales saisonnières. Ainsi, un semis précoce se révèle nécessaire lors des années plus froides afin de récolter les grains en été, lorsque les conditions sont encore bonnes pour la moisson (faible humidité). De plus, selon Culman *et al.* (2013), semer tôt est un moyen de maximiser les rendements en grains.

- **Utilisation de la table de Moore et al. (1991)**

L'analyse statistique du stade de développement moyen de Kernza® a indiqué une inégalité des moyennes en fonction de la date de prélèvement (p-valeur<0,001) ainsi qu'en fonction de la fertilisation azotée (p-valeur<0,05) et une légère interaction entre ces deux facteurs (p-valeur = 0,05). Les différents tests de Kruskal-Wallis ont révélé une égalité des moyennes en fonction de la fertilisation pour l'ensemble des dates de prélèvement p-valeur>0,05. L'évolution du développement de Kernza® selon la Table de Moore en fonction de la fertilisation azotée et des degrés jours est représentée sur la Figure 14.

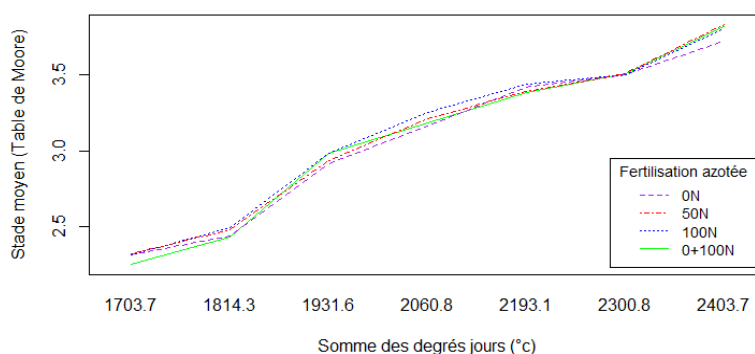


Figure 14: Evolution des stades de développement (selon la Table de Moore) de Kernza® en fonction de la somme des degrés jours (°C) et de la fertilisation azotée.

Sur la Figure 14, la plante atteint les différents stades physiologiques dès que ses besoins en degrés jours sont remplis. En outre, les stades de développement sont similaires entre les différentes nutrition azotées. Sur la période de prélèvement, de l'élongation des tiges jusqu'au début de la formation du grain, le développement de Kernza® n'a pas été impacté par la nutrition azotée de la culture.

L'ensemble des stades suivis sur la saison sont décrits sur l'Annexe 7. Le Tableau 9 nous indique qu'il a fallu 1932 degrés jours pour atteindre le stade gonflement et un peu moins de 2400 degrés jours pour la floraison. Cela a également été observé lors de l'utilisation de l'échelle BBCH. Dans l'étude de Jungers *et al.* (2018) au Minnesota, il a fallu entre 1600 et 1730 degrés jours et 2170 et 2500 degrés jours pour atteindre le stade gonflement et la floraison respectivement.

Tableau 9 : Données issues de l'utilisation de la Table de Moore pour la quantification des stades de développement de Kernza®.

Date de prélèvement	Degrés jours	MSC	Description du stade	S _{MSC}
14-05-18	1703,7	2,3	Entre 1 et 2 nœuds visibles	0,148
22-05-18	1814,3	2,5	Entre 2 et 3 nœuds visibles	0,144
28-05-18	1931,6	3,0	Gonflement	0,218
04-06-18	2060,8	3,2	Entre la sortie du premier épillet et l'ensemble de l'épi	0,166
11-06-18	2193,1	3,4	Entre la sortie de l'épi et du pédoncule	0,173
18-06-18	2300,8	3,5	Sortie du pédoncule	0,055
25-06-18	2403,7	3,8	Entre la floraison et la fécondation	0,156
02-07-18	/	4,0	Caryopse visible	0,055

Le S_{MSC} traduit la disparité de maturité des plantes au sein de la même parcelle. Moore *et al.* (1991) la considère comme importante dans l'espèce *Th. intermedium*. Ils ont d'ailleurs obtenu un S_{MSC} assez élevé de 0,371 pour une première fauche où le stade moyen de développement (2,4) correspondait à l'élongation où 2 nœuds étaient présents. Les S_{MSC} obtenus dans notre étude sont moins importants, de l'ordre de la moitié (Tableau 9). La sélection réalisée par le « Land Institute » pour l'amélioration des traits de Kernza® a donc été bénéfique pour le développement synchronisé des différentes plantes au sein de la parcelle.

- **Photos du développement :**

○ **Stade végétatif**

Ces photos ont été prises le 11 avril 2018 sur des plantes fraîches (Figure 15). Selon la Table de Moore, ces plantes sont au stade végétatif correspondant au développement des feuilles. Les différentes plantes possédant un nombre de feuilles variables. Selon l'échelle BBCH, les plantules sont au stade tallage, avec de nouveau une diversité dans le nombre de talles présentes entre les différentes plantes prélevées.



Figure 15 : Photos de Kernza® au stade végétatif (11-04-18).

○ **Stade élongation**

Ces photos ont également été prises sur des plantes fraîches, le 7 mai 2018 (Figure 16). Selon la Table de Moore, ce stade correspond à l'élongation des tiges, les entre-nœuds s'allongent. Le nombre de nœuds est compté sur les tiges et aucune différence n'est faite entre le maître brin et les autres talles contrairement à l'échelle BBCH.

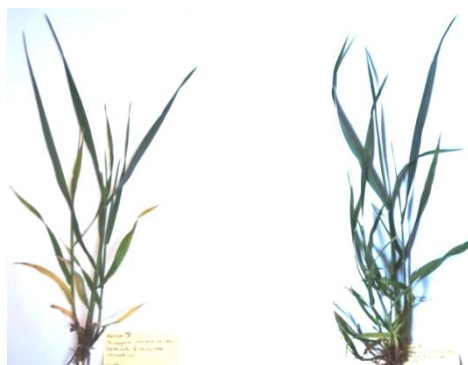


Figure 16 : Photos de Kernza® au stade élongation (07-05-18).

○ Stade reproducteur, épiaison

Ces photos ont été prises le 28 mai 2018, cette fois sur des plantes séchées. Pendant ce stade, le pourcentage de sortie de l'épi est estimé aussi bien avec la Table de Moore qu'avec l'échelle BBCH (Figure 17).



Figure 17 : Photos de Kernza® au stade épiaison (28-05-18).

○ Stade développement et maturation des grains

Ces photos ont été prises le 8 août 2018 sur des plantes fraîches. Lors de ce stade, le développement du grain ainsi que sa maturité sont suivis avec la Table de Moore. Ces deux événements sont séparés en deux stades avec l'échelle BBCH (Figure 18).



Figure 18 : Photos de Kernza® au stade développement et maturation des grains (6-08-18).

5.2 Caractéristiques morphologiques et de développement

5.2.1 Suivi du nombre de talles

L'évolution du nombre de talles en fonction de la fertilisation azotée et de la date de prélèvement est visible sur la Figure 19. L'analyse statistique nous indique des différences de moyennes du nombre de talles par m² en fonction de ces deux facteurs. La différence est

hautement significative pour le facteur fertilisation azotée (p -valeur $<0,01$) et très hautement significative pour le facteur date de prélèvement (p -valeur $<0,001$).

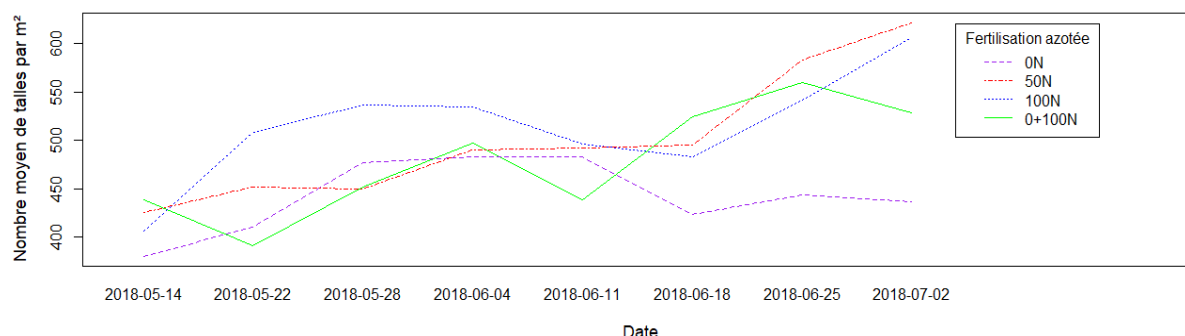


Figure 19 : Nombre moyen de talles par m² de Kernza® en fonction de la fertilisation azotée et de la date de prélèvement.

En regardant l'évolution globale du nombre de talles par m² au cours du temps, celui-ci augmente. En effet, lorsque les fertilisations sont confondues, le 14 mai, 417 talles/m² étaient présentes et ce nombre atteint 564 talles/m² le 02 juillet. Cependant, cette augmentation n'a pas été régulière entre les semaines de prélèvement. Le nombre de talles a augmenté jusqu'au 4 juin, une légère baisse est apparue le 11 juin et ensuite, une nouvelle augmentation s'est poursuivie jusqu'au 02 juillet (Tableau 10).

Tableau 10 : Résultats du test SNK du nombre de talles par m² en fonction de la date de prélèvement.

Date	Nombre moyen de talles/m²	Groupes
14-05-18	417	a
22-05-18	446	ab
28-05-18	479	abc
04-06-18	504	bcd
11-06-18	478	abc
18-06-18	490	bc
25-06-18	545	cd
02-07-18	564	d

En regardant l'évolution au cours du temps du nombre de talles par m² pour chaque fertilisation azotée, les tendances ne sont pas les mêmes (Tableau 11). Pour le témoin à 0 unité d'azote, le nombre de talles stagne et ne diffère pas sur toute la période de prélèvement. Concernant les fertilisations à 50 et 100 unités appliquées au stade tallage (23 mars), le nombre de talles augmente puis stagne de fin mai à fin juin pour ensuite augmenter de nouveau. La tendance pour la modalité 0+100 unités d'azote est une élévation globale du nombre de talles, même si deux diminutions sont observées : l'une le 22 mai et l'autre sur la période du 4 juin au 11 juin, bien que cette dernière ne soit pas statistiquement prouvée.

Tableau 11 : Résultats des tests SNK du nombre de talles par m² en fonction de la date de prélèvement pour chaque modalité de fertilisation azotée.

Date	0N		50N		100N		0+100N	
	Nombre moyen de talles/m ²	Groupes	Nombre moyen de talles/m ²	Groupes	Nombre moyen de talles/m ²	Groupes	Nombre moyen de talles/m ²	Groupes
14-05-18	380	a	425	a	407	a	438	ab
22-05-18	410	a	452	ab	508	ab	391	a
28-05-18	477	a	450	ab	537	ab	452	ab
04-06-18	484	a	490	ab	535	ab	497	ab
11-06-18	483	a	492	ab	497	ab	438	ab
18-06-18	423	a	495	ab	483	ab	525	b
25-06-18	444	a	583	bc	541	ab	560	b
02-07-18	434	a	622	c	607	b	528	b

Deux hypothèses pourraient expliquer la baisse générale (fertilisations confondues) du nombre de talles/m² le 11 juin (Tableau 10).

Premièrement, lorsque l'on s'intéresse aux écart-types pour les diverses fertilisations azotées et dates de prélèvement ceux-ci sont assez importants (Annexe 8). Ils traduisent des nombres variables de talles par m² entre les parcelles prélevées à la même date et recevant la même fertilisation. En effet, chaque semaine, seulement 15 cm étaient échantillonnés dans les parcelles de 14m², il est très probable que le prélèvement ne prenne pas suffisamment en compte la variabilité du nombre de talles présent dans la parcelle. La présence d'adventices ou encore la densité de plantes de *Th. intermedium* à un endroit donné peuvent impacter le nombre de talles. Cette variabilité pourrait expliquer les fluctuations du nombre de talles/m² entre les dates de prélèvement visibles sur le Figure 19 et le Tableau 11 qui sont les plus marquées pour la modalité 0+100N.

Deuxièmement, le mois de juin a été consacré au stade reproducteur avec la sortie des épis dès le 4 juin. Une autre hypothèse pour expliquer la légère baisse du nombre de talles au début du mois de juin serait un transfert des ressources de la plante vers les épis. A ce stade, le développement de la végétation pourrait être délaissé engendrant la disparition des petites talles. En effet, selon Gate (1995), les besoins les plus forts en azote, pour un blé annuel, s'étalent du stade épi à 1cm à la floraison et lorsqu'il y a une compétition pour l'azote au sein de la plante, les talles de moins de 3 feuilles peuvent dégénérer au vu de leur faible autonomie. Cependant, pour chacune des fertilisations sur le Tableau 11, d'un point de vue statistique, il n'y a pas de diminution du nombre de talles au début du mois de juin. La première hypothèse serait donc la plus plausible.

Le Tableau 12 reprend le nombre moyen de talles sur la saison en fonction de la fertilisation. Celui-ci est plus élevé avec des fertilisations de 50 et 100 unités d'azote appliquées au stade tallage. Le plus faible nombre de talles est observé à 0 unité d'azote, tandis que la modalité à 100 unités d'azote appliquées au stade floraison (0+100N) est intermédiaire, cette modalité n'est pas significativement différente des deux extrêmes.

Tableau 12 : Résultats du test SNK du nombre de talles par m² en fonction de la fertilisation azotée.

Fertilisation	Nombre moyen de talles/m ²	Groupes
0N	442	a
50N	501	b
100N	514	b
0+100N	480	ab

La fertilisation de la modalité 0+100N a eu lieu le 15 juin et pourrait expliquer l'augmentation importante du nombre de talles du 11 au 25 juin après la légère baisse observée du 4 au 11 juin (Tableau 11). La fertilisation 0+100N tend à rattraper son retard par rapport aux fertilisations 50 et 100N appliqué au tallage grâce à une augmentation de son nombre de talles à la fin du mois de juin. La fertilisation du 15 juin a donc eu un impact positif sur la production des talles de la modalité 0+100N puisque relativement au témoin sans fertilisation son nombre de talles est meilleur.

Une fertilisation au stade tallage avec 50 ou 100 unités d'azote semble être la meilleure pratique. Le nombre de talles est plus élevé que le témoin sans fertilisation, ce qui devrait améliorer la production de biomasse aérienne. De plus, ce nombre de talles semble être plus stable que la fertilisation 0+100N.

5.2.2 Suivi du nombre d'épis

L'évolution du nombre d'épis en fonction de la fertilisation azotée et de la date de prélèvement est représentée sur la Figure 20. L'analyse statistique nous indique que le facteur date de prélèvement n'a pas d'effet sur le nombre d'épis par m² (p-valeur>0,05). Des différences sont par contre visibles au niveau de la fertilisation azotée (p-valeur <0,001).

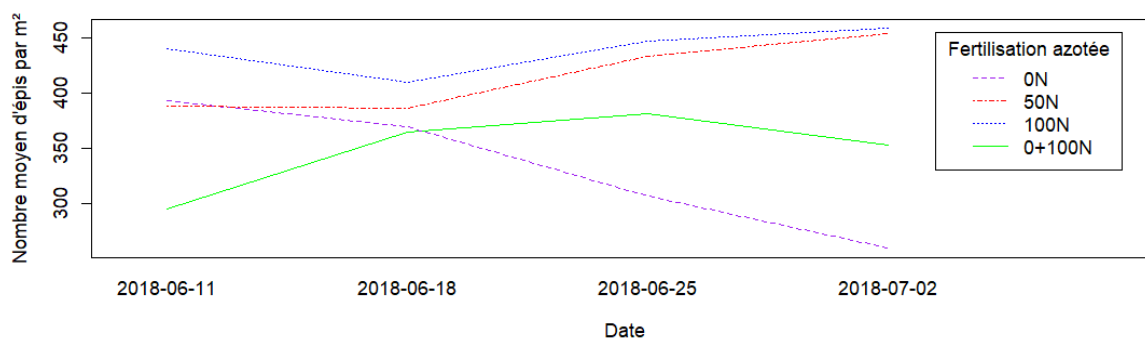


Figure 20: Nombre moyen d'épis par m² de Kernza® en fonction de la fertilisation azotée et de la date de prélèvement.

Les écart-types (Annexe 9) nous indiquent que la variabilité du nombre d'épis par m² entre les différentes parcelles de prélèvement (même fertilisation azotée et date de prélèvement) est importante, comme cela avait été observé pour le nombre de talles par m². Prélever un plus grand nombre de plantes par parcelle pourrait aider à mieux prendre en compte cette variabilité et à mieux estimer le nombre d'épis par m².

Concernant la fertilisation, les 50 et 100 unités d'azote (appliquées au stade tallage) fournissent le plus grand nombre d'épis par m², 416 et 439 respectivement. Les fertilisations à

0 et 100 unités d'azote, appliquées au stade floraison (0+100N), procurent le plus petit nombre d'épis par m², de 333 et 349 respectivement (Tableau 13).

Tableau 13 : Résultats du test SNK du nombre d'épis par m² en fonction de la fertilisation azotée.

Fertilisation	Nombre moyen d'épis/m ²	Groupes
0N	333	a
50N	416	b
100N	439	b
0+100N	349	a

Les fertilisations 50 et 100 unités d'azote devraient donc procurer les plus gros rendements en grains étant donné le plus grand nombre d'épis présents par m². Les 100 unités d'azote appliquée à la floraison (0+100N) n'ont pas permis d'obtenir un nombre d'épis plus élevé que le témoin. Celle-ci est arrivée trop tardivement et le nombre d'épis était déjà établi.

5.2.3 Hauteur des plantes

La hauteur des plantes a été étudiée en fonction de la fertilisation azotée et de la date de prélèvement (Figure 21), l'analyse statistique révèle une inégalité des moyennes en fonction de ces deux facteurs (p-valeur < 0,001).

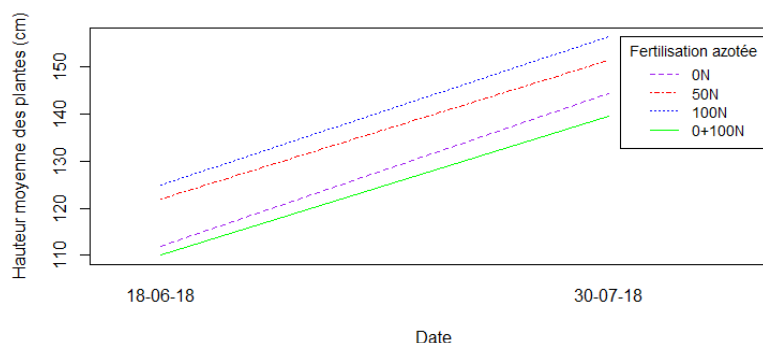


Figure 21 : Hauteur moyenne des plantes (cm) de Kernza® en fonction de la fertilisation azotée le 18 juin et le 30 juillet.

Pour les deux dates d'échantillonnage, la hauteur des plantes est plus importante pour les fumures à 50 et 100 unités d'azote (appliquées au stade tallage). Celles-ci ne sont pas significativement différentes entre elles. Ensuite, la moyenne des hauteurs est plus faible pour les fertilisations 0 et 0+100 unités d'azote (appliquées à la floraison) et elles ne sont pas non plus différentes entre elles (Tableau 14).

Tableau 14 : Résultats du Test SNK de la hauteur des plantes (cm) en fonction de la fertilisation azotée pour les deux dates de prélèvement (18-06-18 et 30-07-18).

18-06-18			30-07-18		
Fertilisation	Hauteur moyenne des plantes (cm)	Groupe	Fertilisation	Hauteur moyenne des plantes (cm)	Groupe
0N	112	a	0N	144	a
50N	122	b	50N	151	b
100N	125	b	100N	156	b
0+100N	110	a	0+100N	140	a

La fertilisation de 100 unités d'azote au stade floraison (0+100N) a été appliquée le 15 juin, son effet n'a pas encore pu être exprimé lors de la mesure de la hauteur des plantes le 18 juin. Cependant, lors de l'échantillonnage du 30 juillet, cette modalité n'était toujours pas meilleure, point de vue hauteur des plantes, que le témoin à 0 unité d'azote. La hauteur moyenne pour les fertilisations 50N et 100N (appliquées au stade tallage) était de 139cm contre 127cm pour les fertilisations à 0N et 0+100N, dates de prélèvements confondues (Annexe 12). Les plantes fertilisées par 50 et 100N au tallage sont plus grandes, de plus de 10cm, que les plantes non fertilisées ou fertilisées avec 100 unités au stade floraison.

La moyenne de la hauteur (toutes fertilisations confondues) le 18 juin était de 118 cm et le 30 juillet de 148 cm (Annexe 11). Celle-ci a donc augmentée entre les deux dates de prélèvements. Dans l'étude de Jungers *et al.* (2018), l'évolution de la hauteur atteint un plateau à environ 2500 degrés jours où la hauteur maximale était aux alentours de 160 cm. Le 18 juin, la somme des degrés jours était aux alentours des 2300°C, la hauteur quantifiée ne pouvait donc pas être maximale. Le 30 juillet, la moyenne de la hauteur des plantes (toutes fertilisations confondues) de 148cm est semblable aux résultats obtenus par Jungers *et al.* (2018) au Minnesota où 40 unités d'azote ont été appliquées avant le stade redressement et où la hauteur variait entre 130 et 160 cm.

La hauteur des plantes est élevée relativement à un blé annuel. Le froment bordant la parcelle de Kernza® mesurait entre 75 et 85 cm (mesure faite à titre indicatif). En outre, les variations de hauteurs au sein de la population de *Th. intermedium* est importante comme cela est visible sur l'Annexe 10. La plus grande différence de taille pour une même fertilisation est apparue le 18 juin pour la fertilisation 50N où la différence entre la hauteur de la plus petite et la plus grande plante était de 102cm. Le 30 juillet, la plus grosse variation entre les deux extrêmes était de 78 cm pour la fertilisation 100N appliquée au tallage.

Lors de la saison culturale, aucune verse n'a été observée bien que la hauteur soit assez élevée, certaines plantes peuvent atteindre 2 m de haut (valeur extrême) (Annexe 10). Cependant, avoir une hauteur de plante élevée n'est pas réellement intéressant pour la culture. En effet, l'augmentation de la hauteur se traduit par l'élongation de la tige. Or, le contenu en NDF dans la tige est plus important que celui des feuilles et cela réduit la qualité du fourrage (Jungers *et al.*, 2018). En outre, comme Frahm *et al.* (2018) sous-entendent, réduire la taille de la plante pourrait permettre une plus grande allocation des produits photosynthétiques vers les grains en réduisant la proportion des photoassimilats allouée à la production végétative. Utiliser un régulateur de croissance est une piste à explorer. Celui-ci n'a d'ailleurs pas impacté les rendements fourragers et a amélioré l'uniformité de la hauteur au sein de la population de *Th. intermedium* dans l'étude de Frahm *et al.* (2018).

5.2.4 Longueur des épis

L'évolution de la longueur des épis en fonction de la fertilisation azotée et de la date de prélèvement est représentée sur la Figure 22. L'analyse statistique révèle une inégalité des moyennes de la longueur des épis en fonction de la fertilisation azotée et de la date de prélèvements (p-valeur <0,001).

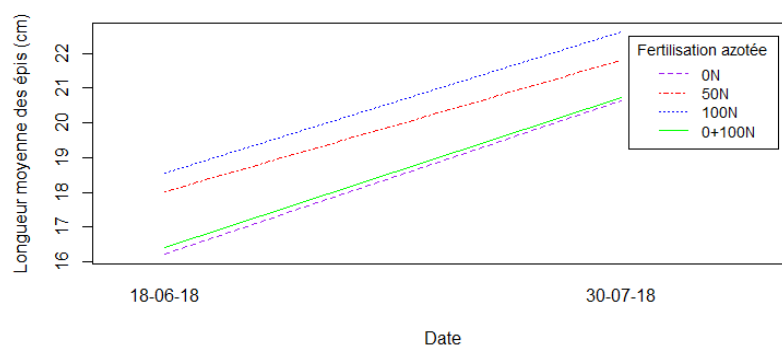


Figure 22: Longueur moyenne des épis (cm) de Kernza® en fonction de la fertilisation azotée le 18 juin et le 30 juillet.

La longueur des épis a augmenté entre la première et la deuxième date de prélèvement, comme cela est montré par l'Annexe 14 passant de 17 à 22cm. Cette augmentation de longueur est certainement la conséquence de l'élongation des entre-nœuds présents sur le rachis qui peuvent atteindre plus d'un centimètre de long (Barkworth *et al.*, 2007).

Concernant la fertilisation, le test SNK (Tableau 15) nous indique que les épis les plus grands sont obtenus avec une fertilisation de 100N au stade tallage. Les fertilisations 0N et 0+100N (appliquée au stade floraison) donne les plus faibles longueurs d'épis et ne sont pas significativement différentes entre elles. La fertilisation à 50N au tallage est intermédiaire, celle-ci n'est pas significativement différente des autres fertilisations.

Tableau 15 : Résultats du Test SNK de la longueur des épis (cm) en fonction de la fertilisation azotée pour les deux dates de prélèvement (18-06-18 et 30-07-18).

18-06-18			30-07-18		
Fertilisation	Longueur moyenne des épis (cm)	Groupe	Fertilisation	Longueur moyenne des épis (cm)	Groupe
0N	16	a	0N	21	a
50N	18	ab	50N	22	ab
100N	19	b	100N	23	b
0+100N	16	a	0+100N	21	a

Comme lors des mesures des hauteurs de plantes, on voit également une variabilité de longueur des épis au sein de la population de *Th. intermedium*. Par exemple, le 18 juin, les plus petits épis mesuraient 6cm et les plus grand 30cm. Le 30 juillet, le plus petit épi sous une fertilisation à 100 unités à la floraison mesurait 10 cm et le plus grand 35cm (Annexe 13).

Une fertilisation à 100 unités d'azote au tallage procure la plus grande taille des épis, avec une longueur moyenne de 23 cm au 30 juillet, soit 2 cm en plus que le témoin sans fertilisation. Cette dernière fertilisation peut offrir le meilleur potentiel de rendement seulement si les nombres d'épillets et de grains présents dans l'épi sont plus élevés que les autres modalités de fertilisation. Si la plus grande taille des épis est seulement le résultat d'entre-nœuds plus longs, le rendement en grains ne sera pas impacté.

5.3 Caractérisation de la biomasse aérienne

5.3.1 Quantification de la biomasse aérienne

5.3.1.1 Biomasse aérienne totale

L'évolution de la biomasse aérienne totale en fonction des trois stades de développement étudiés et de la fertilisation est représentée sur la Figure 23. L'analyse statistique révèle des différences de biomasse aérienne totale en fonction des fertilisations azotées et des stades de développement (p -valeur $< 0,001$).

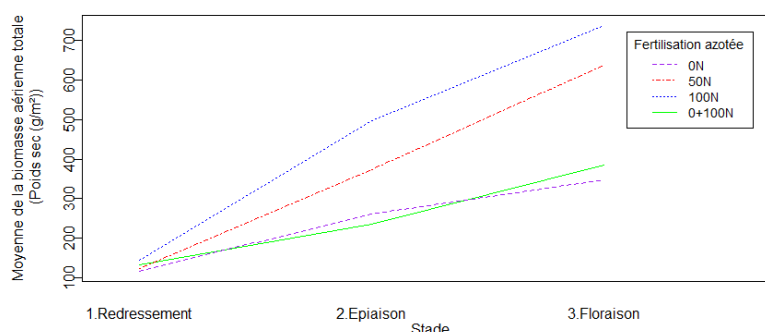


Figure 23: Moyenne de la biomasse aérienne totale (poids sec (g/m^2)) en fonction de la fertilisations azotée et du stade de développement.

On peut observer que la quantité de biomasse aérienne augmente au cours du temps où elle est la plus élevée au stade floraison. Les biomasses aériennes produites sous les quatre fertilisations ne sont pas significativement différentes au stade redressement, p -valeur $> 0,05$. Les différences apparaissent seulement lors des prélèvements au stade épiaison et floraison, p -valeur $< 0,001$ (Tableau 16).

Tableau 16 : Résultats des tests SNK de la biomasse aérienne totale (poids sec (g/m^2)) en fonction de la fertilisation azotée pour les trois stades de prélèvements.

Fertilisation	Moyenne de la biomasse aérienne totale (poids sec (g/m^2))	Groupe
Stade redressement		
0N	115,6	a
50N	121,4	a
100N	142,7	a
0+100N	130,7	a
Stade épiaison		
0N	259,9	a
50N	374	b
100N	497,6	c
0+100N	234	a
Stade floraison		
0N	348	a
50N	637	b
100N	738,8	c
0+100N	385	a

Au stade épiaison et floraison, la biomasse est significativement supérieure lorsque 100 unités d'azote sont appliquées (au stade tallage). La deuxième meilleure performance est réalisée par 50 unités d'azote (appliquées au stade tallage). Les modalités 0 unité et 0+100 unités d'azote ne sont pas significativement différentes entre elles et produisent la plus petite biomasse aérienne (Tableau 16). La fertilisation à 0+100N appliquée à la floraison n'aurait pas pu avoir d'effet sur la biomasse aérienne à ces différents stades. Elle est survenue après les prélèvements ou au même moment pour le prélèvement au stade floraison.

En termes de quantité, la fertilisation de 100 unités au stade tallage procure le meilleur rendement fourrager de la culture avec une production moyenne de 740g/m² soit 7,4 T de MS/ha au stade floraison. Fertiliser 100 unités au stade tallage permet donc de produire le double de biomasse aérienne (au stade floraison) obtenue sans fertilisation. Au stade floraison, la modalité 50N procure une tonne de fourrages en moins relativement à la fertilisation de 100 unités également appliquée au stade tallage. La biomasse aérienne sous une fertilisation à 50 unités représente tout de même plus de 1,8 fois la biomasse aérienne produite sans fertilisation (Tableau 16).

A titre de comparaison, la biomasse aérienne totale produite par le froment (fertilisation de 100 unités) est en moyenne de 1,1kg/m² soit 11T de MS/ha (Tableau 17). La production de biomasse aérienne semble donc plus importante dans les bordures de froment au stade floraison que Kernza® fertilisée à 100 unités au tallage. Cependant, les interlignes de Kernza® sont deux fois plus grands que ceux du froment. Pour avoir une comparaison correcte de la production des deux espèces au même stade, l'espacement entre les lignes de semis devrait être identique. En outre, Kernza® devrait offrir une production de biomasse supplémentaire en automne avec une repousse après la récolte, contrairement au froment.

Tableau 17 : Biomasse aérienne totale (poids sec (g/m²)) du froment au stade floraison.

Froment : stade floraison	
Répétitions	Biomasse aérienne totale (poids sec (g/m²))
R1	1020
R2	908
R3	1323
R4	1219

5.3.1.2 Biomasse des épis

Comme pour la biomasse aérienne totale, la biomasse des épis diffère en fonction des fertilisations et des deux dates de prélèvement (stade épiaison et floraison), p-valeur<0,001. L'évolution de la biomasse des épis en fonction de ces deux facteurs est représentée sur la Figure 24.

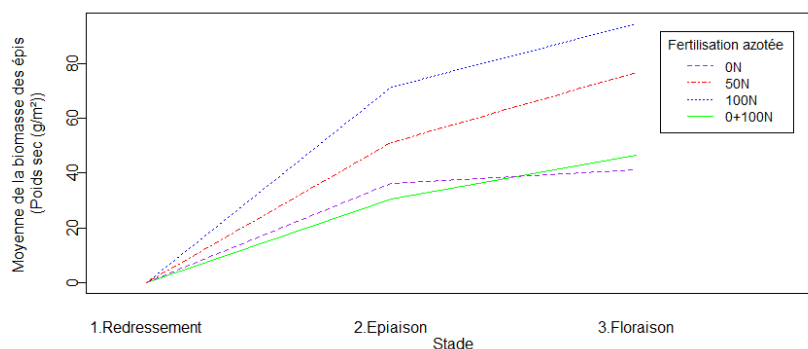


Figure 24: Moyenne de la biomasse des épis (poids sec(g)/ m²) en fonction de la fertilisation azotée et du stade de développement.

La moyenne de la biomasse des épis pour le stade floraison est plus importante qu'au stade épiaison, p-valeur < 0,001. Celle-ci est également plus élevée lorsque 100 unités d'azote sont appliquées (au stade tallage), ensuite vient la fertilisation à 50N (au tallage) et les moins bonnes performances sont obtenues à 0N et 0+100N. Ces deux dernières fumures ne sont pas différentes entre elles (Tableau 18).

Tableau 18 : Résultats des tests SNK de la biomasse des épis (poids sec (g/m²)) en fonction de la fertilisation azotée pour le stade épiaison et floraison.

Fertilisation	Biomasse moyenne des épis (poids sec (g/m ²))	Groupes
Stade épiaison		
0N	36	a
50N	51	b
100N	71,5	c
0+100N	30,5	a
Stade floraison		
0N	41	a
50N	76,7	b
100N	94,6	c
0+100N	46,4	a

Au stade floraison, lorsque 100 unités d'azote sont appliquées lors du stade tallage, la culture est capable de produire 95g d'épis par m² soit 0,95T de MS/ha (Tableau 18). Cependant, à ce stade, le grain n'est pas encore formé donc ce chiffre représente le poids des enveloppes des grains (glumes et glumelles) et le rachis.

La biomasse des épis du froment a également été quantifiée au stade floraison (Tableau 19).

Tableau 19 : Biomasse des épis (poids sec (g/m²) du froment au stade floraison.

Froment : stade floraison	
Répétitions	Biomasse des épis (poids sec (g/m ²))
R1	306
R2	273
R3	373
R4	347

La biomasse des épis du froment est bien plus importante au stade floraison que celle de Kernza® avec une moyenne de 325g/m² soit 3,2T de MS/ha en poids sec (Tableau 19). Cela correspond à plus du triple de la biomasse des épis produite par Kernza® au même stade et fertilisée à 100 unités d'azote au tallage. La différence d'écartement des lignes de semis n'explique pas cette telle variation de biomasse et le rendement en grains du froment devrait être largement supérieur à celui de la graminée pérenne comme cela a été observé dans différentes études (Culman *et al.*, 2013; Larkin *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2015).

5.3.1.3 Biomasse des épis relativement à la biomasse aérienne totale

Le ratio de la biomasse des épis de Kernza® sur la biomasse aérienne totale a été calculé pour les deux stades épiaison et floraison et est représenté sur la Figure 25 en fonction des fertilisations azotées. L'analyse statistique nous révèle des différences entre les dates de prélèvement (p-valeur<0,001) tandis que la fertilisation azotée n'aurait pas beaucoup d'impact (p-valeur = 0, 046).

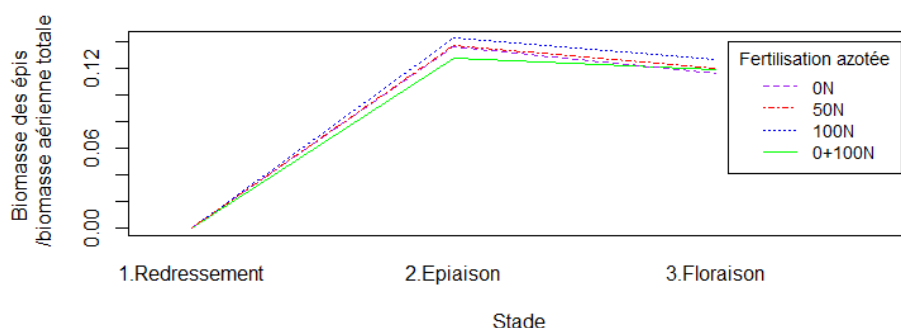


Figure 25: Biomasse des épis sur la biomasse aérienne totale en fonction de la fertilisation azotée et du stade de prélèvement.

En observant l'effet de la fumure pour les deux stades (épiaison et floraison) séparément, les moyennes ne sont pas différentes entre les fertilisations p-valeur > 0,05. Ces moyennes sont effectivement similaires où le ratio varie entre 0,13 et 0,14 à l'épiaison et 0,12 et 0,13 à la floraison (Annexe 15 et Annexe 16). Sur la Figure 25 on peut observer que ce ratio diminue du stade épiaison au stade floraison. La moyenne au stade épiaison était de 0,14 et est passée à 0,12 au stade floraison (Annexe 17). Cela peut être expliqué par la croissance de la plante après le stade épiaison où les tiges portant l'épi ont continué à s'allonger de façon plus importante que l'élongation du rachis des épis.

Ce ratio a été comparé avec celui du froment au moment de la floraison et est représenté sur la Figure 26 en fonction des deux espèces. L'analyse statistique révèle une différence entre les moyennes du froment et de Kernza® (p-valeur<0,001).

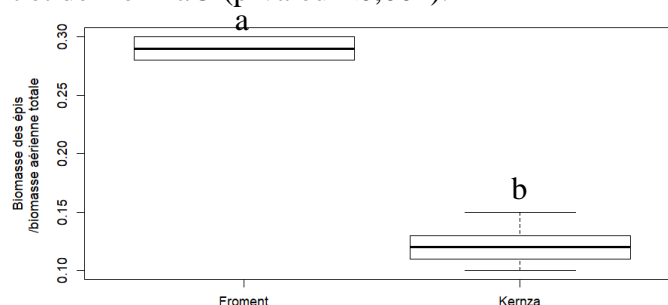


Figure 26: Biomasse des épis sur la biomasse aérienne totale pour le froment et Kernza® au stade floraison.

Le pourcentage d'épis du froment par rapport à l'ensemble de la biomasse aérienne est plus important que le pourcentage de Kernza® au moment de la floraison. La moyenne du froment se situe à 29% (Annexe 18) tandis que Kernza® est à 12% (Annexe 17) à ce stade. *Th. intermedium* alloue proportionnellement moins de ressources vers les épis que le froment. L'indice de récolte de Kernza® est connu comme relativement faible et a été observé dans diverses études comme au Michigan par Culman *et al.* (2013) ou en Australie par Newell & Hayes (2017).

5.3.2 Analyse de la valeur alimentaire de la biomasse aérienne

Les résultats obtenus suite à l'analyse par spectrométrie proche infrarouge ainsi que les autres paramètres calculés se trouvent dans l'Annexe 19. Ces relevés permettent d'avoir une vue globale de la valeur alimentaire de Kernza® au printemps de la première année.

Une perte de valeur nutritive est visible lors de la croissance et du développement de la plante. En effet, il y a diminution du nombre de VEM ainsi que de grammes de DVE et d'OEB (Figure 27), représentant respectivement la valeur énergétique pour un aliment destiné à du bétail laitier, les protéines digestibles dans l'intestin et enfin le bilan des protéines dégradables au niveau du rumen exprimant l'équilibre entre la protéine et l'énergie d'un aliment pour l'alimentation des micro-organismes du rumen (Decruyenaere *et al.*, sd). La proportion en minéraux, les cendres totales (CT), subit également une baisse (Figure 28 (A)).

Avec l'âge de la plante, la proportion de ses constituants de parois cellulaires augmentent (cellulose, hémicellulose et lignine) (Figure 28 (B) (C) (D)) représentés par les paramètres suivants : CEL (proportion de cellulose), ADL (proportion de lignine), ADF (proportion de lignine et de cellulose) et NDF (proportion d'hémicellulose, de cellulose et de lignine). Concernant la teneur en matière sèche (MS), celle-ci croît avec l'avancement dans les stades développement de la plante (Annexe 19) tandis que la digestibilité de la matière organique (DMO) ainsi que la digestibilité de la matière sèche (DMS) régressent (Figure 28 (E), (F)).

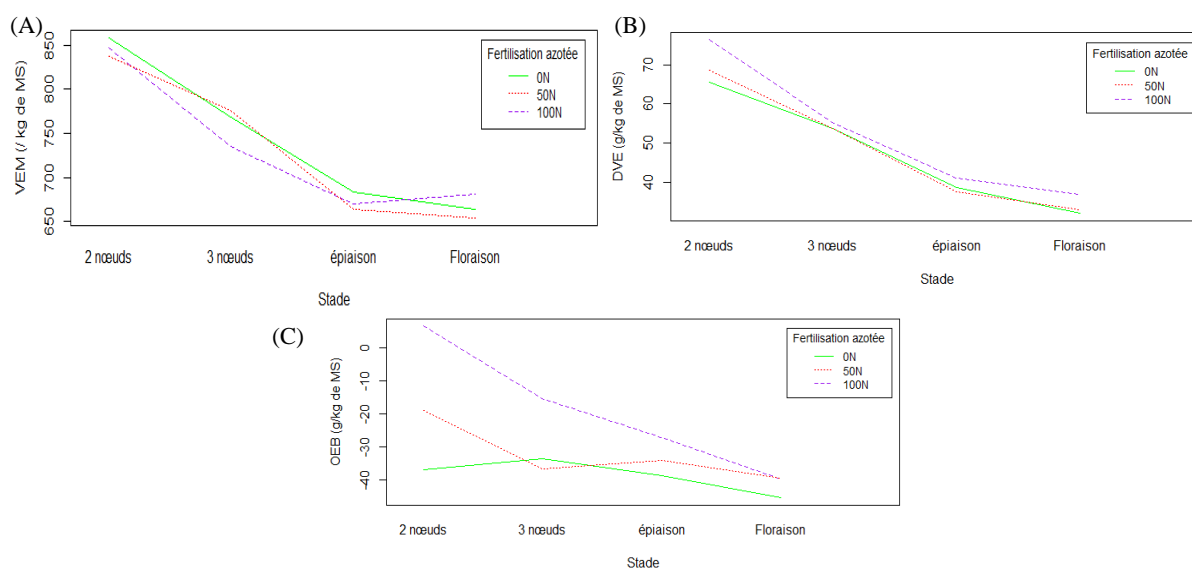


Figure 27 : VEM (A), DVE (B), OEB (C), en fonction du stade de développement de Kernza® et de la fertilisation azotée.

Ainsi, au stade 2 nœuds, le nombre moyen de VEM est de 850 et n'est plus que de 670 au stade épiaison et floraison (Figure 27 (A)). Ce nombre de VEM est inférieur aux graminées communément utilisées en prairie. Le nombre de VEM au stade épiaison du Dactyle (*Dactylis glomerata* (Van Holder B.)), du Ray-grass anglais (*Lolium perenne* (Van Holder B.)) ou encore de la Fléole des prés (*Phleum pratense* (Van Holder B.)) sont de 870, 940 et 770 respectivement (Crémer, 2015). Concernant le nombre de grammes de DVE de *Th. intermedium*, au stade 2 nœuds, celui-ci était de 70 pour diminuer à 34 au stade floraison. Le nombre de grammes d'OEB est quant à lui passé de -16 à -42 du stade deux nœuds au stade floraison (Figure 27 (B), (C)).

Avec l'âge, la proportion des fibres augmente (cellulose, hémicellulose et lignine). Comme le dit Buxton (1996), ces constituants ont une influence négative sur la digestibilité des fourrages et effectivement, on voit que la digestibilité de la matière sèche et de la matière organique diminuent lorsque *Th. intermedium* est à un stade de développement avancé. A la floraison le pourcentage de DMS est de 50% et de DMO est de 45% alors que ces digestibilités étaient en moyenne de 70% au stade 2 nœuds (Figure 28 (E), (F)). Ce déclin de la qualité du fourrage peut être expliqué par l'élongation des tiges lors du développement de la plante où la proportion de ces tiges par rapport aux feuilles augmente. Cela est démontré dans l'étude de Jungers *et al.* (2018) qui ajoutent que les tiges ont un contenu en NDF plus important avec une digestibilité et un contenu en azote plus faible relativement aux feuilles.

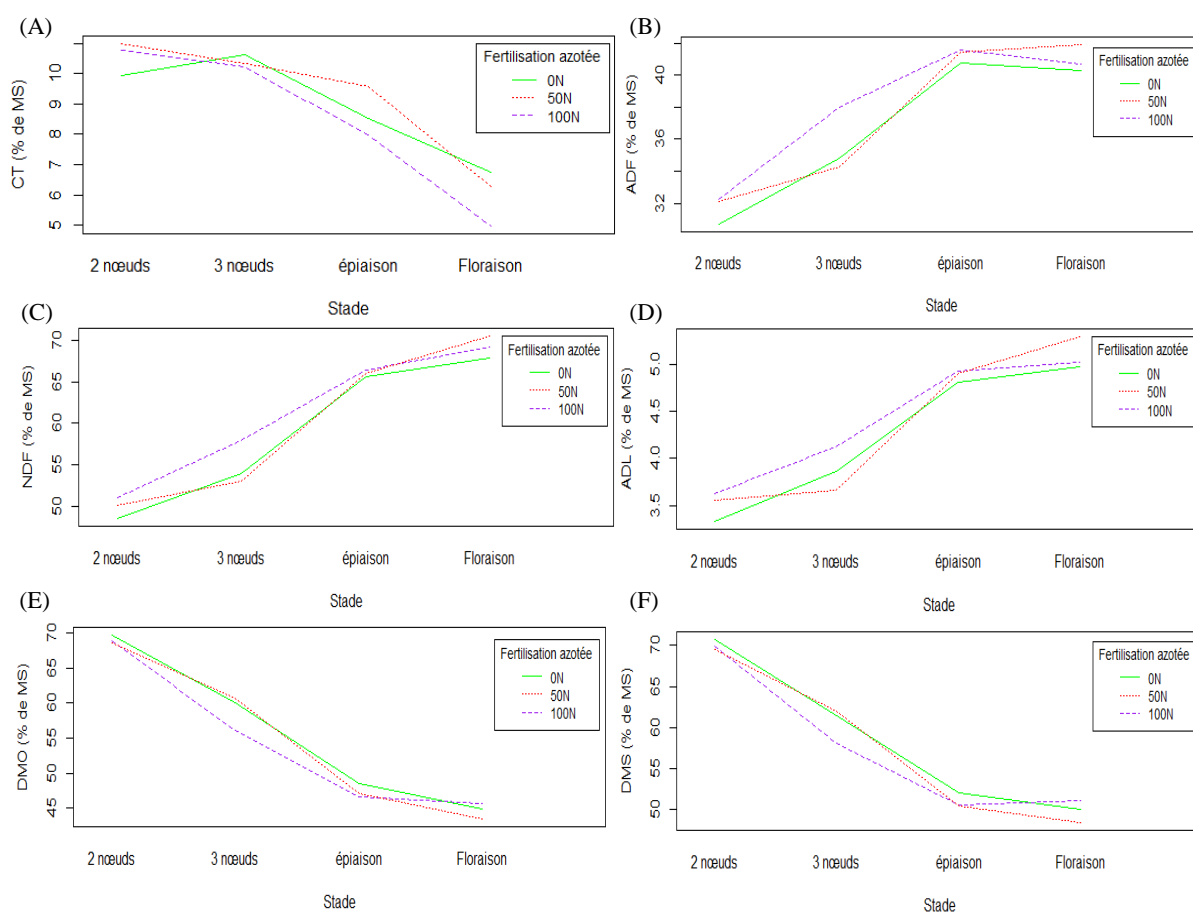


Figure 28 : CT (A), NDF (B), ADF (C), ADL (D), DMO (E), DMS (F), en fonction du stade de développement de Kernza® et de la fertilisation azotée.

En regardant chaque stade séparément, la fertilisation azotée devient le seul facteur variant entre les échantillons. Son effet semble bénéfique sur la teneur en protéines caractérisée par la matière protéique totale (MPT) comme cela est visible sur la Figure 29. Au stade 2 nœuds, les 100 unités d'azote possèdent le nombre de grammes de MPT le plus élevé, entre 170g et 130g par kg de matière sèche contre 100g à 120g à 50 unités d'azote et 90g à 100g à 0 unité d'azote. C'est également à ce stade que l'effet de l'apport d'azote semble le plus marqué, l'augmentation de MPT avec la dose d'azote est moins importante aux autres stades de développement. En outre, l'OEB est également plus élevé avec une fertilisation à 100 unités d'azote plutôt qu'avec les fertilisations à 0 et 50 unités. Cette tendance est également très marquée au stade 2 nœuds contrairement au stade floraison où on n'observe plus de vraies différences entre les fertilisations (Figure 27 (C)). Le nombre de grammes d'OEB au stade deux nœuds était de 7 pour la fertilisation à 100 unités et de -19 et -37 pour une fertilisation à 50 unités et 0 unité respectivement. La valeur négative indique un déficit en protéines relativement à l'énergie contenue dans l'aliment. Cette observation est confirmée par Buxton (1996) qui mentionne que l'addition de fertilisants azotés augmente la concentration en protéines brutes des graminées.

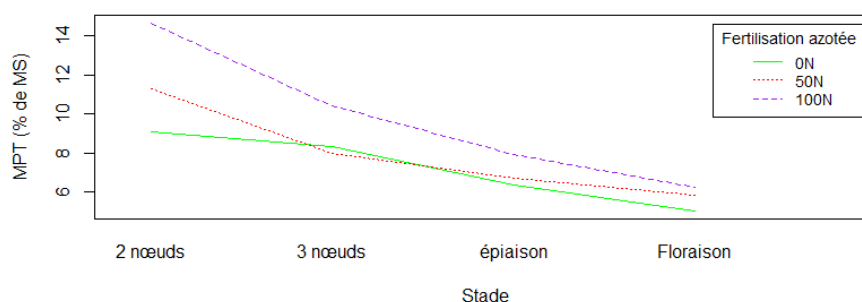


Figure 29: MPT en fonction du stade de développement de Kernza® et de la fertilisation azotée.

Des valeurs très différentes peuvent être présentes entre les répétitions d'un même échantillon (stade et fertilisation identiques). A titre d'illustration, à 2 nœuds et sous 100 unités d'azote le pourcentage de MPT possède une différence de 4% entre les deux répétitions tandis que l'OEB passe de 21,74 à -8,52g/kg de MS (Annexe 19). La variabilité génétique au sein de la population de *Th. intermedium* est bien connue et est certainement responsable de ces différences. Les efforts de sélection devraient être poursuivis afin d'obtenir les meilleurs individus et de stabiliser la population.

En outre la hauteur de coupe peut avoir influencé négativement les valeurs en termes de VEM et de protéines. Lors des prélèvements, les plantes ont été coupées au ras du sol. Or selon Crémer (2015), lorsque la hauteur de coupe augmente, les teneurs en énergie et en protéines du fourrage sont plus élevées. Par exemple, le nombre de VEM du fourrage peut augmenter de 200 lorsqu'on accroît la hauteur de fauche de 3 à 7cm. Des analyses complémentaires devraient donc être réalisées afin d'estimer la valeur alimentaire des plantes fauchées à une dizaine de centimètres du sol.

L'exploitation du fourrage de *Th. intermedium* devrait se faire à un stade jeune (2 nœuds). Cela avait également été observé en Ohio où le fourrage récolté avant l'élongation était de

meilleure qualité (Jungers *et al.*, 2018). A 2 nœuds, les teneurs en matière sèche et en fibres sont moins élevées tandis que le nombre de VEM, de DVE et d'OEB sont plus grands et que les digestibilités de la matière organique et de la matière sèche sont meilleures. En outre, une dose suffisante d'azote doit être apportée, 100 unités d'azote par hectare, afin que la teneur en protéine soit suffisante. A ces conditions, les besoins d'une vache allaitante sont plus ou moins rencontrés, ceux-ci se situent entre 700 et 900 VEM, 40 et 70g de DVE, 0g d'OEB, 14% de MPT, moins de 30% de CEL, 70-75% de DMO (Y. Beckers, communication orale).

Dans le futur, il sera intéressant d'étudier la qualité du fourrage au moment de la récolte et à l'automne afin d'avoir une vue globale de la production fourragère sur la saison culturale. Une fauche en automne avec des plantes à un stade jeune pourrait procurer un fourrage acceptable pour la production d'une vache allaitante. De plus, l'implantation d'un trèfle dans l'interligne apporterait de la protéine. Effectivement, Buxton (1996) rapporte que la concentration en protéine d'une légumineuse est généralement plus élevée que celle d'une graminée. Le nombre de grammes de DVE, d'OEB et le pourcentage de MPT seraient améliorés.

5.4 Caractérisation de la biomasse racinaire

5.4.1 Comparaison de la biomasse racinaire de Kernza® et du froment

Cette mesure a été faite à titre exploratoire, seulement deux prélèvements ont été réalisés pour chacune des mesures au stade floraison. Comme cela avait été anticipé, les valeurs obtenues varient beaucoup entre les deux prélèvements (Annexe 20). Aucune analyse statistique n'a été réalisée. Les résultats de la quantification de la biomasse racinaire en fonction des horizons et des lignes de semis et interlignes sont résumés dans le Tableau 20.

Tableau 20 : Répartition de la biomasse racinaire de Kernza® et du froment sur 90cm.

	Biomasse racinaire moyenne du froment Poids sec (g/m ²)	Biomasse racinaire froment (%)	Biomasse racinaire moyenne de Kernza® Poids sec (g/m ²)	Biomasse racinaire Kernza® (%)
Biomasse moyenne générale sur 90cm	170,7	100%	577,7	100%
Biomasse moyenne sur 0-30 cm	121,6	71%	361,1	63%
Biomasse moyenne sur 30-60 cm	30	18%	143,8	25%
Biomasse moyenne sur 60-90 cm	19,1	11%	72,8	13%
Biomasse moyenne sur la ligne	172,5	51%	894	77%
Biomasse moyenne sur l'interligne	168,9	49%	261,4	23%

Au stade floraison, la biomasse racinaire est visiblement plus grande pour la graminée pérenne Kernza® que pour le froment d'hiver bordant la parcelle. Celle-ci est de plus du triple de celle du froment. Le froment possède une biomasse racinaire sur 90 cm de 1,7T/ha alors que Kernza® atteint 5,78T/ha au stade floraison (Tableau 20). La biomasse aérienne produite par le froment au même stade était de 11T e MS/ha tandis que celle produite par *Th. intermedium* a tendance à être plus faible (7,4T de MS/ha sous une fertilisation à 100 unités

d'azote au stade tallage). Le ratio de la biomasse racinaire sur la biomasse aérienne est donc plus important pour Kernza® que pour le froment. Ce ratio ne peut pas être calculé dans ce travail du à un manque de données. Sainju *et al.* (2017a) avaient obtenu un ratio pour le blé de printemps entre 0,2 et 0,3 et celui de Kernza® âgée de 2 à 4 ans était entre 2 et 3,5.

Concernant la répartition de cette biomasse dans l'horizon, Kernza® semble allouer légèrement plus de biomasse en profondeur. Le pourcentage de biomasse racinaire est de 63% dans les 30 premiers centimètres du sol contre 71% pour le froment. De ce fait, les pourcentages sont un peu plus élevés à 30-60cm et 60-90cm pour Kernza® 25% et 13% contre 18% et 11% pour le froment (Tableau 20). Sainju *et al.*, (2017b) ont également trouvé que la majorité de la biomasse racinaire se trouvait dans les 15 premiers centimètres du sol. Cela serait du à la plus grande disponibilité en eau et en nutriments dans la couche supérieure du sol. Concernant la répartition de la biomasse racinaire entre la ligne et l'interligne, celle-ci n'est pas la même entre les deux espèces. La proportion de biomasse racinaire du froment entre la ligne et l'interligne est assez similaire (51 et 49%) contrairement à la graminée pérenne où 77% de la biomasse se trouve dans la ligne (Tableau 20). Ceci est certainement lié à un interligne plus grand pour la graminée (25cm) relativement à 12,5 cm pour le froment.

Cette mesure indicative montre que le système racinaire de Kernza® est caractérisé par une plus grosse biomasse que celui du froment. Des analyses plus poussées de ce système racinaire devraient être effectuées pour observer son impact sur la gestion de la culture, les services éco systémiques vantés dans la littérature scientifique pourraient être confirmés (mobilisation des éléments fertilisants plus efficace, séquestration du carbone plus importante, amélioration de la structure du sol, ...).

5.4.2 Comparaison de la biomasse racinaire de Kernza® sous différentes fertilisations azotées

Les résultats obtenus suite à la pesée des biomasses racinaires sont présentés dans l'Annexe 21. L'analyse statistique de la biomasse racinaire en fonction des différentes fertilisations azotées a révélé une égalité des moyennes entre celles-ci, p-valeur >0,05 (Figure 30).

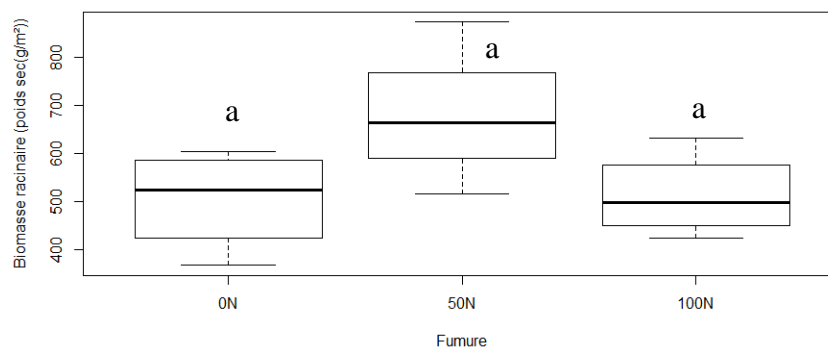


Figure 30: Biomasses racinaires (poids sec (g/m²)) en fonction de la fertilisation azotée de Kernza®.

A priori, la moyenne de la biomasse racinaire pour 50 unités d'azote semblait plus élevée que les deux autres modalités de fertilisation, cependant, l'analyse statistique nous informe que cette biomasse racinaire n'est pas réellement plus élevée. La moyenne générale de la biomasse racinaire produite sur 25cm de profondeur est de 5,57T/ha (poids sec). On observe

que la biomasse racinaire produite sur 25 cm est plus importante que la biomasse racinaire estimée sur 30cm de 3,5T/ha par la méthode précédente (Tableau 20). Cette estimation devrait être meilleure que celle obtenue par les carottages car le nombre de répétitions est plus élevé.

La méthode utilisée pour le prélèvement racinaire n'a pas permis de mettre en évidence de potentielles différences de biomasse racinaire entre les fertilisations azotées. Dans l'étude de Sainju *et al.* (2017a), dans les Grandes Plaines américaines, aucune différence entre les fertilisations azotées n'avait été observée pour *Th. intermedium* ainsi que deux autres graminées (*Bromus inermis* L. et *Panicum virgatum* L.) avec des doses variant de 0 à 84 unités d'azote/ha. Dans cette étude, les différences se trouvaient au niveau de la biomasse aérienne.

La caractérisation du système racinaire est complexe, le sol est hétérogène et la distribution des racines peut varier. A l'avenir, il serait intéressant d'étudier la répartition des racines à des horizons plus profonds ainsi que la densité de ces racines en fonction des différentes fertilisations azotées. Le nombre de répétitions devrait également être augmenté afin d'avoir une meilleure représentation de l'hétérogénéité au sein de la parcelle.

6 Conclusions générales et perspectives

Le suivi qui a été réalisé n'a pris en compte qu'une partie de la saison culturale. En effet, le rendement en grains ainsi que la production fourragère d'automne devront encore être caractérisés. L'ensemble des performances de Kernza® sur la première saison de culture ne sont donc pas encore connues. Au vu de sa pérennité, la graminée devra également être étudiée sur plusieurs années pour observer son potentiel au-delà de la première année d'implantation. Cependant, quelques conclusions peuvent déjà être dégagées.

Concernant la production fourragère de Kernza®, le fourrage devrait être exploité à un stade jeune ne dépassant, idéalement, pas 2 nœuds et recevant un apport azoté suffisant. L'application de 100 unités d'azote par hectare au stade tallage a procuré la meilleure teneur en protéines. Le fourrage prodigué pourrait être utilisé par le bétail allaitant où même les ovins. Malheureusement, la valeur alimentaire de l'espèce peut être sous-estimée par la méthode utilisée, les plantes ayant été fauchées au ras du sol. Ainsi, des analyses complémentaires, avec une hauteur de coupe plus élevée, devraient être réalisées afin de confirmer ou d'infirmer la plus faible valeur alimentaire de *Th. intermedium* relativement aux espèces de graminées prairiales communément utilisées dans nos régions. En outre, le fourrage issu de la récolte des grains devrait être de moins bonne qualité étant donné la perte de valeur alimentaire observée avec le vieillissement de la plante. Cependant, la repousse d'automne pourrait être de meilleure qualité.

La fertilisation azotée doit être suffisante pour la production de biomasse aérienne et les rendements en grains. 100 unités d'azote par hectare appliquées au stade tallage montrent le meilleur potentiel avec la plus grosse production de biomasse aérienne et de biomasse des épis à la floraison. Le rendement en grains qui en résulte devrait être le plus élevé puisque la biomasse des épis à la floraison et le nombre d'épis par m² étaient les plus importants.

Il serait intéressant de réaliser des études plus poussées sur le système racinaire, la production de biomasse racinaire semble effectivement supérieure à celle du froment d'hiver. Les services éco systémiques attendus devraient donc être prodigués.

Les pratiques agronomiques doivent encore être établies, l'implantation de la culture doit être précoce étant donné les besoins importants en degrés jours de l'espèce pour atteindre la maturation complète des grains. Les méthodes de désherbage doivent être approfondies que ce soit par voie chimique ou mécanique. Le contrôle des adventices est crucial la première année d'implantation où la compétition de Kernza® vis-à-vis des espèces adventices ne s'est pas révélée suffisante. Cette année, aucun produit de protection de plantes n'a été utilisé, en effet, la culture n'a pas eu de problèmes particuliers vis-à-vis des maladies et des ravageurs. Si cet aspect perdure, les coûts de production par rapport à un blé annuel serait réduit au vu de la moindre utilisation de produits phytosanitaires. En outre, la taille de la plante est assez élevée, de l'ordre du double du froment. La réduction de cette taille par la sélection ou l'utilisation de régulateur de croissance pourrait être bénéfique sur les rendements en grains et la qualité du fourrage. Enfin, l'implantation du trèfle comme culture compagne doit encore être testée. Celle-ci complexifierait la gestion de la culture mais pourrait apporter des qualités supplémentaires aux fourrages.

La population de Kernza® qui a été étudiée est issue du 5^e cycle de sélection du Land Institute, celle-ci n'est pas encore stabilisée et beaucoup de variations ont été observées entre les individus présents dans la parcelle. Des différences de hauteur de plantes de plus de 100cm ont par exemple été observées, et les plus grands épis pouvaient faire plus de 20 cm en plus par rapport aux plus petits. A l'avenir, il serait pertinent d'étudier les populations plus avancées de *Th. intermedium*, ayant subi un nombre de cycles de sélection plus élevé. Comme cela a été observé dans d'autres études, la sélection du Land Institute devrait améliorer les performances en augmentant les rendements en grains ou encore l'indice de récolte.

Références bibliographiques

- Adebiyi, J., Schmitt Olabisi, L. and Snapp, S. (2015) 'Understanding perennial wheat adoption as a transformative technology: evidence from the literature and farmers', *Renewable Agriculture and Food Systems*, 31(2), pp. 101–110. doi: 10.1017/S1742170515000150.
- Arvalis-Institut du végétal (sd) *Taches physiologiques - Maladie sur Blé tendre, blé dur, triticale*, ARVALIS-infos.fr. Available at: http://www.fiches.arvalis-infos.fr/fiche_accident/fiches_accidents.php?mode=fa&type_cul=1&type_acc=4&id_acc=284 (Accessed: 27 July 2018).
- ARVALIS-Institut du végétal (sd) *Piétin verse - Maladie sur Blé tendre, blé dur, triticale*. Available at: http://www.fiches.arvalis-infos.fr/fiche_accident/fiches_accidents.php?mode=fa&type_cul=1&type_acc=4&id_acc=42 (Accessed: 27 July 2018).
- Arvalis (Institut du végétal) (sd) *Jaunisse Nanisante de l'Orge (JNO) - Les fiches accidents céréales à paille*. Available at: http://www.fiches.arvalis-infos.fr/fiche_accident/fiches_accidents.php?mode=fa&type_cul=1&type_acc=7&id_acc=53 (Accessed: 20 July 2018).
- Barkworth, M. E. *et al.* (2007) *Magnoliophyta : Commelinidae (in part) : Poaceae, part 1. Flora of North America, Volume 24, In : M.E. Barkworth et al (eds), Thinopyrum A Love*. Edited by M. E. Barkworth. Oxford University Press, Oxford, NY.
- Becker, R. *et al.* (1990) 'COMPOSITIONAL , NUTRITIONAL AND FUNCTIONAL (THINOPYRUM INTERMEDIUM)', *Journal of Food Processing and Preservation*, 15, pp. 63–77.
- Bell, L. W. *et al.* (2008) 'A preliminary whole-farm economic analysis of perennial wheat in an Australian dryland farming system', *Agricultural systems*, 96, pp. 166–174. doi: 10.1016/j.agsy.2007.07.007.
- Buxton, D. R. (1996) 'Quality-related characteristics of forages as influenced by plant environment and agronomic factors', *Animal Feed Science Technology*, 59, pp. 37–49.
- Cacho, J. F. *et al.* (2017) 'Integrating perennial bioenergy crops into agricultural landscapes to address water quality and provide other environmental services', *WIREs Energy Environ*, pp. 1–11. doi: 10.1002/wene.275.
- Canode, C. L. (1965) 'Influence of cultural treatments on seed production of intermediate wheatgrass (*Agropyron intermedium* (Host) Beauv.)', *Agronomy journal*, 57(2), p. 207–210. Available at: [https://books.google.be/books?id=zdsH5UXp_GgC&pg=PA75&lpg=PA75&dq=Influence+of+cultural+treatments+on+seed+production+of+intermediate+wheatgrass+\(Agropyron+intermedium+%5BHost%5D+Beauv.\).&source=bl&ots=SrS-78cbs-&sig=3wXZtoV6lRrX2oFiT26u_nORzsw&hl=fr&sa=X](https://books.google.be/books?id=zdsH5UXp_GgC&pg=PA75&lpg=PA75&dq=Influence+of+cultural+treatments+on+seed+production+of+intermediate+wheatgrass+(Agropyron+intermedium+%5BHost%5D+Beauv.).&source=bl&ots=SrS-78cbs-&sig=3wXZtoV6lRrX2oFiT26u_nORzsw&hl=fr&sa=X) (Accessed: 19 July 2018).
- Cattani, D. J. (2017) 'Selection of a perennial grain for seed productivity across years: intermediate wheatgrass as a test species', *Canadian Journal of Plant Science*, 97, pp. 516–524. doi: 10.1139/cjps-2016-0280.
- Cattani, D. J. & Asselin, S. R. (2018) 'Has selection for grain yield altered intermediate wheatgrass?', *Sustainability (Switzerland)*, 10(688). doi: 10.3390/su10030688.
- Chang, K. F. & Howard, R. J. (2001) 'Stem Smut (*Ustilago hypodytes*) on Intermediate Wheatgrass in Canada', *Plant Disease*, 85(1), p. 96.2–96.2. doi: 10.1094/PDIS.2001.85.1.96B.

- Chase, M. W. & Reveal, J. L. (2009) 'A phylogenetic classification of the land plants to accompany APG IIIb oj_1002 122..127', *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161(Table 1), pp. 122–127. doi: 10.1111/j.1095-8339.2009.01002.x.
- Colbach, N., Dürr, C., *et al.* (2006) 'AlomySys: Modelling black-grass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) germination and emergence, in interaction with seed characteristics, tillage and soil climate: I. Construcion', *European Journal of Agronomy*, 24, pp. 95–112. doi: 10.1016/j.eja.2005.07.002.
- Cox, T S. Clover, J D. Van Tassel, D L. Cox C M. DeHaan, L. (2006) 'Prospects for developing perennial grain crops', *Biosciencemag*, 56(8), pp. 649–659.
- Cox, T. S. *et al.* (2010) 'Progress in breeding perennial grains', *Crop and Pasture Science*, 61, pp. 513–521. doi: 10.1071/CP09201.
- Crémer, S. (2015) *LA GESTION DES PRAIRIES*. Available at: http://www.centredemichamps.be/pdf/Cours_A_Prairie_Cremer_S_2015_2016.pdf (Accessed: 31 July 2018).
- Crews, T. E. *et al.* (2016) 'Going where no grains have gone before: From early to mid-succession', *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 223, pp. 223–238. doi: 10.1016/j.agee.2016.03.012.
- Crews, T. E. (2017) 'Closing the gap between grasslands and grain agriculture', *Kansas Journal of Law and Public Policy*, 26(3), pp. 274–296. Available at: [http://law.ku.edu/sites/law.drupal.ku.edu/files/docs/law_journal/v26/7 Crews - Grasslands and Grain.pdf](http://law.ku.edu/sites/law.drupal.ku.edu/files/docs/law_journal/v26/7%20Crews%20-%20Grasslands%20and%20Grain.pdf) (Accessed: 28 February 2018).
- Culman, S. W. *et al.* (2013) 'Soil and Water Quality Rapidly Responds to the Perennial Grain Kernza Wheatgrass', *Agronomy Journal*. The American Society of Agronomy, Inc., 105(3), pp. 735–744. doi: 10.2134/agronj2012.0273.
- Curwen-McAdams, C. and Jones, S. S. (2017) 'Breeding Perennial Grain Crops Based on Wheat', *Crop Science*. The Crop Science Society of America, Inc., 57, pp. 1172–1188. doi: 10.2135/cropsci2016.10.0869.
- Decruyenaere, V. *et al.* (sd) 'Qualité du fourrage en Région Wallonne', *Requasud ASBL*. Available at: <http://www.requasud.be/img/page/publication/BrochurefourragesVF.pdf> (Accessed: 26 March 2018).
- DeHaan, Lee; Christians, Marty; Crain, Jared; Poland, J. (2018) 'Development and evolution of an intermediate wheatgrass domestication program', *Sustainability*, 10, p. 1499. doi: 10.3390/su10051499.
- DeHaan, L. R. *et al.* (2016) 'A pipeline strategy for grain crop domestication', *Crop Science*, 56, pp. 1–14. doi: 10.2135/cropsci2015.06.0356.
- DeHaan, L. R. *et al.* (sd) 'Current efforts to develop perennial wheat and domesticate *Thinopyrum intermedium* as a perennial grain', *Perennial Crops for Food Security Proceedings of the FAO Expert Workshop*, pp. 72–89. Available at: https://landinstitute.org/wp-content/uploads/2014/11/PF_FAO14_ch06.pdf (Accessed: 20 February 2018).
- Dehaan, L. R. & Van Tassel, D. L. (2014) 'Useful insights from evolutionary biology for developing perennial grain crops', *American Journal of Botany*, 101(10), pp. 1801–1819. doi: 10.3732/ajb.1400084.

- Delcour, A. *et al.* (2014) 'État des lieux des flux céréaliers en Wallonie selon différentes filières d'utilisation', *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 18(2), pp. 181–192.
- Doussinault, G. *et al.* (2001) 'Évolution de la variabilité génétique chez le blé', in *Agriculture et biodiversité des plantes. Dossier de l'environnement de l'inra*. Paris, pp. 91–103. Available at: <https://www7.inra.fr/dpenv/pdf/doussd21.pdf> (Accessed: 16 April 2018).
- Frahm, C. S. *et al.* (2018) 'Responses of intermediate wheatgrass to plant growth regulators and nitrogen fertilizer', *Agronomy Journal*, 110, pp. 1–8. doi: 10.2134/agronj2017.11.0635.
- Gate, P. (1995) *Écophysiologie du blé*. TEC&Doc Lavoisier.
- Gazza, L. *et al.* (2016) 'Qualitative traits of perennial wheat lines derived from different *Thinopyrum* species', *Genetic Resources and Crop Evolution*. Springer Netherlands, 63(2), pp. 209–219. doi: 10.1007/s10722-015-0240-8.
- Glover, J. D. *et al.* (2010) 'Increased Food and Ecosystem', *Science*, 328(June), pp. 1638–1640. doi: 10.1126/science.1188761.
- Hayes, R. C. *et al.* (2012) 'Field Crops Research Perennial cereal crops: An initial evaluation of wheat derivatives', *Field Crops Research*, 133, pp. 68–89. doi: 10.1016/j.fcr.2012.03.014.
- Hayes, R. C. *et al.* (2018) 'The performance of early-generation perennial winter cereals at 21 sites across four continents', *Sustainability (Switzerland)*, 10(4), pp. 1–28. doi: 10.3390/su10041124.
- Hochman, Z. *et al.* (sd) *Australia - Global yield gap atlas*. Available at: <http://www.yieldgap.org/australia> (Accessed: 27 March 2018).
- Hongjie, L. & Wang, X. (2009) 'Thinopyrum ponticum and Th. intermedium: the promising source of resistance to fungal and viral diseases of wheat', *J. Genet. Genomics*, 36, pp. 557–565. doi: 10.1016/S1673-8527(08)60147-2.
- Hybner, R. & Jacobs, J. (2012) 'INTERMEDIATE WHEATGRASS (*Thinopyrum intermedium* L.): An Introduced Conservation Grass for Use in Montana and Wyoming', *NRCS–Montana–Technical Note–Plant Materials–MT-80*, pp. 1–8. Available at: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_PLANTMATERIALS/publications/mtpmctn11288.pdf (Accessed: 26 February 2018).
- IRM (sd) *Normales climatologiques-Station de uccle*. Available at: <https://www.meteo.be/meteo/view/fr/360955-Normales+mensuelles.html> (Accessed: 21 July 2018).
- Jaikumar, N. S. *et al.* (2012) 'Agronomic assessment of perennial wheat and perennial rye as cereal crops', *Agronomy Journal*, 104(6), pp. 1716–1726. doi: 10.2134/agronj2012.0291.
- Jaikumar, N. S., Snapp, S. S. and Sharkey, T. D. (2013) 'Life history and resource acquisition: Photosynthetic traits in selected accessions of three perennial cereal species compared with annual wheat and rye', *American Journal of Botany*. Botanical Society of America, 100(12), pp. 2468–2477. doi: 10.3732/ajb.1300122.
- Jaikumar, N. S., Snapp, S. S. and Sharkey, T. D. (2013) 'Life history and resource acquisition: Photosynthetic traits in selected accessions of three perennial cereal species compared with annual wheat and rye', *American Journal of Botany*, 100(12), pp. 2468–2477. doi: 10.3732/ajb.1300122.

- Jaikumar, N. S., Snapp, S. S. and Sharkey, T. D. (2016) 'Older *Thinopyrum intermedium* (Poaceae) plants exhibit superior photosynthetic tolerance to cold stress and greater increases in two photosynthetic enzymes under freezing stress compared with young plants.', *Journal of experimental botany*. Oxford University Press, 67(15), pp. 4743–53. doi: 10.1093/jxb/erw253.
- Jensen, K. B. *et al.* (2016) 'Agronomic and genetic diversity in intermediate wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*)', *Plant Breeding*, 135(6), pp. 751–758. doi: 10.1111/pbr.12420.
- Jeranyama, P. & Garcia, A. D. (sd) 'Understanding Relative Feed Value (RFV) and Relative Forage Quality (RFQ)'. Available at: http://www.southdakotaagriculturallaboratories.com/uploads/1/3/5/2/13521518/exex8149_understanding_rfv_and_rfq.pdf (Accessed: 2 April 2018).
- Jouy, L. (1993) 'Le désherbage anti-dicotylédones à l'implantation des cultures fourragères 1.', *Fourrages*, pp. 217–220.
- Jungers, J. M. *et al.* (2017) 'Intermediate wheatgrass grain and forage yield responses to nitrogen fertilization', *Agronomy Journal*, 109(2), pp. 462–472. doi: 10.2134/agronj2016.07.0438.
- Jungers, J. M. *et al.* (2018) 'Growth, development, and biomass partitioning of the perennial grain crop *Thinopyrum intermedium*', *Annals of Applied Biology*, pp. 1–9. doi: 10.1111/aab.12425.
- Karn, J. F. & Krupinsky, J. M. (1983) 'Chemical Composition of Intermediate Wheatgrass Affected by Foliar Diseases and Stem Smut', *Phytopathology*, (73), pp. 1152–1155. Available at: https://www.apsnet.org/publications/phytopathology/backissues/Documents/1983Articles/Phyto73n08_1152.PDF (Accessed: 19 June 2018).
- King, A. E. & Blesh, J. (2018) 'Crop rotations for increased soil carbon: Perenniality as a guiding principle: Perenniality', *Ecological Applications*, 28(1), pp. 249–261. doi: 10.1002/eap.1648.
- Kruger, G. (sd) 'Intermediate Wheatgrass Seed Production: A Literature Review'. Available at: [http://www1.foragebeef.ca/\\$foragebeef/frgebeef.nsf/all/frg123/\\$FILE/intwhtgrassrev.pdf](http://www1.foragebeef.ca/$foragebeef/frgebeef.nsf/all/frg123/$FILE/intwhtgrassrev.pdf) (Accessed: 14 July 2018).
- Larkin, P. J. *et al.* (2014) 'Progress in developing perennial wheats for grain and grazing', *Crop and Pasture Science*, 65(11), pp. 1147–1164. doi: 10.1071/CP13330.
- Lawrence, T., Ratzlaff, C. D. and Jefferson, P. G. (1991) 'Emergence of several Triticeae range grasses influenced by depth-of seed placement', *Journal of Range Management*, 44(2), pp. 186–187.
- Livre Blanc Céréales (2017) *La préparation du sol avant le semis*. Available at: <http://www.livre-blanc-cereales.be/thematiques/semis/preparation-du-sol/> (Accessed: 13 August 2018).
- Lubofsky, E. (2016) 'The promise of perennials: Working through the challenges of perennial grain crop development', *CSA News*, 61(11), p. 4. doi: 10.2134/csa2016-61-11-1.
- Mahelka, V., Kopecký, D. and Paštová, L. (2011) 'On the genome constitution and evolution of intermediate wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*: Poaceae, Triticeae)', *BMC Evolutionary Biology*, 11(127), pp. 1–17. doi: 10.1186/1471-2148-11-127.
- Marquardt, K. *et al.* (2016) 'Farmer perspectives on introducing perennial cereal in Swedish farming systems: a sustainability analysis of plant traits, farm management, and ecological implications', *Agroecology and Sustainable Food Systems*. Taylor & Francis, 40(5), pp. 432–450. doi: 10.1080/21683565.2016.1141146.

- Marti, A. *et al.* (2016) 'Structural characterization of proteins in wheat flour doughs enriched with intermediate wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*) flour', *FOOD CHEMISTRY*, 194, pp. 994–1002. doi: 10.1016/j.foodchem.2015.08.082.
- Moore, K. J. *et al.* (1991) 'Describing and Quantifying Growth Stages of Perennial Forage Grasses', *Agronomy and horticulture-Faculty publications*, 83, pp. 1073–1077. Available at: <http://digitalcommons.unl.edu/agronomyfacpub> (Accessed: 19 April 2018).
- Murphy, K. M. *et al.* (2009) 'Nutritional and quality characteristics expressed in 31 perennial wheat breeding lines', *Renewable Agriculture and Food Systems*, 24(4), pp. 285–292. doi: 10.1017/S1742170509990159.
- Murphy, K. M. *et al.* (2010) 'Post-sexual cycle regrowth and grain yield in *Thinopyrum elongatum* ?? *Triticum aestivum* amphiploids', *Plant Breeding*, 129, pp. 480–483. doi: 10.1111/j.1439-0523.2009.01712.x.
- Newell, M. T. & Hayes, R. C. (2017) 'An initial investigation of forage production and feed quality of perennial wheat derivatives', *Crop and Pasture Science*, 68(12), pp. 1141–1148. doi: 10.1071/CP16405.
- Ogle, D. (2001) 'INTERMEDIATE WHEATGRASS *Thinopyrum intermedium* (Host) Barkworth & D.R. Dewey Plant Symbol = THIN6'. Available at: <http://npdc.usda.gov> (Accessed: 14 July 2018).
- Ogle, D. G. *et al.* (2011) 'Plant Guide for intermediate wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*)', *USDA-Natural Resources Conservation Service, Idaho and North Dakota Plant Materials Centers*. Available at: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_PLANTMATERIALS/publications/idpmspg10369.pdf (Accessed: 29 March 2018).
- de Oliveira, G. *et al.* (2018) 'Energy, water and carbon exchange over a perennial *Kernza* wheatgrass crop', *Agricultural and Forest Meteorology*, 249, pp. 120–137. doi: 10.1016/j.agrformet.2017.11.022.
- de Parcevaux, S. & Huber, L. (2007) *Bioclimatologie: Concepts et applications*. Quae. Available at: https://books.google.be/books?id=aBLLQ0I00HwC&pg=PP5&lpg=PP5&dq=De+parcevaux+et+Huber+bioclimatologie+concepts+et+applications&source=bl&ots=IGrKRxiu3o&sig=v0qX8-b3KRfJdL5DZLZ3HcWkj3U&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwj4nPj1kc_cAhVRKFAKHRExAkYQ6AEwCHoECAIQAQ#v=onepag (Accessed: 2 August 2018).
- Pugliese, J. Y. (2017) *Above-and Belowground Response to Managing *Kernza* (*Thinopyrum intermedium*) as a Dual-Use Crop for Forage and Grain*. The Ohio State University. Available at: https://etd.ohiolink.edu/!etd.send_file?accession=osu1494000853982965&disposition=inline (Accessed: 28 February 2018).
- R-C Wang, R. *et al.* (2015) 'Genome evolution of intermediate wheatgrass as revealed by EST-SSR markers developed from its three progenitor diploid species', *Genome*, 58, pp. 63–70. doi: 10.1139/gen-2014-0186.
- Rasche, F. *et al.* (2017) 'A preview of perennial grain Agriculture: Knowledge gain from biotic interactions in natural and agricultural ecosystems', *Ecosphere*, 8(12). doi: 10.1002/ecs2.2048.

- Rasse, D. P., Rumpel, C. and Dignac, M.-F. (2005) 'Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation', *Plant and Soil*, 269, pp. 341–356. doi: 10.1007/s11104-004-0907-y.
- Ryan, M. R. *et al.* (2018) 'Managing for Multifunctionality in Perennial Grain Crops', *Forum BioScience*, 68(4), pp. 294–304. doi: 10.1093/biosci/biy014.
- Sainju, U. M. *et al.* (2017a) 'Root biomass, root/shoot ratio, and soil water content under perennial grasses with different nitrogen rates', *Field Crops Research*, 210, pp. 183–191. doi: 10.1016/j.fcr.2017.05.029.
- Sainju, U. M. *et al.* (2017b) 'Root and soil total carbon and nitrogen under bioenergy perennial grasses with various nitrogen rates', *Biomass and Bioenergy*, 107, pp. 326–334. doi: 10.1016/j.biombioe.2017.10.021.
- Schendel, R. R. *et al.* (2015) 'Isolation and characterization of feruloylated arabinoxylan oligosaccharides from the perennial cereal grain intermediate wheat grass (*Thinopyrum intermedium*)', *Carbohydrate Research*, 407, pp. 16–25. doi: 10.1016/j.carres.2015.01.006.
- Service publique wallon (sd) 'L'érosion'.
- STATBEL - Direction générale Statistique (2017) 'Chiffres clés de l'agriculture'. Available at: <http://www.statbel.fgov.be> (Accessed: 13 July 2018).
- Taylor, C. (NRCS) (2012) *PBS Film Explores History of Dust Bowl and Founding of USDA Agency / USDA*. Available at: <https://www.usda.gov/media/blog/2012/11/16/pbs-film-explores-history-dust-bowl-and-founding-usda-agency> (Accessed: 8 March 2018).
- Trlica, M. J. (2013) 'Grass Growth and Response to Grazing'. Available at: <http://extension.colostate.edu/docs/pubs/natres/06108.pdf> (Accessed: 29 March 2018).
- USDA - Natural Resources Conservation Service (sd) *Plants Profile for Thinopyrum intermedium (intermediate wheatgrass)*. Available at: <https://plants.usda.gov/core/profile?symbol=thin6> (Accessed: 30 May 2018).
- USDA (National agricultural Statistics service) (sd) *QuickStats Average of data items across time periods*. Available at: <https://quickstats.nass.usda.gov/data/maps/C58AB859-5490-3A94-A849-4E121DBD92E5> (Accessed: 27 March 2018).
- VASCAN (2018a) *Thinopyrum intermedium (Host) Barkworth & D.R. Dewey subsp. intermedium - Base de données des plantes vasculaires du Canada (VASCAN)*. Available at: <http://data.canadensys.net/vascan/taxon/24139?lang=fr> (Accessed: 16 April 2018).
- VASCAN (2018b) *Thinopyrum intermedium subsp. barbulatum (Schur) Barkworth & D.R. Dewey - Database of Vascular Plants of Canada (VASCAN)*. Available at: <http://data.canadensys.net/vascan/taxon/24140?lang=en> (Accessed: 12 August 2018).
- Wagoner, P. (1994) 'Third New Crops Symposium Indianapolis - Perennial Grain', *The Newsletter of the Indiana Center for New Crops and Plant Products*, 4(2). Available at: <https://hort.purdue.edu/newcrop/NewCropsNews/94-4-2/FALL94.html#RTFToC11> (Accessed: 14 July 2018).
- WalOnMap (2014) *Carte des Sols de wallonie*. Available at: <http://geoportail.wallonie.be/walonmap#BBOX=173888.92996171987,173973.5306517546,139540.72357986413,139575.1194819893> (Accessed: 12 June 2018).

- White, R. S. & Currie, P. O. (sd) 'MORPHOLOGICAL FACTORS RELATED TO SEEDLING WINTER INJURY IN THREE PERENNIAL GRASSES'. Available at: <http://www.nrcresearchpress.com/doi/pdfplus/10.4141/cjps80-195> (Accessed: 18 July 2018).
- Widar, J. *et al.* (sd) 'La rénovation des prairies.', *Les livrets de l'agriculture*, 21. Available at: www.wallonie.be (Accessed: 14 July 2018).
- Wills, B. J. *et al.* (1998) 'Thinopyrum intermedium (Host) Barkw. & Dewey – a review, and evaluation of intermediate and pubescent wheatgrass for dryland agriculture in New Zealand', *233 Proceedings of the New Zealand Grassland Association*, 60, pp. 233–241. Available at: https://www.grassland.org.nz/publications/nzgrassland_publication_246.pdf (Accessed: 19 June 2018).
- Zhang, X. *et al.* (2015) 'Towards the understanding of end-use quality in intermediate wheatgrass (Thinopyrum intermedium): High-molecular-weight glutenin subunits, protein polymerization, and mixing characteristics', *Journal of Cereal Science*, 66, pp. 81–88. doi: 10.1016/j.jcs.2015.10.008.
- Zhang, X. *et al.* (2016) 'Establishment and Optimization of Genomic Selection to Accelerate the Domestication and Improvement of Intermediate Wheatgrass', *The Plant Genome*. Crop Science Society of America, 9(1), pp. 1–18. doi: 10.3835/plantgenome2015.07.0059.
- Zhang, X. *et al.* (2017) 'Uncovering the Genetic Architecture of Seed Weight and Size in Intermediate Wheatgrass through Linkage and Association Mapping', *The Plant Genome*. Crop Science Society of America, 10(3), pp. 1–15. doi: 10.3835/plantgenome2017.03.0022.

Annexes

Estimation de la levée de Kernza®

Annexe 1: Statistiques descriptives du nombre de plantules par m² en fonction de la répétition dans la parcelle de Kernza®.

parcours de formation						
Blocs : R1						
Min	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.	
40	124	180	174	208	304	
Blocs : R2						
Min	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.	Na's
72	128	160	169	204	320	1
Blocs : R3						
Min	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.	
64	126	164	168	200	312	
Blocs : R4						
Min	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.	
80	136	200	193	224	344	

Relevé des adventices

Annexe 2: Statistiques descriptives du nombre d'adventices par m² en fonction de la date d'échantillonnage dans la parcelle de Kernza®.

Date : 18-05-18					
Min	1st Qu.	Median	Mean	3er Qu.	Max
44	48	52	60	62	100
Date : 22-06-18					
Min	1st Qu.	Median	Mean	3er Qu.	Max
16	25	30	34	39	56

Annexe 3: Statistiques descriptives du nombre d'adventices par m² en fonction de l'espèce cultivée.

Espece : froment					
Min	1st Qu.	Median	Mean	3er Qu.	Max
0	12	16	18	26	36
Espece : Kernza					
Min	1st Qu.	Median	Mean	3er Qu.	Max
16	25	30	34	39	56

Développement de la culture

- Echelle BBCH

Annexe 4 : Echelle BBCH améliorée des stades phénologiques des céréales (froment, blé = *Triticum* sp. L., orge = *Hordeum vulgare* L., avoine = *Avena sativa* L., seigle = *Secale cereale* L.) (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 graine
- 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 d'avantage 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 entrenœud, 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 arrêtes (barbes) sont visibles (pour les variétés aristées)

Stade principal 5 : sortie de l'inflorescence ou épiaison

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

Stade principal 6 : floraison, anthèse

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

Stade principal 7 : développement des graines

- 71 stade aqueux : les premières graines ont atteint la moitié de leur taille finale
- 73 début du stade laiteux
- 75 stade 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 5: Stades de développement de Kernza® (selon l'échelle BBCH) tout au long de la saison.

Date	Stade de développement	Description	Degrés jours
22-09-18	0		12,3
19-10-18	12	Développement des feuilles	383,8
29-11-18	21	Tallage	688,4
12-03-18	23	Tallage	1069
30-03-18	24	Tallage	1155
06-04-18	23	Tallage	1214,1
18-04-18	23	Tallage	1362,5
24-04-18	29	Tallage	1457,6
30-04-18	30	Elongation	1517,5
07-05-18	31	Elongation	1601,8
14-05-18	32	Elongation	1703,7
22-05-18	39	Elongation	1814,3
28-05-18	48	Montaison	1931,6
04-06-18	55	Sortie de l'Inflorescence	2060,8
11-06-18	53	Sortie de l'Inflorescence	2193,1
18-06-18	58	Sortie de l'Inflorescence	2300,8
25-06-18	67	Floraison	2403,7
02-07-18	71	Développement des graines	/
09-07-18	74	Développement des graines	/
16-07-18	74	Développement des graines	/
23-07-18	76	Développement des graines	/
30-07-18	80	Maturation des graines	/

- *Table de Moore*

Annexe 6 : Table de Moore (1991), n = numéro de l'événement (nombre de feuilles ou de nœuds), N = nombre d'événements dans le stade (nombre total de feuilles ou de nœuds développés).

Stade	Index	Description
<u>Germination</u>		
G0	0,0	Semence sèche
G1	0,1	Imbibition
G2	0,3	Emergence du radicule
G3	0,5	Emergence du coléoptile
G4	0,7	Elongation du coléoptile
G5	0,9	Le coléoptile perce la surface du sol
<u>Végétatif - Développement foliaire</u>		
V0	1,0	Emergence de la première feuille
V1	$(1/N)+0,9$	Première feuille étalée
V2	$(2/N)+0,9$	Deuxième feuille étalée
Vn	$(n/N)+0,9$	N ^{ième} feuille étalée
<u>Elongation</u>		
E0	2,0	Début de l'élongation
E1	$(1/N)+1,9$	Premier nœud palpable/visible
E2	$(2/N)+1,9$	Deuxième nœud palpable/visible
En	$(n/N)+1,9$	N ^{ième} nœud palpable/visible
<u>Reproducteur - Développement floral</u>		
R0	3,0	Gonflement
R1	3,1	Emergence de l'épi (inflorescence)/1 ^{er} épillet visible
R2	3,3	Epillets complètement sortis/pédoncule non sorti
R3	3,5	Epi sorti/pédoncule totalement allongé
R4	3,7	Emergence des anthères/floraison
R5	3,9	Post-floraison/fecondation
<u>Développement des graines et maturation</u>		
S0	4,0	Caryopse visible
S1	4,1	Laiteux
S2	4,2	Pâteux mou
S3	4,3	Pâteux dur
S4	4,4	Endosperme dur/maturité physiologique
S5	4,5	Endosperme sec/Graine mûre

Annexe 7: Ensemble des stades de développement de Kernza® suivis selon la table de Moore sur la saison.

Stade	Description	Index
E0	Début de l'élongation	2
E1	1 nœud visible	2,15
E2	2 nœuds visibles	2,4
E3	3 nœuds visibles	2,65
E4	4 nœuds visibles	2,9
R0	Gonflement	3
R1	1er épillet visible	3,1
R2	Ensemble de l'épi sorti	3,3
R3	Pédoncule sorti	3,5
R4	Floraison	3,7
R5	Fécondation	3,9
S0	Caryopse visible	4
S1	Laiteux	4,1

Caractéristiques morphologiques

- *Nombre de talles*

Annexe 8 : Ecart-types du nombre de talles par m² en fonction de la fertilisation azotée et de la date de prélèvement.

Ecart-type				
Date	0N	50N	100N	0+100N
14-05-18	144,4	148,6	156,9	139
22-05-18	121,6	130,4	155,8	79,2
28-05-18	96	136,2	129,1	137,5
04-06-18	140,7	142,8	173,4	120
11-06-18	127,2	99,3	168	73,8
18-06-18	108,8	127	122	151,7
25-06-18	128,3	189	139,8	152,8
02-07-18	134,4	149,2	124,5	107,1

- *Nombre d'épis*

Annexe 9 : Ecart-types du nombre d'épis par m² en fonction de la fertilisation azotée et de la date de prélèvement.

Ecart-type				
Date	0N	50N	100N	0+100N
11-06-18	119,1	107,4	176	99,1
18-06-18	131,7	108,8	122,3	110,4
25-06-18	126,6	137,1	127,2	110,9
02-07-18	132,9	138,3	127,5	115,5

- *Hauteur des plantes*

Annexe 10: Statistiques descriptives de la hauteur des plantes (cm) en fonction de la fertilisation azotée et de la date de prélèvement.

18-06-18						
Fertilisation	Min	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max
0N	76	101	113,5	112	125	140
50N	74	105	123,5	122	137	176
100N	71	114	128	125	139	169
0+100N	71	98	109,5	110	123	152
30-07-18						
	Min	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max
0N	112	138	144	144	154	167
50N	120	140	151	151	162	185
100N	125	146	154	156	167	203
0+100N	107	132	137	140	148	174

Annexe 11: Résultats du test SNK de la hauteur des plantes (cm) de Kernza® en fonction de la date de prélèvement pour les fumures confondues.

Date	Hauteur moyenne des plantes (cm)	Groupe
18-06-18	118	a
30-07-18	148	b

Annexe 12: Résultats du test SNK de la hauteur des plantes (cm) de Kernza® en fonction de la fertilisation azotée pour les deux dates de prélèvement confondues.

Fertilisation	Hauteur moyenne des plantes (cm)	Groupe
0N	128	a
50N	137	b
100N	141	b
0+100N	125	a

- *Longueur des épis*

Annexe 13 : Statistiques descriptives de la longueur des épis (cm) en fonction de la fertilisation azotée et de la date de prélèvement.

18-06-18						
Fertilisation	Min	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max
0N	6	13,9	16,5	16,2	19,5	23,5
50N	6,5	15	17,3	18	21,5	30
100N	5,5	15	19	18,5	21,3	30
0+100N	6	12,9	16	16,4	19,6	28
30-07-18						
	Min	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max
0N	11	16,8	20	20,6	24	32
50N	9	19,8	21	21,8	25	31
100N	13	20	23	22,6	25	34
0+100N	10	17	21	20,7	24	35

Annexe 14: Résultats du test SNK de la longueur des épis (cm) de Kernza® en fonction de la date de prélèvement pour les fertilisations confondues.

Date	Longueur moyenne des épis (cm)	Groupe
18-06-18	17	a
30-07-18	22	b

Caractérisation de la biomasse aérienne

- *Biomasse des épis/biomasse aérienne totale*

Annexe 15: Résultats du SNK de la biomasse des épis sur la biomasse aérienne totale en fonction de la fertilisation azotée pour le stade épiaison.

Epiaison		
Fertilisation	Biomasse des épis/biomasse aérienne totale	Groupes
0N	0,136	a
50N	0,137	a
100N	0,142	a
0+100N	0,128	a

Annexe 16: Résultats du SNK de la biomasse des épis sur la biomasse aérienne totale en fonction de la fertilisation azotée pour le stade floraison.

Floraison		
Fertilisation	Biomasse des épis/biomasse aérienne totale	Groupes
0N	0,117	a
50N	0,12	a
100N	0,127	a
0+100N	0,12	a

Annexe 17: Résultats du test SNK de la biomasse des épis sur la biomasse aérienne totale en fonction du stade de prélèvement.

Stade	Biomasse des épis/biomasse aérienne totale	Groupes
Redressement	0	a
Epiaison	0,14	b
Floraison	0,12	c

Annexe 18: Biomasse des épis sur la biomasse aérienne totale du froment au stade floraison dans les parcelles bordant le champ de Kernza®.

froment : stade floraison	
Répétitions	Biomasse des épis/biomasse aérienne totale
R1	0,30
R2	0,30
R3	0,28
R4	0,28

- Valeur alimentaire de la biomasse aérienne

Annexe 19: Composantes de la valeur alimentaire de Kernza® sous différentes fertilisations azotées et à différents stades de développement.

N°	Stade	Fum- ure	MS (%)	MSa (%)	CT (% MS)	MPT (% MS)	CEL (% MS)	NDF (% MS)	ADL (% MS)	ADF (% MS)	SSt (% MS)	DMS (% MS)	DMO (% MS)	MOD (g/ kgMS)	ENA (kcal/ kgMS)	EB (kcal/ kgMS)	EM (kcal/ kgMS)	VEM (/ kgMS)	VEVI (/ kgMS)	DVE (g/ kgMS)	OEB (g/ kgMS)
4	Floraison	0N	39,77	95,44	7,24	5,64	37,66	67,33	4,91	40,02	13,59	50,33	45,34	547,02	45,46	4403,70	1969,27	664,24	622,72	34,07	-41,6
5	Floraison	0N	33,26	95,73	6,23	4,43	37,9	68,5	5,05	40,54	15,53	49,68	44,4	546,54	47,44	4426,27	1967,56	662,91	620,03	30,21	-49,33
6	Floraison	50N	18,89	95,87	6,54	5,97	38,74	69,97	5,27	41,58	11,8	49,21	44,47	545,41	44,75	4447,92	1963,49	660,68	616,26	34,43	-39,19
1	Floraison	50N	39,79	95,78	6,03	5,66	39,66	71,14	5,33	42,23	11,18	47,67	42,54	536,5	44,65	4471,97	1931,38	647,26	598,55	31,87	-39,89
2	Floraison	100N	38,82	95,8	4,79	6,98	37,16	67,62	4,87	39,32	15,34	52,94	47,53	572,56	47,07	4521,39	2061,21	697,79	659,08	41,13	-36,52
3	Floraison	100N	46,36	95,71	5,14	5,49	39,39	70,92	5,17	42,06	13,94	49,27	43,82	548,5	45,98	4502,66	1974,61	663,61	617,4	33,12	-42,8
8	Épiaison	0N	27,03	93,88	8,53	6,52	36,53	65,01	4,64	40,29	7,75	53,72	50,6	570,92	44,42	4355,76	2055,31	700,46	670,34	41,02	-39,36
9	Épiaison	0N	29,07	93,92	8,5	6,24	37,31	66,2	4,98	41,26	6,21	50,5	46,64	548,18	43,95	4359,52	1973,45	667,18	628,45	36,38	-37,82
10	Épiaison	50N	25,76	93,83	9,69	7,51	36,53	64,1	4,72	40,11	5,53	53,33	50,3	562,97	42,27	4325,59	2026,68	689,74	658,33	42,73	-31,49
7	Épiaison	50N	27,67	94,24	9,46	5,97	39,28	67,83	5,1	42,77	4,83	47,58	43,92	527,69	41,29	4334,44	1899,69	638,37	593,77	32,51	-36,53
11	Épiaison	100N	27,51	93,97	8,09	7,86	37,34	65,22	4,78	40,72	6,67	52,01	48,17	559,17	42,71	4404,15	2013,01	681,81	644,63	42,39	-28,52
12	Épiaison	100N	25,56	93,97	7,85	7,94	38,92	67,73	5,07	42,46	4,64	49,11	45,22	543,24	41,29	4430,11	1955,67	658,06	613,82	39,79	-25,58
18	3 nœuds	0N	30,49	91,97	9,74	7,47	30,71	54,99	3,92	35,44	12,13	60,08	58,84	611,42	48,08	4268,17	2201,10	763,85	755,27	50,91	-39,03
15	3 nœuds	0N	28,65	92,33	11,5	9,14	29,78	52,8	3,79	34,2	11,76	62,84	61,39	615,3	45,58	4216,53	2215,07	771,72	768,1	56,48	-28
17	3 nœuds	50N	29,18	92,15	9,6	7,38	29,59	52,68	3,56	33,77	15,47	62,32	61,34	626,52	49,43	4261,78	2255,49	787,06	785,41	53,2	-41,91
14	3 nœuds	50N	28,8	92,16	11,06	8,59	30,44	53,28	3,75	34,81	11,47	61,6	60,14	610,94	45,91	4231,19	2199,37	764,53	758,09	54,2	-31,22
13	3 nœuds	100N	24,67	92,14	10,18	10,76	33,13	57,82	4,08	38,02	6,84	58,89	56,9	597,81	41,93	4329,31	2152,11	741,16	723,17	56,91	-13,7
16	3 nœuds	100N	25,13	92,05	10,28	10,09	33,25	57,91	4,16	37,98	6,72	57,22	55,44	588,95	42,38	4314,92	2120,22	728,46	707,75	53,85	-17,25
21	2 nœuds	0N	27,04	92,18	9,24	8,47	26,07	47,68	3,19	30	20,21	71,71	70,69	682,34	52,22	4261,95	2456,41	873,61	897,66	65,39	-42,76
24	2 nœuds	0N	23,61	92,36	10,63	9,71	27,1	49,34	3,46	31,38	15,44	69,77	68,72	661,97	48,56	4236,40	2383,09	842,85	859,01	65,52	-30,94
22	2 nœuds	50N	24,54	92,53	12,06	13,1	28	50,92	3,9	33,14	9,42	68,37	67,57	646,25	42,84	4244,77	2326,50	818,06	826,37	71,14	-3,4
23	2 nœuds	50N	26,09	92,31	9,94	9,42	26,84	49,35	3,22	31,03	17,42	70,66	69,47	670,74	49,8	4257,01	2414,66	855,62	874,48	66,05	-34,33
19	2 nœuds	100N	21,56	92,23	10,46	16,73	27,06	50,43	3,48	31,57	9,55	71,2	70,2	671,45	41,75	4362,97	2457,42	869,39	886,43	82,18	21,74
20	2 nœuds	100N	23,95	92,45	11,09	12,54	28,28	51,62	3,78	32,94	10,75	68,68	67,45	651,83	44,09	4277,21	2346,60	825,31	833,97	70,53	-8,52

Analyse de la biomasse racinaire

- Comparaison de la biomasse racinaire de Kernza® et du froment

Annexe 20: Biomasse racinaire (g/m²) de Kernza® et du froment sur 90cm.

Echantillons	Modalité	Horizon	Biomasse racinaire de Kernza® (poids sec (g/m ²))	Biomasse racinaire du froment (g/m ²)
1	ligne	0-30	740,5	66,5
1	ligne	30-60	279,1	15
1	ligne	60-90	52,2	13
2	ligne	0-30	479,2	208,1
2	ligne	30-60	130,6	29,9
2	ligne	60-90	106,5	12,4
3	interligne	0-30	138,5	85
3	interligne	30-60	78,5	38,8
3	interligne	60-90	26,3	37,3
4	interligne	0-30	86,3	126,6
4	interligne	30-60	87	36,4
4	interligne	60-90	106,2	13,7

- Comparaison de la biomasse racinaire de Kernza® sous différentes fertilisations azotées

Annexe 21: Biomasse racinaire (poids sec (g/m²)) de Kernza® sous différentes fertilisations azotées.

Répétition	Modalité	Biomasse racinaire (poids sec (g/m ²))
R1	0N	367,8
R1	50N	516,5
R1	100N	424
R2	0N	568,4
R2	50N	874,1
R2	100N	520,9
R3	0N	480,8
R3	50N	1513,5*
R3	100N	477
R4	0N	604,1
R4	50N	664,4
R4	100N	632,5

*Donnée aberrante non prises en compte dans l'analyse statistique.