
Optimisation de la gestion de la fertilisation du kernza (Th. intermedium) : De la collecte de données à l'exploitation d'un modèle de culture

Auteur : Aubry, Pierre

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

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

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

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/13965>

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.

Optimisation de la gestion de la fertilisation du
kernza (*Th. intermedium*) : de la collecte de
données à l'exploitation d'un modèle de
culture.

AUBRY Pierre

TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE
L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER BIOINGENIEUR
EN SCIENCES AGRONOMIQUES

Année académique 2021-2022

Co-Promoteur : Dr. Dumont Benjamin
Co-Promotrice : Ir. Fagnant Laura

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

Le présent document n'engage que son auteur.

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

Optimisation de la gestion de la fertilisation du
kernza (*Th. intermedium*) : de la collecte de
données à l'exploitation d'un modèle de
culture.

AUBRY Pierre

TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE
L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER BIOINGENIEUR
EN SCIENCES AGRONOMIQUES

Année académique 2021-2022

Co-Promoteur : Dr. Dumont Benjamin
Co-Promotrice : Ir. Fagnant Laura

Remerciements

Tout d'abord, j'aimerais particulièrement remercier mon co-promoteur, Benjamin Dumont, pour son encadrement, sa disponibilité, ses précieux conseils et son enthousiasme concernant mon travail de fin d'étude.

Je tiens également à adresser un grand remerciement à Laura Fagnant, ma co-promotrice, pour son aide apportée au bureau comme sur le terrain, sa grande disponibilité, ses corrections et sa bonne humeur.

Ensuite, je voudrais remercier toute l'équipe de phytotechnie et de la ferme expérimentale de Gembloux Agro-Bio Tech pour leur accueil, leur aide précieuse et pour la bonne ambiance durant l'ensemble de ce travail.

Un tout grand merci à ma copine, Clémence Pirlot, pour son soutien sans faille, ses encouragements, ses conseils avisés et sa présence durant l'ensemble de mon master et plus particulièrement durant mon travail de fin d'études.

Enfin, je remercie profondément ma famille de m'avoir permis de réaliser mes études et de m'avoir toujours soutenu au cours de ces (trop) longues années. Merci particulièrement à ma maman pour le temps qu'elle a consacré à la relecture de ce travail.

Résumé

Les systèmes de productions actuels, plus particulièrement la production intensive de céréales annuelles, exercent des pressions sur l'environnement et menacent les capacités futures de production. Une solution envisagée est le développement de céréales pérennes qui permettraient de réduire l'érosion des sols et l'utilisation d'intrant et leur lixiviation. La meilleure candidate pour produire un blé pérenne est *Thinopyrum intermedium*, commercialisée sous le nom de Kernza® après des années de sélection visant à augmenter le rendement en grain. De plus, son utilisation originelle comme plante fourragère permet d'envisager une double finalité grain/fourrage au cours d'une même année de culture, en plus des services écosystémiques qu'elle apporte. La modélisation de cultures permet de comprendre les phénomènes physiologiques complexes de la plante, d'explorer de nouveaux itinéraires techniques ou encore d'évaluer la réponse de cette dernière aux changements climatiques. Ainsi, de nombreux modèles de culture tels que STICS ont été développés afin de simuler leur croissance et leur rendement dans des conditions variées. Le modèle STICS est largement utilisé et a déjà pu être adapté à de nombreuses cultures variées. Cependant, la modélisation du Kernza est peu étudiée et reste encore à développer. Ainsi, ce travail a pour objectifs de calibrer et de valider le modèle STICS pour le Kernza à l'aide d'observations de terrains et d'utiliser ensuite ce modèle afin de déterminer la fertilisation optimale de la culture permettant de maximiser son rendement en grain dans un contexte pédoclimatique wallon.

Tout d'abord, des prélèvements de biomasse souterraine ont été réalisés sur le terrain à trois stades de développement afin de compléter les bases de données existantes. De plus, les données de biomasse aérienne et souterraine ont été traitées et compilées afin d'être utilisables par STICS. Ensuite, STICS a été calibré et validé grâce à deux jeux de données indépendants et en considérant deux approches différentes, l'approche prairiale et l'approche céréale. Enfin, le modèle calibré et validé a été utilisé afin d'effectuer des simulations de fertilisation azotées et déterminer l'optimum de cette dernière. Les résultats des prélèvements de biomasse souterraine sont en accord avec la littérature et permettent de valider la méthodologie mise en œuvre. La calibration et la validation du modèle se sont révélés complexes à cause des limites de STICS concernant les simulations de LAI et de biomasse souterraine. Malgré une bonne simulation de la biomasse aérienne dans les deux approches, une meilleure performance du modèle générale est obtenue en considérant kernza comme une céréale annuelle. Enfin, le fractionnement de la fertilisation optimal de 75 kgN/ha au redressement et 25 kgN/ha à l'automne déterminée par la multi simulation est en accord avec les résultats de la littérature. Ces résultats ne sont cependant pour le moment valable que dans le contexte pour lequel le modèle a été calibré.

Le modèle STICS n'est pas, en l'état capable de simuler correctement tous les aspects phytotechniques et physiologiques de la plante mais sa prochaine version intégrant de nouveaux formalismes pour les organes souterrains semble prometteuse.

Abstract

Current production systems, especially intensive annual cereal production, are putting pressure on the environment and threatening the future production capacities. One solution to address this problem is the development of perennial grains that would reduce soil erosion and fertilizer leachings. The best candidate to produce a perennial wheat is *Thinopyrum intermedium*, commercialized under the name of Kernza® after years of selection to increase grain yield. In addition, its original use as a forage crop makes it possible to consider a dual purpose of grain and fodder during the the same cropping year, combined with the ecosystem services it provides. Crop modeling allows to understand the complex physiological phenomena of plants, to explore new technical itineraries or to evaluate the response toward climate change. Thus, many crop models such as STICS have been developed to simulate their growth and yield under varying conditions. The STICS crop model is widely used and has already been adapted to many different crops. However, the modeling of Kernza is still little studied and still needs to be developed. Thus, the objectives of this work are first to calibrate and validate the STICS model for Kernza using observations and second to use this model to determine the optimal fertilization rate of the crop maximizing its grain yield in a Walloon soil and climate conditions.

First, samples of underground biomass were taken in the field at three stages of development in order to complete the existing database. In addition, the above- and below-ground biomass data were processed and compiled to be used by STICS. Then, STICS was calibrated and validated with two independent data sets, considering two different approaches : the grassland approach and the cereal approach. Finally, the calibrated and validated model was used to perform simulations of nitrogen fertilization to determine the optimum. The results of the below ground biomass sampling are in agreement with the literature and allow to validate the implemented sampling methodology. The calibration and validation of the model proved to be complex because of the limitations of STICS concerning the LAI and bellow ground biomass simulations. Despite a good simulation of above-ground biomass in both approaches, a better performance of the general model is obtained by considering kernza as a cereal. Finally, the optimal fertilization splitting of 75 kgN/ha at the beginning of the stem elongation and 25 kgN/ha in autumn determined by multi-simulation is in agreement with the literature results. However, these results are for the moment only valid in the context for which the model has been calibrated.

The STICS model is not, in its current state, able to simulate correctly all the agronomic and physiological aspects of the plant but its next version integrating new formalisms for the underground organs seems promising.

Table des matières

Table des figures	VI
Table des tableaux	IX
1 Revue de la littérature	1
1.1 Introduction	1
1.2 Intérêts des cultures pérennes	2
1.3 <i>Th. intermedium</i> comme céréale pérenne	2
1.4 Potentiel de la modélisation en agronomie	3
1.5 Présentation du modèle STICS	4
1.6 Indice de nutrition azotée et optimisation de la fertilisation	5
1.7 Objectifs du travail	7
2 Matériels et méthodes	8
2.1 Sites expérimentaux	8
2.1.1 Itinéraires techniques essai K17	10
2.1.2 Itinéraires techniques essai K19	10
2.2 Caractérisation de la biomasse aérienne	11
2.3 Caractérisation de la biomasse souterraine	12
2.3.1 Modalités des prélèvements	12
2.3.2 Protocole de prélèvement de 0 à 15 cm de profondeur	13
2.3.3 Protocole de prélèvement de 0 à 90 cm de profondeur	13
2.3.4 Traitement des échantillons	13
2.3.5 Analyses statistiques	15
2.4 Modélisation	17
2.4.1 Construction de la base données	17
2.4.2 Création des fichiers utilisés par STICS à partir de la base de données	18
2.4.3 Exécution des simulations	19
2.4.4 Calibration et validation du modèle	19
2.4.5 Evaluation du modèle	21
2.4.6 Erreur quadratique moyenne	21
2.4.7 Efficacité de modélisation	21
2.4.8 Coefficient de détermination	21
2.4.9 Déviation normale	22
2.4.10 Paramètres optimisés en lien avec les processus simulés	22
2.4.11 Phénologie	22
2.4.12 Leaf Area Index	23
2.4.13 Efficacité de conversion	25
2.4.14 Elaboration du rendement	25
2.4.15 Bilan azoté	26
2.4.16 Croissance racinaire	26

2.5	Détermination de l'optimum de fertilisation grâce au modèle calibré	27
3	Résultats et Discussion	28
3.1	Caractérisation des organes souterrains de <i>Th. intermedium</i>	28
3.1.1	Essai K17	28
3.1.2	Essai K19	32
3.1.3	Discussion sur les résultats des biomasses de rhizomes des deux essais . .	33
3.1.4	Comparaison des deux essais	34
3.1.5	Analyse en profondeur de la biomasse racinaire pour deux cultures d'âges différents	36
3.2	Calibration et validation du modèle pour kernza	37
3.2.1	Résultats en considérant kernza comme une graminée prairiale pérenne .	37
3.2.2	Résultats en considérant kernza comme une céréale annuelle	44
3.2.3	Paramètres finaux	49
3.2.4	Discussion sur la modélisation	50
3.3	Optimisation de la fertilisation azotée	52
4	Conclusion et perspectives	57
A	Echelle BBCH pour les céréales	64

Table des figures

2.1	Vue aérienne des deux parcelles expérimentales dédiées à la culture de kernza au sein de la ferme expérimentale de Gembloux Agro-bio Tech. En rouge l'essai implanté en 2019 et en bleu celui implanté en 2017.	8
2.2	Tube de prélèvement en PVC avant enfoncement à 15cm à gauche. Echantillons prêts à être lavés à droite.	14
2.3	Echantillons secs de rhizomes et racines triés.	14
2.4	Capture d'écran de l'interface de l'application de statistiques <i>Rshiny</i> . En A se trouve la zone d'interaction et en B la zone de résultats.	16
2.5	Schéma d'organisation de la base de données	18
2.6	Exemples de graphes de LAI (à gauche, en m^2 feuilles/ m^2 sol en fonction du temps en jours) et matière sèche (à droite, en t/ha en fonction du temps en jours) créée par la fonction de visualisation pour K17, simulation considérant kernza comme une céréale pour la période 2019-2020 pour l'itinéraire technique sans fauche avec fractionnement de 50-0-0. En vert sont représentées les valeurs journalières de la variable considérée. Les losanges orange vides représentent les valeurs observées de la variable et les losanges bruns la moyenne de ces observations. Les traits pointillés renseignent les dates simulées des stades BBCH30, BBCH65 et BBCH89.	20
3.1	Evolution de la biomasse racinaire sèche en fonction du stade de développement de l'essai K17. Les lettres correspondent aux résultats du test SNK.	29
3.2	Evolution, pour l'essai K17, de la teneur en carbone de la biomasse racinaire sèche en fonction du stade de développement (graphique de gauche) et évolution de la quantité totale de carbone racinaire en fonction des stades de développement (graphique de droite). Les lettres correspondent aux résultats des tests SNK.	30
3.3	Evolution de la quantité d'azote (kgN/ha) présente dans les racines de l'essai K17 en fonction de la fertilisation. Les lettres correspondent aux résultats du test SNK.	30
3.4	Evolution de la teneur en azote de la biomasse racinaire sèche de l'essai K17 en fonction du stade de développement et de la fertilisation. Les lettres noires correspondent aux résultats des tests SNK pour le facteur <i>stade de développement</i> . Les lettres rouges correspondent aux résultats du test SNK pour le facteur <i>fertilisation</i>	31
3.5	Evolution de la teneur en azote de la biomasse sèche des rhizomes de l'essai K17 en fonction du stade de développement (graphique de gauche) et de la fertilisation (graphique de droite). Les lettres correspondent aux résultats des tests SNK.	31
3.6	Evolution de la biomasse sèche racinaire de l'essai K19 en fonction du stade de développement (graphique de gauche) et évolution de la quantité totale de carbone racinaire en fonction des stades de développement (graphique de droite). Les lettres correspondent aux résultats des tests SNK.	33

3.7	Comparaison des biomasses sèches de racines entre modalités des essais K17 (4 ans) et K19 (2ans) similaires. Les lettres correspondent aux résultats du test SNK.	34
3.8	Comparaison des biomasses sèches des rhizomes entre modalités des essais K17 (4 ans) et K19 (2 ans) similaires. Les lettres correspondent aux résultats du test SNK.	35
3.9	Biomasse racinaire (t/ha) en fonction de la profondeur de prélèvement (cm) pour les modalités similaires des essais K17 et K19 confondus. Les lettres correspondent aux résultats du test SNK.	36
3.10	Occurrence des stades phénologiques BBCH30, BBCH65 et BBCH89 dans les simulations par rapport à leur occurrence réelle en jours juliens depuis la dernière récolte pour le set de calibration à gauche et le set de validation à droite. L'année 2018 est représentée en vert •, 2019 en orange •, 2020 en mauve • et 2021 en rose •. La droite noire représente l'équation $x=y$.	38
3.11	Différence d'occurrence des stades phénologiques BBCH30, BBCH65 et BBCH89 dans les simulations par rapport à leur occurrence réelle en jours juliens depuis le début de l'année de la simulation. La droite noire représente le 0. Les deux droites pointillées représentent 7 et -7 jours.	38
3.12	LAI simulé en fonction du LAI observé Pour le set de calibration (figure de gauche) et le set de validation (figure de droite). L'année 2020 est représentée en mauve • et 2021 en rose •. La droite noire représente l'équation $x=y$ et la droite discontinue rouge représente la droite de régressions des valeurs.	39
3.13	Matière sèche simulée en fonction des valeurs observées pour le set de calibration (à gauche) et de validation (à droite). L'année 2018 est représentée en vert •, 2019 en orange •, 2020 en mauve • et 2021 en rose •. La droite noire représente l'équation $x=y$ et la droite discontinue rouge représente la droite de régressions des valeurs.	40
3.14	Quantité d'azote dans la plante simulée en fonction des valeurs observées en kgN/ha. L'année 2019 est représentée en orange •, 2020 en mauve • et 2021 en rose •. La droite noire représente l'équation $x=y$ et la droite discontinue rouge représente la droite de régressions des valeurs.	41
3.15	Rendements grain simulés en fonction des valeurs observées pour le set de calibration (à gauche) et le set de validation (à droite). L'année 2018 est représentée en vert •, 2019 en orange • et 2020 en mauve •. La droite noire représente l'équation $x=y$ et la droite discontinue rouge représente la droite de régressions des valeurs.	42
3.16	Biomasse racinaire simulée en fonction de l'observée en t/ha. L'année 2021 est représentée en rose •. La droite noire représente l'équation $x=y$ et la droite discontinue rouge représente la droite de régressions des valeurs.	43
3.17	Occurrence des stades phénologiques BBCH30, BBCH65 et BBCH89 dans les simulations par rapport à leur occurrence réelle en jours juliens depuis la dernière récolte. Les années 2017-2018 sont représentées en vert •, 2018-2019 en orange •, 2019-2020 en mauve • et 2020-2021 en rose •. La droite noire représente l'équation $x=y$.	44
3.18	LAI simulé en fonction du LAI observé pour le set de calibration (à gauche) et le set de validation (à droite). Les années 2019-2020 sont représentées en mauve • et 2020-2021 en rose •. La droite noire représente l'équation $x=y$ et la droite discontinue rouge représente la droite de régressions des valeurs.	45

3.19	Matière sèche simulée en fonction des valeurs observées en t/ha pour le set de calibration (à gauche) et le set de validation (à droite). Les années 2017-2018 sont représentées en vert •, 2018-2019 en orange •, 2019-2020 en mauve • et 2020-2021 en rose •. La droite noire représente l'équation $x=y$ et la droite discontinue rouge représente la droite de régressions des valeurs.	46
3.20	Rendement grains simulé en fonction des valeurs observées (t/ha). Les années 2017-2018 sont représentées en vert •, 2018-2019 en orange • et 2019-2020 en mauve •. La droite noire représente l'équation $x=y$ et la droite discontinue rouge représente la droite de régressions des valeurs.	47
3.21	Quantité d'azote dans la plante simulé en fonction des valeurs observées (kgN/ha). Les années 2018-2019 sont représentées en orange •, 2019-2020 en mauve • et 2020-2021 en rose •. La droite noire représente l'équation $x=y$ et la droite discontinue rouge représente la droite de régressions des valeurs.	48
3.22	Biomasse racinaire de la plante simulée en fonction des valeurs observées (t/ha). Les années 2020-2021 sont représentées en rose •. La droite noire représente l'équation $x=y$ et la droite discontinue rouge représente la droite de régressions des valeurs.	49
3.23	Boxplot des rendements en grains obtenus pour chaque itinéraire technique sur 23 années de simulation.	54
3.24	Valeurs de skewness des distributions pour chaque itinéraire technique. Un gradient de couleur allant du jaune (0 kgN/ha) au rouge (300 kgN/ha) représente la quantité totale de fertilisant apportée pour chaque itinéraire technique.	55
3.25	Distribution de probabilité du rendement en grain pour un fractionnement de 75-0-25 kgN/ha. La ligne verticale bleue illustre la moyenne des données, égale à 1,026 t/ha.	56

Table des tableaux

2.1	Modalités de fertilisations azotées et de fauches appliquées à l'essai K17. Les cellules grisées indiquent les changements ayant eu lieu dans les itinéraires techniques.	10
2.2	Modalités d'implantation (date de semis et interligne) appliquées à l'essai K19	10
2.3	Tableau présentant les dates de prélèvements et les variables étudiées pour chaque essai.	12
2.4	Modalités de prélèvement de biomasse souterraine pour les essais K17 et K19.	13
2.5	Tableau reprenant les valeurs de départ des paramètres utilisés pour simuler la phénologie, la variable sur laquelle ils ont une incidence (voir équation 2.5) et leur signification.	23
2.6	Tableau reprenant les valeurs de départ des paramètres optimisés pour simuler le LAI, leur signification et les variables pour lesquelles ils interviennent. *SBV-MAX est l'expansion maximale des feuilles par unité de biomasse accumulée (il est calculé selon l'équation 2.9)	24
2.7	Tableau reprenant les valeurs de départ des coefficients d'efficience d'utilisation maximale du rayonnement à différents stades phénologiques de développement de la plante.	25
2.8	Tableau reprenant les valeurs de départ ainsi que la signification des paramètres optimisés pour simuler la production de grain par kernza <i>céréale</i> .	26
2.9	Tableau reprenant les valeurs de départ des paramètres utilisés par STICS pour calculer l'indice de nutrition azoté.	26
3.1	Résultats des différentes ANOVA sur les différents paramètres étudiés de la biomasse souterraine de l'essai K17.	28
3.2	Valeurs moyennes de la biomasse sèche, de la teneur en carbone et de la quantité de carbone et azote dans les rhizomes de l'essai K17.	32
3.3	Résultats des différentes ANOVA sur les différents paramètres étudiés de la biomasse souterraine de l'essai K19.	32
3.4	Valeurs moyennes de la biomasse sèche, de la teneur en carbone et azote et de la quantité de carbone et azote dans les rhizomes de l'essai K19.	33
3.5	Résultats des différentes ANOVA sur les différents paramètres étudiés de la biomasse souterraine pour comparer les essais K17 et K19.	34
3.6	Résultats des différentes ANOVA sur les différents paramètres étudiés de la biomasse souterraine pour comparer les essais K17 et K19.	36
3.7	Critères statistiques pour l'évaluation de la simulation de la phénologie par le modèle, les cellules grisées indiquent les critères rencontrant les niveaux d'acceptabilité.	37
3.8	Critères statistiques pour l'évaluation de la simulation de la variable LAI par le modèle, les cellules grisées indiquent les critères rencontrant les niveaux d'acceptabilité.	39

3.9	Critères statistiques pour l'évaluation de la simulation de la variable matière sèche par le modèle, les cellules grisées indiquent les critères rencontrant les niveaux d'acceptabilité.	40
3.10	Critères statistiques pour l'évaluation de la simulation de la variable QNplante par le modèle, les cellules grisées indiquent les critères rencontrant les niveaux d'acceptabilité.	41
3.11	Critères statistiques pour l'évaluation de la simulation de la variable mafruit par le modèle, les cellules grisées indiquent les critères rencontrant les niveaux d'acceptabilité.	42
3.12	Critères statistiques pour l'évaluation de la simulation de la variable QNplante par le modèle, les cellules grisées indiquent les critères rencontrant les niveaux d'acceptabilité.	43
3.13	Critères statistiques pour l'évaluation de la simulation de la phénologie par le modèle, les cellules grisées indiquent les critères rencontrant les niveaux d'acceptabilité.	44
3.14	Critères statistiques pour l'évaluation de la simulation de la variable LAI par le modèle, les cellules grisées indiquent les critères rencontrant les niveaux d'acceptabilité.	45
3.15	Critères statistiques pour l'évaluation de la simulation de la matière sèche par le modèle, les cellules grisées indiquent les critères rencontrant les niveaux d'acceptabilité.	46
3.16	Critères statistiques pour l'évaluation de la simulation de la variable mafruit par le modèle, les cellules grisées indiquent les critères rencontrant les niveaux d'acceptabilité.	47
3.17	Critères statistiques pour l'évaluation de la simulation de la variable QNplante par le modèle, les cellules grisées indiquent les critères rencontrant les niveaux d'acceptabilité.	48
3.18	Critères statistiques pour l'évaluation de la simulation de la biomasse racinaire (variable <i>msrac</i>) par le modèle, les cellules grisées indiquent les critères rencontrant les niveaux d'acceptabilité.	49
3.19	Tableau reprenant les valeurs finales des paramètres qui ont été optimisés pour simuler kernza <i>céréale</i> et kernza <i>prairie</i> . Les cellules grisées indiquent des valeurs de paramètres différentes.	50
A.1	Échelle BBCH, stades principaux et secondaires, pour les céréales (Witzenberger et al. 1989; Lancashire et al. 1991)	65
A.2	Suite et fin de l'échelle BBCH, stades principaux et secondaires, pour les céréales (Witzenberger et al. 1989; Lancashire et al. 1991)	66

Chapitre 1

Revue de la littérature

1.1 Introduction

Après avoir relevé le défi d’atteindre l’autonomie alimentaire en Europe après la seconde guerre mondiale, le modèle de production agricole arrive à ses limites. Les pressions exercées sur l’environnement pour garantir des rendements agricoles élevés menacent les capacités futures à produire une alimentation riche, variée et accessible. La production intensive de céréales annuelles, principale source alimentaire d’hydrates de carbone sur tous les continents (AWIKA 2011) est en partie responsable de ces pressions. La mécanisation toujours plus importante de la production menace les sols et utilise de plus en plus d’intrants. Les fertilisants utilisés en trop grandes quantités impactent la qualité des eaux et reposent sur l’utilisation de grandes quantités d’énergies fossiles pour leur production.

De nombreuses solutions sont envisagées pour rendre l’agriculture moins impactante pour l’environnement. L’utilisation de couverts permanents est un bon exemple de pratique vertueuse tout comme le développement de techniques limitant le travail du sol. Au carrefour de ces pratiques se dessine une voie prometteuse : le développement de céréales pérennes. Grâce à leur système racinaire développé et leur longévité, ces cultures ont l’avantage de réduire les besoins en travail du sol tout en fournissant des services écosystémiques et des produits agricoles variés (Y. ZHANG et al. 2011). Des programmes de sélection et d’amélioration ont ainsi débuté dans le but de produire des versions pérennes de céréales annuelles comme le blé, le seigle ou le riz (PIMENTEL, CERASALE et al. 2012).

Cette démarche de sélection est récente comparée aux millénaires d’améliorations génétiques qu’ont connus les céréales annuelles sur tous les continents. Mais elle progresse rapidement grâce aux progrès modernes de la génétique (BAJGAIN et al. 2020) et des sciences informatiques. Celles-ci ont par exemple permis d’augmenter la vitesse d’acquisition des connaissances en facilitant le traitement d’un grand nombre de données. L’augmentation de la puissance de calcul des processeurs a aussi permis de créer des modélisations informatiques de cultures de plus en plus complexes et performantes. S’appuyer sur ces jumeaux numériques permet d’augmenter la vitesse d’acquisition de connaissances sur les cultures pour en anticiper les performances ou concevoir des itinéraires techniques et des variétés.

Ce travail s’intéresse à la modélisation du kernza (*Th. intermedium*), une graminée pérenne proche du blé dont la culture est étudiée à l’échelle européenne dans cadre du projet NAPER-DIV. La calibration du modèle sera effectuée à l’aide d’observations de terrain d’organes aériens et souterrains. Le modèle calibré et validé sera finalement utilisé pour déterminer la fertilisa-

tion optimale de la culture permettant de maximiser son rendement en grains pour un contexte pédoclimatique wallon.

1.2 Intérêts des cultures pérennes

Malgré de légers progrès réalisés ces dernières années pour rendre l'agriculture plus durable, des problèmes importants subsistent pour contrecarrer la perte et la dégradation des sols, la lixiviation des engrais apportés en trop grande quantité et les problèmes liés à la disponibilité en eau qui est amenée à se détériorer dans le futur. Une des pistes pour amener l'agriculture vers un nouveau paradigme est l'utilisation de cultures pérennes à la place de certaines cultures annuelles (GLOVER et al. 2010). Ces cultures pérennes permettent notamment de protéger les sols en offrant un couvert permanent et un travail du sol réduit (PIMENTEL, CERASALE et al. 2012). Cette réduction du travail du sol offre de nettes améliorations en terme d'efficacité énergétique du système de production. La densité du système racinaire de ces cultures permet de plus d'augmenter significativement les teneurs en matières organiques des sols (PIMENTEL, HEPPERLY et al. 2005 ; GLOVER et REGANOLD 2010) ainsi qu'une meilleure utilisation des engrais et une plus grande résistance à la sécheresse (RANDALL et MULLA 2001 ; GLOVER et al. 2010 ; CULMAN et al. 2013). Ces nombreux atouts ont mené au lancement de différents programmes de sélection visant à développer des pendans pérennes de céréales annuelles répandues tel que le riz, le blé ou encore le seigle (PIMENTEL, CERASALE et al. 2012).

1.3 *Th. intermedium* comme céréale pérenne

La graminée qui a été identifiée comme meilleure candidate pour créer un blé vivace est *Th. intermedium* (Host) Barkworth D.R. Dewey. Cette graminée pérenne est en effet phylogénétiquement liée au genre *Triticum* et peut s'hybrider avec lui, promettant ainsi un progrès génétique intéressant (GUO et al. 2016). Originaires des steppes eurasiatiques, l'agropyre intermédiaire est une *Poaceae* rhizomateuse importée dans les années 30 sur le continent nord américain comme plante fourragère permettant de valoriser certaines zones marginales (JENSEN et al. 2016 ; SMITH et al. 2014 ; BAJGAIN et al. 2020). La taille importante de ses grains, sa bonne qualité fourragère ainsi que sa production de biomasse importante en ont fait la candidate parfaite pour une domestication en vue de produire une céréale pérenne (BAJGAIN et al. 2020).

Le développement de variétés d'agropyres favorisant un rendement en grain élevé plutôt qu'une production de biomasse fourragère est effectué depuis 2001 principalement par The Land Institute (Salina, Kansas, Etats-Unis) qui a déposé le nom commercial de kernza[®] afin de désigner les variétés à graines de *Th. intermedium*. Après de nombreux cycles de sélection, la première variété commerciale de kernza a été mise sur le marché sous le nom de MN-clearwater en 2019 (BAJGAIN et al. 2020). Cette variété a démontré un rendement moyen de 696 kg/ha dans le Minnesota, soit une augmentation de 145% depuis la première génération sélectionnée (BAJGAIN et al. 2020 ; DEHAAN et al. 2018). Ce gain considérable en un temps réduit ne permet cependant pas encore au kernza de se hisser à la hauteur du froment cultivé dans un contexte similaire (CULMAN et al. 2013, production du froment au moins trois fois plus élevée). Le rendement en grains de kernza est de plus variable au cours des saisons de cultures, avec une tendance à la diminution (BAJGAIN et al. 2020). Cette diminution n'est cependant pas linéaire et X. ZHANG et al. 2016, CULMAN et al. 2013 et J. M. JUNGERS et al. 2017 ont constaté une production supérieure de biomasse et de grains la seconde année de culture avant qu'une baisse constante ne s'installe.

La production de grains n'est pas le seul intérêt du kernza. Son utilisation originelle comme plante fourragère permet d'envisager une double finalité grain/fourrage au cours d'une même année sans impact sur le rendement en grains (PUGLIESE, CULMAN et SPRUNGER 2019, PUGLIESE 2017). Cette double utilisation a même un impact positif sur la biomasse racinaire, ce qui renforce son intérêt pour fournir des services écosystémiques au niveau du sol (PUGLIESE 2017).

Contrairement aux graminées annuelles qui adoptent une stratégie d'acquisition des ressources rapide, les graminées pérennes ont une stratégie de conservation de ressources (ROUMET, URCELAY et DÍAZ 2006). SPRUNGER et al. 2018 ont ainsi montré que kernza allouait entre 23% et 50% de sa biomasse dans ses racines contre seulement 10% pour une graminée annuelle. Le stockage de réserves se fait sous la forme d'hydrates de carbone solubles (oligosaccharides et amidon) dans les racines ainsi que les rhizomes. Ces deux organes participent ainsi activement à la pérennité de la plante (SAKIROGLU et al. 2020) en permettant sa repousse via la mobilisation de ces réserves.

kernza a donc le potentiel d'être une plante à triple finalité grain : fourrage et services écosystémiques.

1.4 Potentiel de la modélisation en agronomie

L'application de la modélisation mathématique aux cultures remonterait aux travaux de *de Wit* et *van Bavel* dans les années 40 à 50 (JONES et al. 2017). La discipline a depuis bénéficié des nombreuses avancées dans les domaines informatiques et son utilisation a été élargie à de nouveaux champs d'application.

Ses bénéfices sont en effet nombreux. La représentation des interactions sol-cultures-atmosphère sous forme d'équations peut permettre de comprendre des phénomènes physiologiques complexes à étudier expérimentalement, de mesurer des variables inaccessibles, d'explorer de nouveaux itinéraires techniques ou encore d'évaluer la réponse d'une culture au changement climatique à un coût moindre par rapport à une démarche expérimentale classique (SILVA et GILLER 2020).

Cependant, la modélisation n'est pas détachée de la réalité et doit être considérée comme un outil complémentaire à l'expérimentation classique. Cet outil a démontré des limites mais aussi des résultats importants (SELIGMAN 1990). Tout modèle doit en effet subir un processus de calibration et de validation avec des données expérimentales afin de s'assurer que les valeurs des paramètres fournis permettent de simuler des processus réels avec un certain niveau d'exactitude (WALLACH, PALOSUO et al. 2021). La calibration va donc consister en la détermination des paramètres du modèle qui permettent d'obtenir des résultats les plus proches possible de la réalité. L'évaluation de la qualité de la modélisation s'effectue ensuite par le calcul de critères statistiques permettant de juger de la qualité des prédictions du modèle vis-à-vis des observations réelles (WALLACH, MAKOWSKI et al. 2006). Le processus de validation vise ensuite à confronter le modèle à de nouvelles observations indépendantes de celles utilisées pour la calibration afin d'évaluer la qualité prédictive du modèle et éviter les phénomènes de sur ajustement aux données de calibration.

Plusieurs types de modèles de culture peuvent être distingués selon leurs objectifs (WALLACH, MAKOWSKI et al. 2006). JONES et al. 2017 distinguent ainsi deux objectifs dans le dévelop-

pement de modèles, d'une part la compréhension scientifique de phénomènes et d'autre part l'aide à la décision. Ces deux approches peuvent s'appliquer à des échelles différentes, de l'organe d'une plante à une culture de plusieurs hectares ou encore de la ferme au territoire d'un pays.

Différentes méthodologies sont également retrouvées pour la construction de modèles. Il faut ainsi distinguer les modèles empiriques des modèles mécanistes. Les premiers mettent en relation des variables explicatives au sein de fonctions (WALLACH, MAKOWSKI et al. 2006). Les modèles mécanistes sont quant à eux basés sur une série d'équations qui modélisent des phénomènes en interaction ; ils sont en général plus complexes. Cette distinction est cependant à considérer avec prudence étant donné que la plupart des modèles de cultures sont des imbrications de différents sous modèles qui peuvent être de plusieurs types (JAME et CUTFORTH 1996). Malgré un développement important ces dernières années, les modèles de cultures n'intègrent pas encore de façon satisfaisante l'impact des bioagresseurs sur les cultures et sont majoritairement cantonnés à l'échelle du champ ou de la rotation (SILVA et GILLER 2020).

Etant donné l'importance des céréales dans le système agricole mondial, de nombreux modèles ont été développés pour simuler leur croissance et évaluer les facteurs limitants de la culture et ainsi augmenter les rendements. Cette approche modèle a aussi été utilisée dans le cas des graminées prairiales et de la production de fourrage. Des modèles existent par exemple pour simuler la croissance et le développement de *Phleum pratense*, une graminée fourragère pérenne faisant partie du même groupe fonctionnel que kernza (DUCHENE, DUMONT et al. 2021) selon la classification par traits fonctionnels proposée par CRUZ et al. 2010.

Concernant kernza en tant que telle, très peu d'approches de modélisation ont été réalisées pour le moment. J. JUNGERS et al. 2018 ont par exemple adopté une approche empirique pour établir les relations entre l'accumulation de degrés jours et des traits morphologiques ou le partitionnement de la biomasse aérienne dans les différents organes de la plante. DUCHENE, DUMONT et al. 2021 ont utilisé une approche modèle mécaniste afin de déterminer quels paramètres environnementaux dirigeaient le développement phénologique de kernza.

L'utilisation de la modélisation pour comprendre et aider au développement des connaissances agronomiques de kernza est donc encore à développer.

1.5 Présentation du modèle STICS

STICS est l'acronyme de Simulateur mulTI disciplinaire pour les Cultures Standards (BRISSON, GARY et al. 2003). Le développement de ce modèle a débuté en 1996 à l'INRAE (Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement) et en est à sa neuvième version.

STICS est un modèle mécaniste non spatialisé qui simule la croissance journalière d'une culture en interaction avec le sol, l'atmosphère et les pratiques culturales (BRISSON, LAUNAY et al. 2009). Il fournit les valeurs journalières de nombreuses variables caractérisant la culture mais aussi de son environnement. La force de STICS est d'avoir pu être adapté à de nombreuses cultures très différentes comme la vigne (GARCIA DE CORTAZAR-ATAURI 2006), le lin (FLÉNET, VILLON et RUGET 2004), le miscanthus STRULLU et al. 2014) le froment, la betterave, le maïs, le soja ou encore certaines graminées fourragères (BRISSON, GARY et al. 2003).

STICS est organisé par modules qui intègrent des formalismes issus de divers autres modèles (BRISSE, GARY et al. 2003). Les différents modules de STICS sont en interaction et simulent (BRISSE, LAUNAY et al. 2009) :

- La phénologie
- Le développement de la biomasse aérienne
- Le développement de la biomasse souterraine
- L'élaboration du rendement
- Le micro climat
- L'itinéraire cultural et l'environnement
- La balance hydrique
- Le cycle de l'azote
- Les transferts de chaleur, eau et nitrates

Les modules utilisés durant ce travail ainsi qu'une explication succincte de leur fonctionnement seront détaillés dans la partie 2.4.10. L'explication détaillée du fonctionnement de STICS peut être trouvée dans l'ouvrage de BRISSE, LAUNAY et al. 2009.

1.6 Indice de nutrition azotée et optimisation de la fertilisation

L'azote est un élément essentiel à la productivité des céréales comme le blé (GATE 1995). Le développement de son utilisation en quantités toujours plus importantes pose cependant de nombreux problèmes économiques et environnementaux. Le coût de ces engrais, couplé à celui du gaz naturel qui sert à leur fabrication industrielle, est en effet un facteur qui pèse de plus en plus sur les coûts de revient des productions agricoles (HUANG 2007). De plus, une partie de la fertilisation appliquée est souvent perdue par lixiviation, polluant alors les ressources en eau dont le traitement a un coût non négligeable pour la société (DINNES et al. 2002). kernza permet, grâce à son système racinaire profond, une meilleure rétention des nitrates que le blé, limitant les pertes et augmentant l'efficacité de leur utilisation par la culture (SPRUNGER et al. 2018).

La détermination de la dose optimale d’engrais azoté à appliquer à une culture est donc fondamentale pour maximiser les rendements et minimiser les coûts de production tout en préservant l’environnement. Afin de pouvoir quantifier le statut de nutrition azoté d’une culture, LEMAIRE 1997 établit l’indice de nutrition azoté (INN). Cet indice est le rapport entre la concentration en azote d’une plante et sa concentration en azote critique. Cette teneur critique est la teneur minimale que doit contenir la plante pour maximiser la production de biomasse aérienne. Le calcul de la teneur critique en azote pour une biomasse donnée s’effectue avec l’équation 1.1. Le statut nutritionnel d’une plante pourra donc être déterminé en comparant sa teneur en azote à une biomasse donnée par rapport à la valeur critique associée à l’espèce. Une valeur supérieure à 1 indiquera que la plante est correctement voire trop fertilisée alors qu’une valeur inférieure indiquera un déficit en azote.

$$N = aW^{-b} \quad (1.1)$$

Avec :

- N , la concentration en azote (en % de la biomasse aérienne)
- a , la concentration en azote pour 1 t/ha de biomasse
- W , la biomasse aérienne sèche (en t/ha)
- b , le coefficient de dilution décrivant la diminution de la teneur en azote en fonction de l’augmentation de la biomasse aérienne.

Des modèles de cultures peuvent permettre de fournir des supports d’aide à la décision et tenter d’optimiser les apports en fertilisation. Ceux-ci ont en effet l’avantage de pouvoir explorer de nombreux scénarios à un coût très faible. Des approches spatialisées et stratégiques peuvent par exemple être mises en oeuvre pour tenter d’anticiper les besoins en fonction des facteurs environnementaux et ainsi d’optimiser les apports (BASSO et al. 2011). D’autres approches, plus statistiques, vont permettre d’utiliser de très grandes quantités de simulations pour tenter de déterminer la fertilisation qui, quelle que soit l’année, maximise les probabilités de rendements élevés (DUMONT et al. 2013).

1.7 Objectifs du travail

Les objectifs de ce travail ont donc été de :

- Prélever et analyser les organes souterrains de kernza afin de compléter les données de biomasse aérienne utilisées pour la calibration du modèle.
- Paramétrer, calibrer et valider le modèle STICS pour simuler la croissance et le développement du kernza dans un contexte wallon.
- Utiliser le modèle STICS pour établir une recommandation de fractionnement d'apport d'engrais azoté pour maximiser le rendement en grains de kernza.

Chapitre 2

Matériels et méthodes

2.1 Sites expérimentaux

Les données utilisées pour la calibration du modèle et les prélèvements additionnels de biomasse souterraine proviennent de deux essais présents sur les parcelles de la ferme expérimentale de la faculté de Gembloux Agro-bio Tech (50°33'58,9"N, 4°42'22,7"E). Ces deux essais ont pour objectif d'explorer différents aspects phytotechniques relatifs à la culture de *Th. intermedium*.

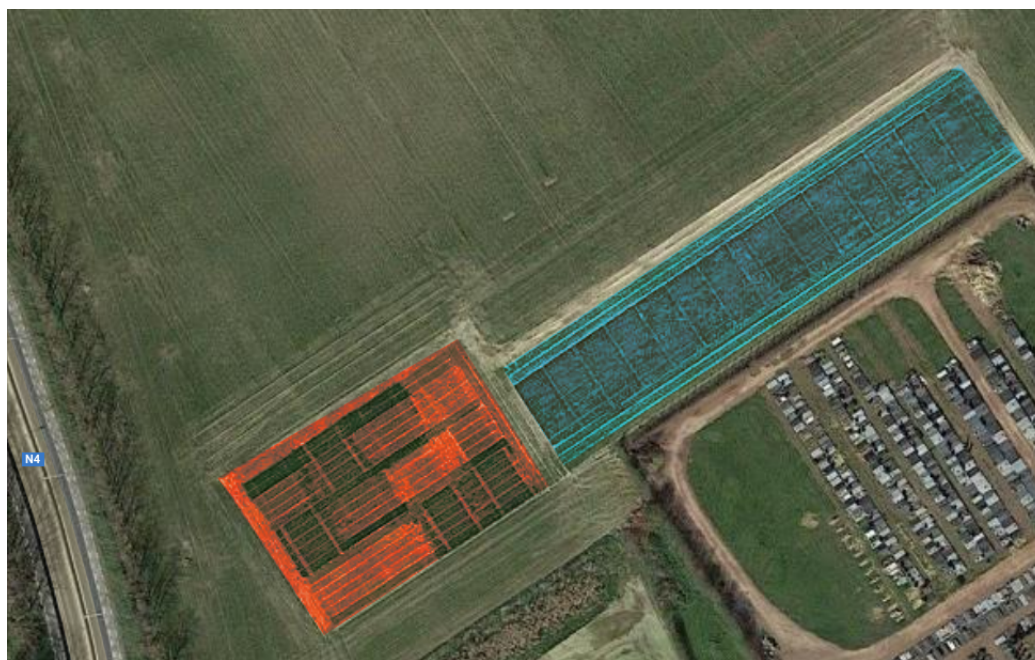


FIGURE 2.1 – Vue aérienne des deux parcelles expérimentales dédiées à la culture de kernza au sein de la ferme expérimentale de Gembloux Agro-bio Tech. En rouge l'essai implanté en 2019 et en bleu celui implanté en 2017.

L'essai implanté en 2017 (K17) vise à étudier le comportement de la culture sous différentes modalités de fertilisation azotée et de fauche (Figure 2.1). L'essai implanté en 2019 (K19) s'intéresse quant à lui à différents modes d'implantation de la culture en étudiant la date de semis et l'écartement entre les lignes de semis (Figure 2.1). Les différentes modalités testées dans les essais sont reprises dans les tableaux 2.1 et 2.2.

L'échelle BBCH pour les céréales a été utilisée pour caractériser les stades de développement de la plante, sa description complète peut être trouvée en Annexe A. Quatre stades seront principalement mentionnés et étudiés étant donné leur importance :

- Redressement ou début de montaison (BBCH30)
- Dernière feuille (BBCH39)
- Floraison (BBCH65)
- Maturité physiologique des grains ou récolte (BBCH89)

L'échelle BBCH pour les céréales possède un stade BBCH97 correspondant à la mortalité de la plante. Dans le cas de kernza et étant donné sa pérennité, ce stade n'est pas pertinent et il sera fait référence à un *stade végétatif d'automne* pour désigner le stade de la plante à l'automne.

Les deux dispositifs expérimentaux sont composés de micro-parcelles rectangulaires de 14m² distribuées aléatoirement avec 4 répétitions (split-plot). Chaque micro-parcelle est doublée afin de disposer d'une parcelle permettant la caractérisation du rendement en grains à la maturité physiologique de la plante et d'une autre dédiée aux prélèvements destructifs permettant de caractériser le développement et la croissance de la plante.

2.1.1 Itinéraires techniques essai K17

L'essai K17 a été implanté en septembre 2017 avec une dose de semis de 20kg/ha (poids de milles grains 8,05g) et un interligne de 25 cm. Le tableau 2.1 reprend les différentes modalités de fauche et de fertilisation azotée avec les numéros d'identification correspondants. Concernant les modalités de fertilisation, des modifications ont eu lieu au cours de l'expérience. Tout d'abord, la fraction apportée au stade dernière feuille (BBCH39) ne l'a été ce stade qu'en 2020-2021, elle était auparavant apportée au stade floraison (BBCH65). Concernant les fractions d'azote apportées, deux modalités ont subi des aménagements. La modalité 50-50-50 recevait avant 2019 un fractionnement de 0-100-50 kgN/ha. La modalité 100-50-0 recevait quant à elle un fractionnement de 100-0-50 kgN/ha avant 2019. Les modalités ayant subi des changements sont grisées dans le tableau 2.1.

Facteur 1 : Régime de fauche	Facteur 2 : Fertilisation azotée (kgN/ha)			
	<u>BBCH30</u>	<u>BBCH39</u>	<u>Automne</u>	<u>Modalités</u>
Pas de fauche (Modalités 1 à 7)	0	0	0	1 et 8
	50	0	0	2 et 9
	50	0	50	3 et 10
	100	0	0	4 et 11
	100	50	0	5 et 12
Fauche d'automne (Modalités 8 à 14)	0	100	0	6 et 13
	50	50	50	7 et 14

TABLE 2.1 – Modalités de fertilisations azotées et de fauches appliquées à l'essai K17. Les cellules grisées indiquent les changements ayant eu lieu dans les itinéraires techniques.

2.1.2 Itinéraires techniques essai K19

Cet essai a été implanté en 2019 à différentes dates (voir tableau 2.2), avec une densité de 20 kg de semence par hectare (poids de milles grains $\pm 8g$). Les parcelles ont toutes été fertilisées de la même manière avec trois fractions de 50 kgN/ha apportés au redressement (BBCH30), à la dernière feuille (BBCH39) et au stade végétatif en automne. Une fauche d'automne a été pratiquée lorsque la biomasse était suffisante à ce stade, c'est à dire en 2019 et 2020.

Facteur 1 : Date de semis	Facteur 2 : Largeur interligne	n° Modalité
Mai 15-05-19	12,5 cm	1
	25 cm	2
Août 23-08-19	12,5 cm	3
	25 cm	4
Octobre 03-10-19	12,5 cm	5
	25 cm	6

TABLE 2.2 – Modalités d'implantation (date de semis et interligne) appliquées à l'essai K19

2.2 Caractérisation de la biomasse aérienne

Des récoltes de données ont été réalisées durant 4 années (2018-2021) pour l'essai K17 et 2 années (2020-2021) pour l'essai K19. Ces récoltes concernent la biomasse aérienne aux 4 différents stades de développement d'importance de la culture mentionnés précédemment, à savoir le stade redressement (BBCH30), dernière feuille (BBCH39), floraison (BBCH65) et maturité physiologique (BBCH89). De ces récoltes de biomasse ont été mesurés la biomasse sèche, le LAI (Leaf Area Index), le rendement grains et les teneurs en azote de la plante qui seront utilisés pour la calibration et la validation du modèle.

La biomasse a été récoltée par la fauche des plantes à 5 cm du sol dans un quadra de 50 cm de côté. Aux stades floraison et maturité physiologique, les épis ont été séparés du reste de la biomasse aérienne. En 2020 et 2021, les feuilles ont également été séparées des tiges pour tous les stades d'intérêt. Les échantillons ont été pesés pour obtenir les poids frais puis séchés à l'étuve durant 72h à 60°C afin d'obtenir les poids secs. Les échantillons secs ont ensuite subi des analyses de teneur en carbone et en azote par la méthode de Dumas (DUMAS 1831).

Le LAI a été mesuré pour une seule répétition des modalités 1 à 5 de l'essai K17 et 1 à 4 de l'essai K19 pour les années 2020 et 2021 (tableau 2.1 et tableau 2.2). Les plantes ont été prélevées sur un quadra de 25x50 cm de côtés par fauche à 5 cm du sol. Les feuilles ont ensuite été séparées puis pesées avant d'être étalées pour mesurer leur surface verte en pixels grâce à un programme de traitement d'images. Cette surface a ensuite été reportée au poids frais pour obtenir le SLA (Specific leaf area). La mesure du SLA a permis d'estimer les valeurs de LAI des autres modalités à partir du poids frais de leurs feuilles.

Le rendement en grains a été mesuré sur les parcelles dédiées à sa caractérisation par la récolte et le battage des plantes à maturité physiologique avec une moissonneuse-batteuse d'essai.

Les différentes dates et prélèvements sont repris dans le tableau 2.3.

Date	Variable(s) mesurée(s)
2018/05/03	Biomasse sèche
2018/06/06	Biomasse sèche
2018/06/27	Biomasse sèche
2018/08/07	Biomasse sèche, Rendement grain
2018/11/08	Biomasse sèche
2019/04/05	Biomasse sèche, Quantité de N et C dans la plante
2019/06/02	Biomasse sèche, Quantité de N et C dans la plante
2019/06/24	Biomasse sèche, Quantité de N et C dans la plante
2019/08/06	Biomasse sèche, Quantité de N et C dans la plante
2019/08/11	Rendement grain
2019/11/06	Biomasse sèche
2020/04/25	Biomasse sèche, LAI, Quantité de N et C dans la plante
2020/05/29	Biomasse sèche, LAI, Quantité de N et C dans la plante
2020/06/29	Biomasse sèche, LAI, Quantité de N et C dans la plante
2020/08/05	Biomasse sèche, Quantité de N et C dans la plante
2020/08/10	Rendement grain
2020/11/18	Biomasse sèche
2021/04/27	Biomasse sèche, LAI
2021/06/07	Biomasse sèche, LAI
2021/07/05	Biomasse sèche, LAI
2021/08/30	Biomasse sèche

TABLE 2.3 – Tableau présentant les dates de prélèvements et les variables étudiées pour chaque essai.

2.3 Caractérisation de la biomasse souterraine

Dans le but d'étoffer les données utilisées pour la calibration du modèle de culture, des prélèvements de biomasse souterraine ont été réalisés dans le cadre de ce travail. Ces données ont été récoltées dans un but exploratoire et ne constituent pas une étude exhaustive des organes souterrains de la plante.

2.3.1 Modalités des prélèvements

Une sélection d'itinéraires techniques a été effectuée pour réaliser les prélèvements. Les modalités sans fauche recevant des fertilisations de $0-0-0$, $100-50-0$ et $50-50-50$ kgN/ha ont été retenues pour l'essai K17 (modalités 1, 5 et 7 du tableau 2.1). Les modalités retenues pour l'essai K19 sont celles implantées en août avec des interlignes de 12,5 cm et 25 cm (modalités 3 et 4 du tableau 2.2).

Les stades et dates de prélèvement souterrains ainsi que leurs profondeurs sont repris dans le tableau 2.4. Les prélèvements à 15 cm ont été réalisés sur les 4 répétitions des essais et ceux à 90 cm sur seulement 3 répétitions. Pour chaque parcelle de mesure, 4 échantillons ont été prélevés de façon aléatoire, 2 dans la ligne et 2 dans l'interligne.

A la maturité physiologique (BBCH89), une récolte supplémentaire de données en profondeur a été effectuée afin d'étudier le développement en profondeur du système racinaire pour des cultures d'âge différent (voir tableau 2.4). Ainsi, des modalités de semis et de fertilisation aussi proches que possible ont été choisies dans les deux essais. Les seules différences entre ces modalités sont le mois de semis (août pour K19 et septembre pour K17) et la fauche d'automne (présente pour K19, absente pour K17).

Stade	Profondeur	Diamètre sonde	Date	Essai(s)	Modalités	Répétitions
BBCH39	0-15 cm	12,5 cm	07/06/21	K17	1, 5, 7	4
				K19	3,4	4
BBCH65	0-15 cm	12,5 cm	05/07/21	K17	1, 5, 7	4
				K19	3,4	4
BBCH89	0-15 cm	12,5 cm	30/08/21	K17 K19	1, 5, 7 3,4	4 4
	0-30 cm	3 cm	20/09/21	K17	7	3
	30-60 cm			K19	4	3
	60-90 cm					
Automne	0-15 cm	12,5cm	15/11/21	K19	3,4	4

TABLE 2.4 – Modalités de prélèvement de biomasse souterraine pour les essais K17 et K19.

2.3.2 Protocole de prélèvement de 0 à 15 cm de profondeur

Comme préconisé dans l'étude de SAKIROGLU et al. 2020, un carottage du sol à une profondeur de 15 cm a été réalisé afin de capter la majeure partie de l'information concernant les rhizomes et les racines de la plante. Ces prélèvements ont été réalisés les mêmes jours que les prélèvements de biomasse aérienne (voir tableau 2.3), après que celle-ci ait été retirée des quadrats. Les prélèvements ont été réalisés à l'aide d'un tube en PVC épais, de 12,5 cm de diamètre enfoncé à une profondeur de 15 cm dans le sol (voir figure 2.2).

Les échantillons de biomasse souterraine stockés à 4°C (voir figure 2.2, image de droite) ont été nettoyés de leur terre avec un jet d'eau de pression moyenne au-dessus de tamis de 1 mm. La perte de racines secondaires a été constatée mais a pu être négligée étant donné que leur masse ne représente qu'une fraction infime de la biomasse souterraine totale et a peu d'influence sur les mesures de biomasse (AMATO et PARDO 1994).

Les échantillons prélevés au stade dernière feuille ont été placés individuellement dans des seaux remplis d'eau salée (NaCl 50 g/L) durant 24h dans le but de dégrader les argiles du sol et faciliter le lavage. Cette opération étant chronophage sans apporter de réels bénéfices, elle a été abandonnée pour les prélèvements suivants.

2.3.3 Protocole de prélèvement de 0 à 90 cm de profondeur

Le carottage en profondeur s'est effectué grâce à une sonde de 3 cm de diamètre montée sur un vérin hydraulique à l'arrière d'un tracteur. Trois prélèvements successifs ont été réalisés de 0-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm.

Les échantillons ont ensuite été lavés dans des seaux avec une arrivée d'eau à leur base créant un vortex remontant dans le récipient. Au centre du seau se trouve un tube en PVC bouché par un tamis de 1mm. Celui-ci recueille le trop-plein d'eau charriant les éléments légers que sont les racines, rhizomes et éventuelles pailles contenus dans les échantillons.

2.3.4 Traitement des échantillons

Le lavage des échantillons s'est suivi d'un séchage à l'étuve durant 72h à 60 °C pour tous les prélèvements. Le tri des racines et rhizomes s'est effectué sur les échantillons secs (voir figure 2.3).

Les teneurs en carbone et en azote ont été mesurées via la méthode Dumas (DUMAS 1831).



FIGURE 2.2 – Tube de prélèvement en PVC avant enfouissement à 15cm à gauche. Echantillons prêts à être lavés à droite.



FIGURE 2.3 – Echantillons secs de rhizomes et racines triés.

Les échantillons prélevés au niveau des lignes et interlignes ainsi que certaines répétitions ont été mélangées pour constituer des échantillons composites suffisants pour réaliser ces analyses. Elles ont concerné les échantillons des différentes modalités aux stades dernière feuille, floraison et récolte pour les essais K17 et K19.

2.3.5 Analyses statistiques

L'étude de l'appareil souterrain de kernza n'étant pas l'objectif principal de ce travail, une application a été développée en langage R (R CORE TEAM 2020) grâce à la bibliothèque *shiny* (RSTUDIO, INC 2013) afin de pouvoir visualiser, explorer et traiter les données récoltées de façon plus rapide et ergonomique.

L'application se présente sous la forme d'une interface graphique divisée en deux zones (figure 2.4). A gauche (cadre rouge A - figure 2.4), se trouve une colonne contenant différents menus déroulants et boutons permettant d'interagir avec l'application pour choisir le modèle statistique à utiliser ainsi que les variables et facteurs. A droite se trouve une zone contenant 3 onglets (cadre B - figure 2.4) :

1. *Données* : cet onglet représente le jeu de données chargé par l'utilisateur sous forme d'un tableau.
2. *Statistiques descriptives* : cet onglet présente le graphe des données en fonction des variables et facteurs choisis par l'utilisateur. Sur ce graphe sont aussi représentés les groupes issus du test de hiérarchisation des moyennes de Student-Newman-Keuls. En dessous sont présentés les résultats des tests de shapiro-Wilk et Bartlett (voir point suivant).
3. *Résultats ANOVA* : cet onglet présente le résultat de l'ANOVA réalisée selon les modalités choisies par l'utilisateur via les menus déroulants de la colonne de gauche (cadre rouge A-figure 2.4). Les conditions d'applications sont vérifiées avec le test de shapiro-Wilk (normalité des résidus) et le test de Bartlett (égalité des variances) dont les résultats sont affichés dans l'onglet « Statistiques descriptives », sous le graphe représentant les données.



FIGURE 2.4 – Capture d'écran de l'interface de l'application de statistiques *Rshiny*. En A se trouve la zone d'interaction et en B la zone de résultats.

La majorité des résultats présentés dans ce travail ont été obtenus grâce cette application. Pour chaque essai, une ANOVA a été réalisée sur les biomasses sèches de racines et de rhizomes ainsi que sur leurs teneurs (%) et assimilations en carbone (tC/ha) et en azote (kgN/ha) :

- Essai K17, ANOVA à 2 facteurs fixes *Fertilisation azotée* et *Stade de développement* et 1 facteur aléatoire *blochs* tenant compte des répétitions de l'essai.
- Essai K19, ANOVA à 2 facteurs fixes *Interligne de semis* et *Stade de développement* et 1 facteur aléatoire *blochs* tenant compte des répétitions de l'essai.
- Comparaison K17 et K19 avec fertilisations similaires, ANOVA à 2 facteurs fixes *Profondeur* et *Age*. Puis une ANOVA à 2 facteurs fixes *Age* et *Stade de développement*.

Les conditions de normalité et d'égalité des variances ont été testées comme présentées dans la section précédente. Quand une interaction était observée entre les différents facteurs fixes, les données ont été séparées par les différentes modalités d'un de ces facteurs. Après les analyses de variances, le test post-hoc Student–Newman–Keuls (SNK test) a été réalisé pour comparer les moyennes des différentes modalités ($p\text{-value} < 0.05$).

2.4 Modélisation

La modélisation de kernza s'est effectuée grâce au modèle STICS version 9.2 pour Linux, exécuté sur une machine fonctionnant sous Ubuntu 20.04.3 LTS.

2.4.1 Construction de la base données

Une base de données a été créée afin d'organiser et regrouper les données de terrain relatives aux essais K17 et K19 pour permettre la calibration du modèle.

STICS simule les périodes culturales sous forme d'*unités de simulation* (USM) qui représentent des périodes allant de 0 à 730 jours (2 années au maximum). Une fois les caractéristiques d'une USM déterminées, l'interaction sol-plante-atmosphère est simulée grâce à une série de fichiers d'entrée qui contiennent des valeurs de paramètres et variables relatives aux différents processus simulés (sol, météo, état initial, paramètres de la plante, itinéraire technique, station de mesure météo). La base de données est organisée en fonction des fichiers requis pour le fonctionnement de STICS (voir figure 2.5). Elle contient en plus des fichiers centralisant les observations effectuées sur le terrain pour les plantes et le sol.

Le contenu de ces fichiers est repris ci-dessous :

- Les fichiers climatiques reprennent les valeurs journalières par année de températures maximales et minimales (°C), radiation solaire (J/cm²), précipitations (mm), humidité relative (%) et vent (km/h). Ces données ont été enregistrées par la station météo d'Ernage (50°57'N, 4°68'E) située à quelques km des parcelles expérimentales.
- Les fichiers d'initialisation contiennent les informations relatives à l'état initial des sols des essais K17 et K19 et notamment les teneurs en NO₃- des différents horizons. Ces données ont été mesurées pour l'essai K19 et estimées pour l'essai K17 en fonction des reliquats azotés renseignés dans le *Livre blanc "céréales"* correspondant à la saison de culture 2017-2018.
- Les fichiers d'observations plante contiennent les valeurs observées de biomasse aérienne sèche (t/ha), rendement grain (t/ha), LAI (m²/m²), quantité d'azote dans la biomasse (kgN/ha) et quantité de carbone dans la biomasse (t/ha). Ces données sont associées à une date et un itinéraire technique pour pouvoir les relier aux modélisations.
- Les fichiers observations sol contiennent les données relatives à l'état chimique du sol à certaines dates.
- Les fichiers sol contiennent les valeurs des variables relatives au sol, la taille des horizons ainsi que leurs propriétés physiques. Ces valeurs sont issues de mesures de terrain et d'estimations.
- Les fichiers d'itinéraires techniques sont individualisés par itinéraire et contiennent chacun les informations relatives aux modalités de semis (date, profondeur, densité, variété, interligne), de récolte (date, type de récolte-fauche ou moisson, résidus), et de fertilisation (dates des apports, quantité d'azote apportée) réels. La dénomination des itinéraires a été réalisée en accolant les modalités étudiées dans chaque essai. La modalité K17-2 (tableau 2.1) non fauchée et fertilisée par un apport de 50 kgN/ha au redressement aura donc la dénomination *nonFauche50000*. Il a bien sûr été tenu compte des changements de fractionnements présentés au point 2.1.1 pour la constitution des fichiers.

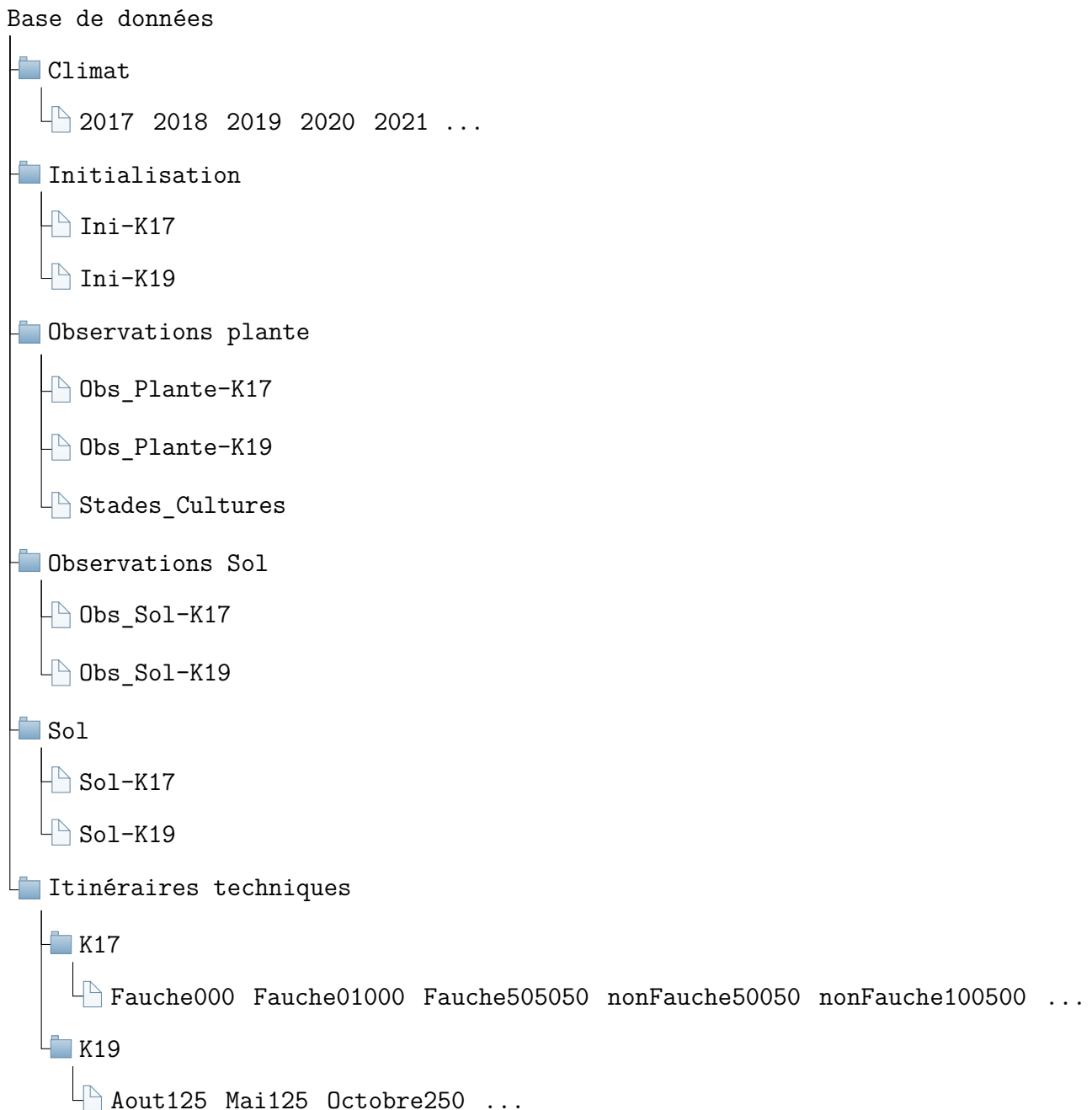


FIGURE 2.5 – Schéma d’organisation de la base de données

2.4.2 Création des fichiers utilisés par STICS à partir de la base de données

Comme expliqué à la section précédente, STICS utilise plusieurs fichiers pour exécuter les simulations. Certains de ces fichiers sont communs pour toutes les simulations (sol, climat, station, plante), d’autres dépendent de la simulation considérée (initialisation) et d’autres encore sont propres à chaque itinéraire technique (fichier *tec*, reprenant l’itinéraire technique).

STICS ne permet pas de considérer une culture à double finalité grain/fourrage telle que kernza, deux approches ont donc été envisagées pour simuler la plante :

- Une approche *prairie* dans laquelle kernza est considérée comme une prairie pérenne fauchée. Dans cette approche, aucun rendement en grain n’est calculé par le modèle et

il faut donc externaliser ce calcul en utilisant la biomasse sèche récoltée à la moisson. Ceci oblige les simulations à se dérouler en enchaînement d'année en année.

- Une approche *céréale annuelle* dans laquelle kernza est considérée comme une céréale annuelle non fauchée mais moissonnée. Cette approche est réalisée en simulant des périodes de croissance de récolte à récolte à l'instar d'une culture d'hiver qui s'enchaînerait sur plusieurs années.

Une fonction a été développée en R afin de lire les fichiers de la base de données et créer automatiquement les fichiers d'itinéraires techniques et d'USM relatifs aux simulations en fonction de l'approche souhaitée. Chaque approche utilise un fichier plante différent. La fonction crée en plus des fichiers mentionnés, un dossier contenant tous les fichiers nécessaires aux simulations pour un itinéraire technique. Les valeurs des variables journalières calculées au cours de la simulation sont aussi stockées dans ce dossier.

2.4.3 Exécution des simulations

STICS embarque une interface graphique (JavaSTICS) permettant de choisir et paramétrer les simulations qui seront exécutées. Etant donné la grande quantité de simulations nécessaires à la calibration du modèle, une fonction a été développée en R afin de lancer les simulations de façon automatisée en tirant parti de la possibilité d'exécuter STICS via l'interpréteur de commande du système d'exploitation (shell).

STICS propose de plus plusieurs options de simulation. Soit les simulations se font en enchaînement et le modèle considère certaines variables de sortie en entrée de la simulation suivante, soit les simulations se déroulent individuellement. La première possibilité a été utilisée pour la simulation de kernza *prairie* étant donné que le formalisme *plante pérenne* a été activé. Une fonction a été développée pour effectuer les enchaînements de simulations de façon externe au logiciel pour kernza *céréale*. Cette fonction exécute la première simulation d'un enchaînement puis récupère les valeurs des variables en fin de simulation. Elle réécrit ensuite le fichier d'initialisation de la simulation suivante en y injectant les variables de sortie précédemment récupérées. Ces variables sont la matière sèche, le LAI, les quantités de NO₃⁻ dans chacun des horizons du sol, la profondeur des racines, la densité racinaire dans chacun des horizons du sol, la quantité de carbone dans la plante et la quantité d'azote dans la plante. Elle lance ensuite la seconde simulation et procède de la même manière pour toutes les simulations prévues. Ceci permet de démarrer artificiellement sur une culture installée les années suivant l'implantation et ainsi mimer en partie la pérennité de la plante.

2.4.4 Calibration et validation du modèle

La calibration du modèle a été effectuée avec les données de l'essai K17 et la validation avec celles de l'essai K19. Il a été envisagé d'utiliser le package R `croptimizeR` afin de réaliser l'optimisation paramétrique plus efficacement. Cependant les résultats se sont avérés décevants pour kernza *prairie* et la particularité de simulation de kernza *céréale* empêchait son utilisation. La calibration s'est donc effectuée en faisant varier les valeurs de certains paramètres et en évaluant le résultat grâce à quatre critères statistiques (voir section 2.4.5). L'ajustement de la valeur des paramètres a ensuite été décidé en prenant en compte l'influence des paramètres dans les équations du modèle et les tendances des variables sur les graphes.

Afin de permettre une comparaison correcte avec les valeurs observées, deux fonctions ont été développées. La première crée les graphes reprenant pour chaque USM les valeurs journalières simulées d'une variable en fonction du temps (voir exemples figure 2.6). Sur ce même graphe sont intégrées les valeurs des observations aux dates auxquelles elles ont été réalisées ainsi que

le point correspondant à la moyenne de ces observations. Ces graphes permettent d’avoir une idée des dynamiques des variables simulées par rapport aux observations afin d’orienter les modifications de paramètres en se basant sur les équations du modèle.

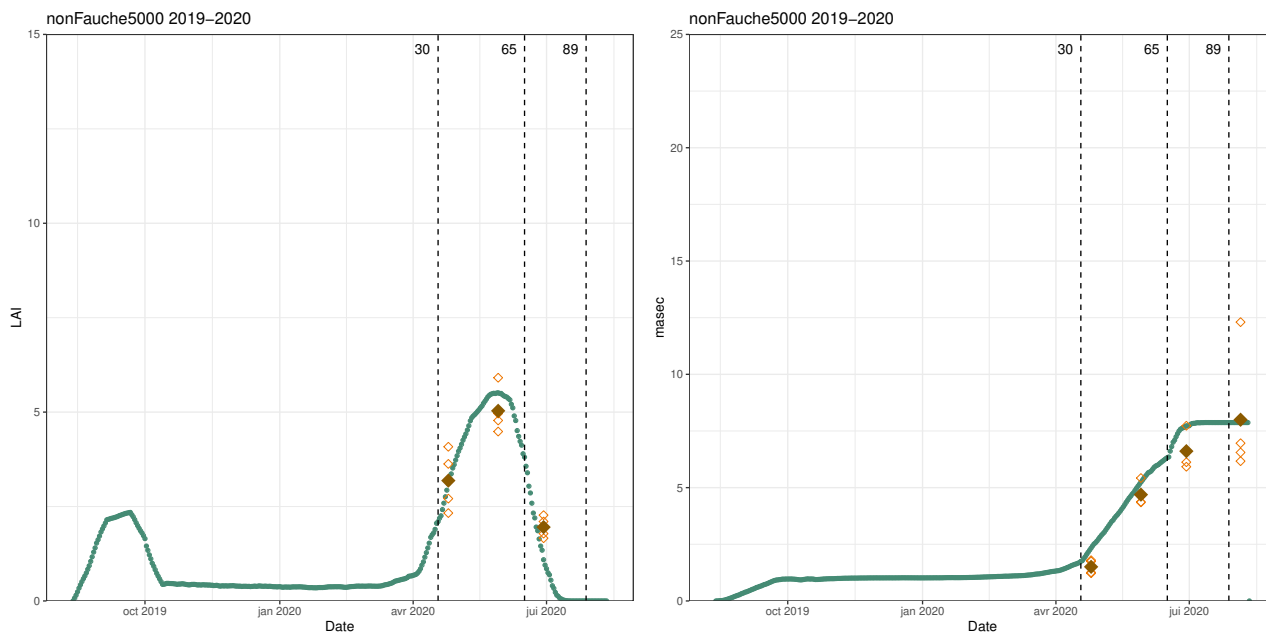


FIGURE 2.6 – Exemples de graphes de LAI (à gauche, en $m^2\text{feuilles}/m^2\text{sol}$ en fonction du temps en jours) et matière sèche (à droite, en t/ha en fonction du temps en jours) créée par la fonction de visualisation pour K17, simulation considérant kernza comme une céréale pour la période 2019-2020 pour l’itinéraire technique sans fauche avec fractionnement de 50-0-0. En vert sont représentées les valeurs journalières de la variable considérée. Les losanges orange vides représentent les valeurs observées de la variable et les losanges bruns la moyenne de ces observations. Les traits pointillés renseignent les dates simulées des stades BBCH30, BBCH65 et BBCH89.

La seconde fonction rassemble les valeurs simulées et les compare aux valeurs observées aux mêmes dates. Ces valeurs sont ensuite présentées sur un graphe où figurent la droite d’équation $x=y$ ainsi que la droite de régression correspondant à l’ensemble de valeurs associées observées/simulées. Ce graphe permet d’avoir une vision plus globale des éventuelles erreurs commises par le modèle, notamment pour déceler d’éventuels décalages systématiques traduisant une sur- ou sous- estimation globale de la part du modèle (voir partie résultats, sous partie modélisation).

2.4.5 Evaluation du modèle

Pour chaque calibration de paramètres, une évaluation des performances du modèle est effectuée à l'aide de 4 critères statistiques.

2.4.6 Erreur quadratique moyenne

L'erreur quadratique moyenne (*RMSE*) est calculée selon l'équation 2.1. Cette valeur est exprimée dans la même unité que la variable pour laquelle la performance du modèle est testée.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (2.1)$$

Où :

- N est le nombre d'observations
- Y_i sont les valeurs observées de la variable
- \hat{Y}_i sont les valeurs simulées de la variable

Ce critère doit être le plus proche de zéro et très inférieur à la moyenne des observations pour considérer que l'efficacité de prédiction du modèle est bonne.

2.4.7 Efficience de modélisation

L'efficience de modélisation (*EF*) est calculée selon l'équation 2.2 et sa valeur se situe entre $-\infty$ et 1, 1 correspondant à une simulation parfaite.

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2.2)$$

Où :

- N est le nombre d'observations
- Y_i sont les valeurs observées de la variable
- \hat{Y}_i sont les valeurs simulées de la variable
- \bar{Y} est la valeur moyenne des variables observées

Ce critère doit être supérieur à 0,5 pour considérer que l'efficacité de prédiction du modèle est bonne.

2.4.8 Coefficient de détermination

Le coefficient de détermination (R^2) est calculé selon l'équation 2.3, sa valeur varie de 0 à 1, 1 correspondant à une simulation parfaite.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N [(Y_i - \bar{Y}) * (\hat{Y}_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y}) * \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y})}} \right)^2 \quad (2.3)$$

Où :

- N est le nombre d'observations
- Y_i sont les valeurs observées de la variable
- \hat{Y}_i sont les valeurs simulées de la variable
- \bar{Y} est la valeur moyenne des variables observées

Ce critère doit être supérieur à 0,5 pour considérer que l'efficacité de prédiction du modèle est bonne.

2.4.9 Déviation normale

La déviation normale (ND) est calculée selon l'équation 2.4.

$$ND = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i) - \sum_{i=1}^N (Y_i)}{\sum_{i=1}^N (Y_i)} \quad (2.4)$$

Où :

- N est le nombre d'observations
- Y_i sont les valeurs observées de la variable
- \hat{Y}_i sont les valeurs simulées de la variable

La valeur absolue de ce critère ne doit pas dépasser 0,1 pour considérer que l'efficacité de prédiction du modèle est bonne, une simulation parfaite aura une valeur de ND égale à 0.

2.4.10 Paramètres optimisés en lien avec les processus simulés

L'organisation en modules de STICS permet une optimisation paramétrique séquentielle, module par module. Certaines variables doivent en effet être correctement simulées avant d'autres car leurs valeurs ont une forte influence sur la simulation globale de la culture. Les modules ont été considérés dans l'ordre suivant :

- Phénologie
- Leaf Area Index
- Efficience de conversion
- Elaboration du rendement (pour kernza *céréale*)
- Bilan azoté
- Croissance racinaire

Les valeurs des paramètres de départ ont été soit tirées de publications scientifiques (phénologie, bilan azoté), soit estimées à l'aide des paramètres de plantes proches déjà calibrées. Ainsi, les paramètres du froment, de la fétuque et de la fléole ont été utilisés. Une comparaison de tous ces paramètres a été réalisée afin de détecter les invariants et ainsi écarter de la calibration un certain nombre d'entre eux.

Les sections suivantes reprennent les paramètres qui ont été optimisés pour chaque module. Une brève description des équations utilisées pour la calibration sera fournie pour illustrer les relations entre les différentes variables et paramètres. Le lecteur intéressé pourra donc se référer à l'ouvrage de BRISSON, LAUNAY et al. 2009 pour obtenir une description plus exhaustive du fonctionnement du modèle.

2.4.11 Phénologie

Les paramètres de départ utilisés pour simuler la phénologie de la plante sont issus de DUCHENE, DUMONT et al. 2021. Les valeurs de départ et le nom des paramètres qui ont été utilisés sont

repris dans le tableau 2.5. Seuls les paramètres *stlevamf*, *stamflax* et *stlevdrp* ont été optimisés, les autres ont été paramétrés. Les valeurs initiales de ces paramètres sont celles de la fléole.

Paramètre	Valeur	Permet de calculer	Signification
phobase	9,7	RFPI	Photopériode de base (heure)
phosat	17,9	RFPI	Photopériode saturante (heure)
tfroid	4,6	RFVI	Température optimale de vernalisation(°C)
ampfroid	7,4	RFVI	Amplitude thermique pour l'effet vernalisateur (°C)
jvc	58	RFVI	Durée de vernalisation requise (jours)
tdmin	0	UDEVCULT	Température minimale de développement (°C)
tdmax	25	UDEVCULT	Température maximale de développement (°C)
stlevamf	109	BBCH30	Temps thermique cumulé entre la levée et le stade BBCH30 (°jour)
stamflax	916	BBCH39	Temps thermique cumulé entre le stade BBCH30 et le stade BBCH39 (°jour)
stlevdrp	1203	BBCH89	Temps thermique cumulé entre la levée et le stade BBCH89 (°jour)

TABLE 2.5 – Tableau reprenant les valeurs de départ des paramètres utilisés pour simuler la phénologie, la variable sur laquelle ils ont une incidence (voir équation 2.5) et leur signification.

STICS simule la phénologie de la culture grâce à des unités de développement (UPVT) qui s'accumulent au cours du temps. Les stades de développement correspondent alors à l'accumulation d'une certaine quantité d'UPVT. Cette accumulation correspond à une accumulation de degrés jours (UDEVCULT dans l'équation 2.5) modulée par des facteurs liés aux besoins de vernalisation (facteur RFVI de l'équation 2.5) et de photopériode (facteur RFPI de l'équation 2.5). Certains facteurs de stress liés à la nutrition de la plante ou au manque d'eau peuvent aussi avoir un impact sur le développement phénologique (équation 2.5, termes entre crochets).

$$UPVT(I) = UDEVCULT(I) * RFPI(I) * RFVI(I) * [STRESSDEV_P * \min(TURFAC(I), INNLA I(I)) + 1 - STRESSDEV_P] \quad (2.5)$$

STICS distingue de plus deux échelles de développement qui évoluent en parallèle l'une de l'autre. L'une rend compte du développement végétatif et l'autre du développement reproductif. Les paramètres *stlevamf* et *stamflax* vont donc intervenir dans l'échelle phénologique végétative et *stlevdrp* interviendra dans l'échelle phénologique reproductrice.

2.4.12 Leaf Area Index

Les paramètres de simulation du LAI qui ont été optimisés sont repris dans le tableau 2.5. Les valeurs de départ proviennent des fichiers de paramètres de la fléole et du froment.

STICS calcule le taux de croissance journalier du LAI grâce à l'équation 2.6. Le premier terme de l'équation ($DELTA I_{dev}$) correspond à la croissance maximale corrigée par la suite par les termes $DELTA I_T$ (température réelle de la culture), $DELTA I_{dens}$ (compétition inter-plantes)

Paramètre	Valeur céréale	Valeur prairie	Permet de calculer	Signification
durevief	200	35,6	Durée vie feuille	durée de vie max d'une feuille adulte (ΣQ_{10})
stressdev	0,2	0,2	Sénescence	Retard phasique maximal (sans unité)
tigefeuille	0,5	0,355	SBVMAX*	ratio tige sur proportion de feuilles (sans unités)
dlaimaxbrut	0,00047	0,00032	DELTAI _{dev}	Taux max de mise en place du LAI(sans unité)
udelaimax	3	2,9	DELTAI _{dev}	LAI à partir duquel le taux de croissance diminue (sans unité)
adens	0,6	0,5	DELTAI _{dens}	Compétition entre plantes (sans unité)
bdens	7	7	DELTAI _{dens}	Distance minimale interplante qui génère une compétition (m ⁻²)

TABLE 2.6 – Tableau reprenant les valeurs de départ des paramètres optimisés pour simuler le LAI, leur signification et les variables pour lesquelles ils interviennent. *SBVMAX est l'expansion maximale des feuilles par unité de biomasse accumulée (il est calculé selon l'équation 2.9)

et DELTAI_{stress} (stress azoté et hydriques). Les termes DELTAI_{dev} et DELTAI_{dens} sont calculés respectivement grâce aux équations 2.7 et 2.8. Les détails ne sont pas exposés ici pour ne pas alourdir la lecture, le fonctionnement précis du formalisme de calcul du LAI de STICS peut être trouvé dans l'ouvrage de BRISSON, LAUNAY et al. 2009.

$$DELTAI_1(I) = DELTAI_{dev}(I) \cdot DELTAI_T(I) \cdot DELTAI_{dens} \cdot DELTAI_{stress}(I) \quad (2.6)$$

if $ULAI(I) < UDLAIMAX_P$

$$DELTAI_{dev}(I) = \frac{DLAIMAXBRUT_P}{1 + \exp[PENTLAIMAX_P(VLAIMAX_P - ULAI(I))]} \quad (2.7)$$

if $ULAI(I) \geq UDLAIMAX_P$

$$DELTAI_{dev}(I) = DELTAI_{dev}MAX \left(1 - \frac{ULAI(I) - UDLAIMAX_P}{3 - UDLAIMAX_P} \right)^2$$

if $LAI(I)LAICOMP_P$ and $DENSITE(I) \geq BDENS_P$

$$DELTAI_{dens}(I) = DENSITE(I) \left(\frac{DENSITE(I)}{BDENS_P} \right)^{ADENS_V} \quad (2.8)$$

if $LAI(I) < LAICOMP_P$ or $DENSITE(I) < BDENS_P$

$$DELTAI_{dens}(I) = DENSITE(I)$$

$$SBVMAX = \frac{SLAMAX_P}{1 + TIGEFEUILLE_P} \quad (2.9)$$

2.4.13 Efficience de conversion

STICS calcule l'accumulation de biomasse par sommation journalière des valeurs de DLTAMS calculées grâce à l'équation 2.10. Ce calcul dépend de l'interception des radiations solaires par le LAI (terme RAIN(T) de l'équation 2.10) et d'un coefficient maximal d'efficience d'utilisation des radiations (terme EBMAX(I) de l'équation 2.10). Ce coefficient varie selon le stade phénologique de la culture (tableau 2.7). Cette accumulation de biomasse est influencée par des facteurs de stress (nutrition azotée, stress hydrique, transpiration des feuilles, température), représentés par les termes des deux dernières lignes de l'équation 2.10. kernza semble physiologiquement disposée à une production plus grande de biomasse lors de sa deuxième année de croissance (X. ZHANG et al. 2016, CULMAN et al. 2013, J. M. JUNGERS et al. 2017. Cette spécificité ne pouvant être prise en compte par le modèle, la calibration s'est effectuée en majorité en écartant les données correspondant à cette période de production.

Les valeurs de départ des paramètres du tableau 2.7 sont respectivement celles du blé pour kernza *céréale* et de la fléole pour kernza *prairie*

Paramètre	Valeur kernza <i>céréale</i>	Valeur kernza <i>prairie</i>	Stades phénologiques
efcroijuv	2,2	2,6	Levée-Redressement
efcroiveg	4,25	2,7	Redressement-Début de remplissage des grains
efcroirepro	4,25	4,5	Début de remplissage des grains-Maturité physiologique

TABLE 2.7 – Tableau reprenant les valeurs de départ des coefficients d'efficience d'utilisation maximale du rayonnement à différents stades phénologiques de développement de la plante.

$$\begin{aligned}
 DLTAMS(I) = & \left[EBMAX(I) \cdot RAIN(T) - COEFB_G \cdot RAIN(T)^2 \right] \\
 & FTEMP(I) \cdot SWFAC(I - 1) \cdot INNS(I - 1) \cdot EXOBIOM(I - 1) \cdot FCO2 \\
 & + DLTAREMOBIL(I - 1)
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

2.4.14 Elaboration du rendement

Ce formalisme n'a été considéré que pour kernza *céréale*, le rendement en grains pour kernza *prairie* a été externalisé et calculé grâce à un indice de récolte calibré entre 0,5 et 0,12 pour couvrir les valeurs obtenues par CULMAN et al. 2013, DICK, CATTANI et ENTZ 2018, DUCHENE 2020. Dans ce dernier cas, la biomasse sèche observée a été considérée comme la somme de la biomasse aérienne sèche et de la biomasse des grains afin de ne pas fausser le calcul du rendement en grains par rapport à la matière sèche récoltée.

Dans le cas de l'approche kernza *céréale*, le rendement en grains est calculé par STICS en deux phases. En premier lieu, le nombre de grains est calculé en fonction de la croissance de la biomasse (VITMOY dans l'équation 2.11) durant les stades ILAT (début de la phase critique pour la détermination du nombre de grains) et IFLO (floraison) de l'échelle de développement phénologique reproductive, en tenant compte de facteurs génétiques de nombre de grains maximal et minimal (voir équation 2.11). Dans un second temps, les grains sont remplis en fonction de la quantité de matière sèche accumulée entre les stades IDRP (début de remplissage des grains) et IMAT (maturité physiologique) de l'échelle de développement phénologique reproductive et d'un indice de récolte (IRCARB dans l'équation 2.12) évoluant au cours du temps en fonction

du paramètre VITIRCARBT (indice de récolte dépendant du temps thermique). Comme pour la biomasse aérienne et pour les mêmes raisons (voir point 2.4.13), la deuxième période de culture a été ignorée lors de la calibration.

Paramètre	Valeur	Entre dans le calcul de	signification
cgrain	0,036	nombre de grains	Pente de la relation entre le grain et le taux de croissance de la matière sèche (m ² /g)
vitircarbT	0,1	indice de récolte	Taux d'augmentation de l'indice de récolte en fonction du temps thermique (g de grain/g*jour)

TABLE 2.8 – Tableau reprenant les valeurs de départ ainsi que la signification des paramètres optimisés pour simuler la production de grain par kernza *céréale*.

$$\begin{aligned}
 NBGRAINS(IDRP) &= CGRAIN_P \cdot VITMOY(IDRP) \cdot NBGRMAX_V \\
 \text{if } NBGRAINS(IDRP) > NBGRMAX_V & \quad NBGRAINS(IDRP) = NBGRMAX_V \\
 \text{if } NBGRAINS(IDRP) < NBGRMIN_P & \quad NBGRAINS(IDRP) = NBGRMIN_P
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

$$\begin{aligned}
 IRCARB(I) &= VITIRCARB_P \cdot (I - IDRP) \\
 \text{if } IRCARB(I) > IRMAX_P & \quad IRCARB(I) = IRMAX_P
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

2.4.15 Bilan azoté

Les paramètres relatifs à ce module n'ont pas été optimisés mais paramétrés grâce aux valeurs obtenues expérimentalement par FAGNANT 2021. ces valeurs sont identiques pour kernza *céréale* et kernza *prairie*, elles sont reprises dans le tableau 2.9 associées aux noms des paramètres de STICS. Ces paramètres correspondent aux coefficients de la courbe de dilution de l'azote présentée au point 1.6. STICS utilise en effet l'indice de nutrition azoté pour déterminer le statut nutritionnel de la plante simulée.

Paramètre	Valeur
adil	2,26
bdil	0,41

TABLE 2.9 – Tableau reprenant les valeurs de départ des paramètres utilisés par STICS pour calculer l'indice de nutrition azoté.

2.4.16 Croissance racinaire

STICS ne simule pas les racines des plantes comme leur partie aérienne, les racines sont considérées comme une surface d'absorption associée à une densité. Ainsi, la variable MSRAC qui contient la valeur de la biomasse racinaire journalière est calculée en fonction de la longueur totale des racines (terme RLTOT de l'équation 2.13), la longueur totale des racines sénescentes (terme LRACSENTOT de l'équation 2.13) et le rapport longueur des racines sur masse des racines (terme LONGSPERAC de l'équation 2.13) qui est un paramètre général du modèle.

$$MSRAC(I) = 100 \cdot \frac{RLTOT(I) + LRACSENTOT(I)}{LONGSPERAC_G}
 \tag{2.13}$$

2.5 Détermination de l'optimum de fertilisation grâce au modèle calibré

Suite à la calibration du modèle STICS pour kernza, l'approche *céréale* a été retenue pour effectuer les simulations dans le but de déterminer les fractionnements et la fertilisation optimale en azote.

Les données climatiques de la station d'Ernage ont été acquises pour les années 1993 à 2016 puis 125 itinéraires techniques différents ont été générés avec l'application de 3 fractions d'azote allant chacune de 0kgN/ha à 100 kgN/ha par pas de 25 kgN/ha. Ceux-ci possèdent tous les mêmes paramètres à l'exception des quantités d'azote apportées au cours de la saison de culture. Pour plus de simplicité, les jours d'application de la fertilisation et de semis ont en effet été fixés. Les simulations se sont déroulées en enchaînement sur 4 années de récolte à récolte. Chaque période de culture de 4 ans a été simulée en débutant par toutes les années comprises en 1993 et 2016 et ce pour tous les itinéraires techniques.

Pour analyser les résultats, la procédure détaillée par DUMONT et al. 2013 a été suivie. Ainsi, les coefficients de *skewness* et *kurtosis* fournissant des informations sur la symétrie des distributions de probabilités de rendement ont été calculés pour chaque itinéraire technique. Un test de Kolmogorov-Smirnov a été réalisé pour vérifier l'effectivité de la dissymétrie des distributions présentant des valeurs de *skewness* différentes de 0. L'effet significatif de la fertilisation sur le rendement en grains a été vérifié grâce à une ANOVA à un facteur, les conditions d'application ont été vérifiées. Un test de Student-Newman-Keuls a ensuite été effectué pour déterminer les itinéraires techniques fournissant des rendements similaires.

Enfin, le meilleur fractionnement a été déterminé en considérant plusieurs critères :

- Une valeur de *skewness* la plus négative possible attestant d'une probabilité élevée d'obtenir des rendements supérieurs à la moyenne obtenue par l'itinéraire technique pour toutes les années simulées.
- Une dose totale de fertilisant apportée la plus petite possible
- Un nombre d'apports en fertilisant le plus faible possible (en considérant qu'il est économiquement plus intéressant d'effectuer le moins de passages de fertilisation possible)

Chapitre 3

Résultats et Discussion

3.1 Caractérisation des organes souterrains de *Th. intermedium*

Les résultats issus des prélèvements exploratoires de biomasse souterraine seront présentés par essai dans un premier temps. Dans un second temps, les deux cultures d'âges différents seront comparées pour les profondeurs de 0 à 15 cm et 0 à 90 cm.

3.1.1 Essai K17

Le tableau 3.1 présente un résumé des résultats des ANOVA à deux facteurs fixes et un facteur aléatoire réalisées pour étudier les différentes caractéristiques des organes souterrains prélevés sur 15cm. Les valeurs reprises dans ce tableau sont les statistiques de tests obtenues grâce aux ANOVA. Les cellules grisées mettent en relief les facteurs qui affectent significativement les variables ainsi que les interactions entre facteurs significatives.

Racines						
Source de variation	DF	MS	%C	%N	Quantité C	Quantité N
Stade de développement (S)	2	49,6	48,44	15,09	20,94	2,66
Fertilisation (F)	2	0,02	1,12	28,96	2,1	4,39
Bloc (R)	3	2,55	0,34	1,89	3,36	0,274
S x F	4	2,14	0,76	5,06	1,03	0,33

Rhizomes						
Source de variation	DF	MS	%C	%N	Quantité C	Quantité N
Stade de développement (S)	2	0,41	2,93	4,33	0,12	1,29
Fertilisation (F)	2	0,39	1,70	6,55	0,21	2,46
Bloc (R)	3	6,19	0,61	2,79	4,83	5,56
S x F	4	0,55	1,16	2,02	0,42	1,59

TABLE 3.1 – Résultats des différentes ANOVA sur les différents paramètres étudiés de la biomasse souterraine de l'essai K17.

La biomasse racinaire, sa teneur en carbone et sa quantité de carbone ne sont influencées que par le stade de développement de la culture. La biomasse et la quantité de carbone sont les plus élevées pour le stade dernière feuille (figures 3.3 et 3.2, graphe de droite) et diminuent au cours du développement. La diminution la plus importante de biomasse et de quantité de carbone à lieu entre les stades dernière feuille et floraison. La teneur en carbone des racines suit une tendance inverse et augmente au cours du développement (figure 3.2, graphe de gauche), elle est la plus faible au stade dernière feuille et l'augmentation la plus importante se déroule entre le stade dernière feuille et la floraison.

Cette tendance à la diminution de la biomasse racinaire de kernza au cours de la saison culturale est en adéquation avec les résultats de PUGLIESE, CULMAN et SPRUNGER 2019. Le manque de données pour toute la saison culturale ne permet cependant pas de rendre compte totalement de la dynamique de cette biomasse racinaire. Dans son étude, PUGLIESE, CULMAN et SPRUNGER 2019 montre en effet une augmentation significative de la biomasse racinaire durant le printemps, période qui n'a pas pu être prise en compte dans le cadre ce travail. Selon la même étude, cette dynamique serait due à une mortalité des racines plus importante que leur renouvellement. Ce phénomène peut jouer un rôle important dans l'augmentation de la teneur en carbone du sol en apportant de la matière organique.

La teneur en carbone dans les racines augmente au cours du développement. Les analyses chimiques effectuées ne permettent cependant pas de caractériser précisément la nature (réserves, solubles ou structurés) des hydrates de carbone responsables de ces dynamiques. L'étude de STEEN et LARSSON 1986 portant sur deux espèces d'agropyre et les dynamiques des hydrates de carbone dans leurs racines semble suggérer que seuls les sucres solubles varient en proportion dans les racines au cours de la saison.

La non influence de la fertilisation sur la quantité de biomasse racinaire est en accord avec les conclusions de SPRUNGER et al. 2018 et SAKIROGLU et al. 2020.

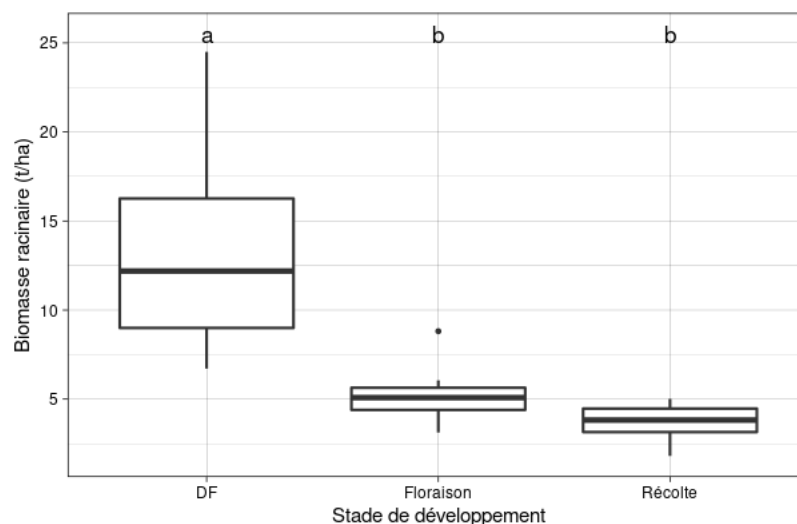


FIGURE 3.1 – Evolution de la biomasse racinaire sèche en fonction du stade de développement de l'essai K17. Les lettres correspondent aux résultats du test SNK.

La teneur en azote des racines est influencée par le stade de développement et la fertilisation azotée, une interaction significative a été observée entre ces deux facteurs (Table 1). Concernant l'influence de la fertilisation azotée aux stades floraison et maturité physiologique, la teneur en azote du témoin, ne recevant aucune fertilisation est significativement plus faible que les deux

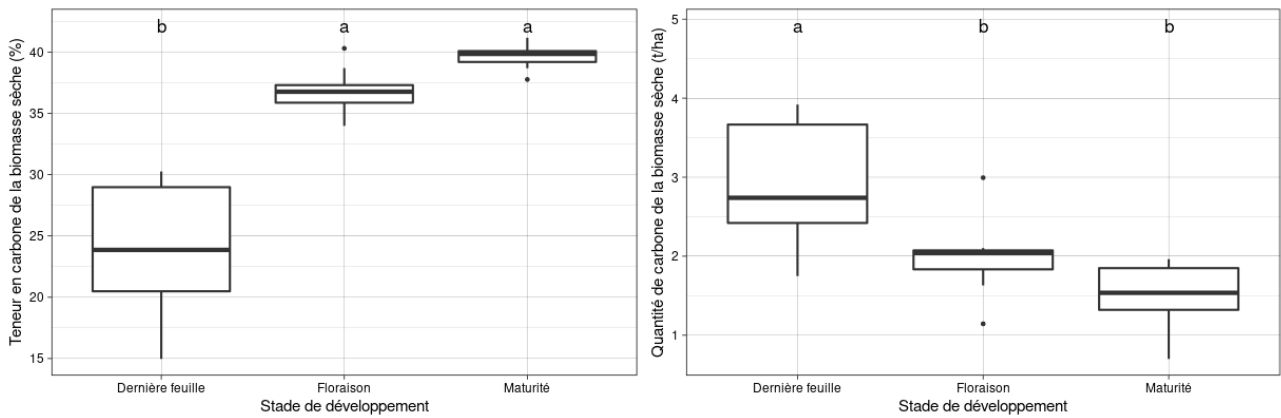


FIGURE 3.2 – Evolution, pour l’essai K17, de la teneur en carbone de la biomasse racinaire sèche en fonction du stade de développement (graphique de gauche) et évolution de la quantité totale de carbone racinaire en fonction des stades de développement (graphique de droite). Les lettres correspondent aux résultats des tests SNK.

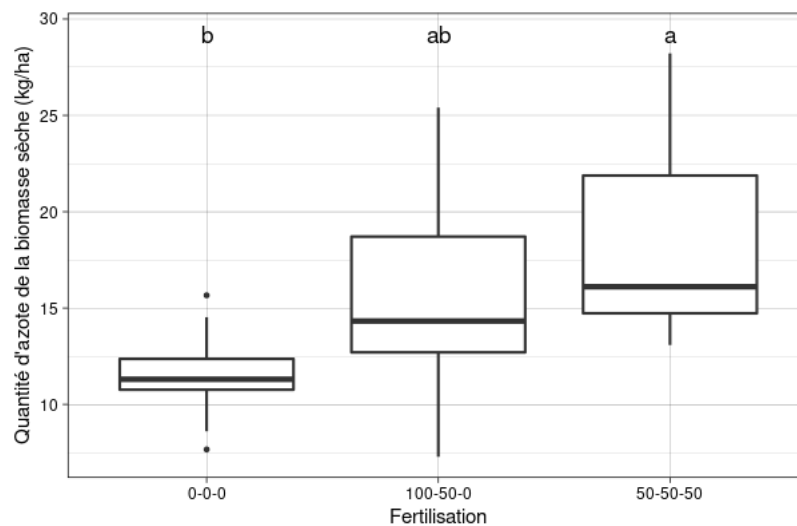


FIGURE 3.3 – Evolution de la quantité d’azote (kgN/ha) présente dans les racines de l’essai K17 en fonction de la fertilisation. Les lettres correspondent aux résultats du test SNK.

autres modalités. De plus, les teneurs en azote des modalités 5 et 7 augmentent du stade BBCH39 au stade BBCH65, tandis qu’aucune différence entre stades n’est observée pour le témoin sans azote (figure 3.4). Concernant la quantité d’azote dans les racines, celle-ci est uniquement influencée par la fertilisation azotée (Table 1). Cette quantité est en effet beaucoup plus stable au cours du développement de la plante et n’est influencée que par la fertilisation (figure 3.4). Ce constat rejoint les conclusions de l’étude de SPRUNGER et al. 2018 et va dans le sens d’une meilleure prise en compte de la quantité d’azote racinaire pour calculer l’efficacité d’utilisation de l’azote par la plante.

La teneur en azote des rhizomes est influencée par les stades de développement et la fertilisation. Les p-valeurs associées à ces facteurs sont cependant peu significatives (toutes deux $< 0,05$) et le test SNK ne montre pas de moyennes significativement différentes en ce qui concerne l’effet du stade. La modalité non fertilisée a cependant une teneur en azote des rhizomes significativement plus basse que les deux modalités fertilisées.

Les biomasses sèches des rhizomes ainsi que les teneurs en carbone et les quantités de carbone

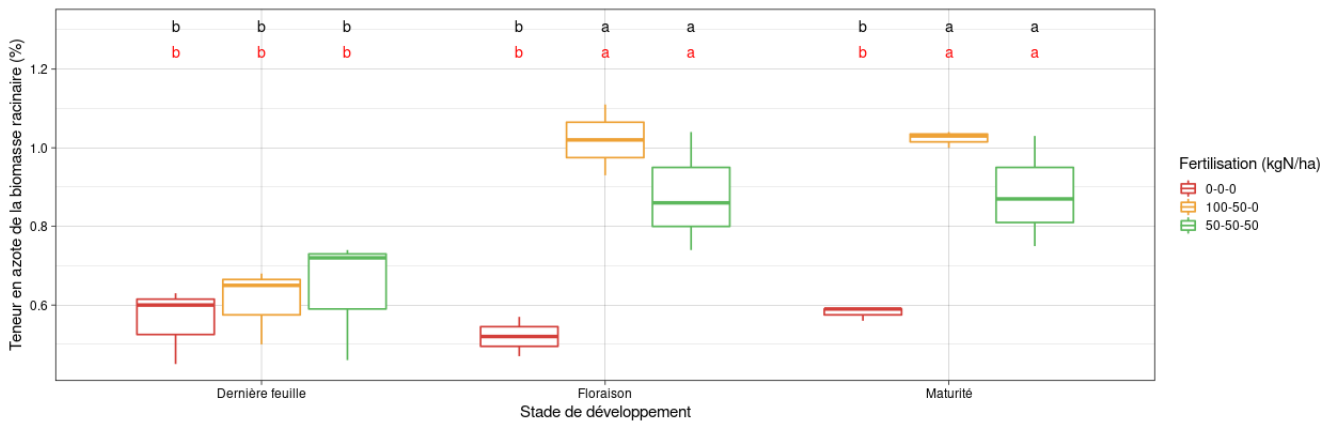


FIGURE 3.4 – Evolution de la teneur en azote de la biomasse racinaire sèche de l’essai K17 en fonction du stade de développement et de la fertilisation. Les lettres noires correspondent aux résultats du tests SNK pour le facteur *stade de développement*. Les lettres rouges correspondent aux résultats du test SNK pour le facteur *fertilisation*.

et d’azote moyens sont reprises dans le tableau 3.2. Aucune de ces valeurs ne varie au cours de la saison de culture étudiée et ce, quelle que soit la fertilisation appliquée.

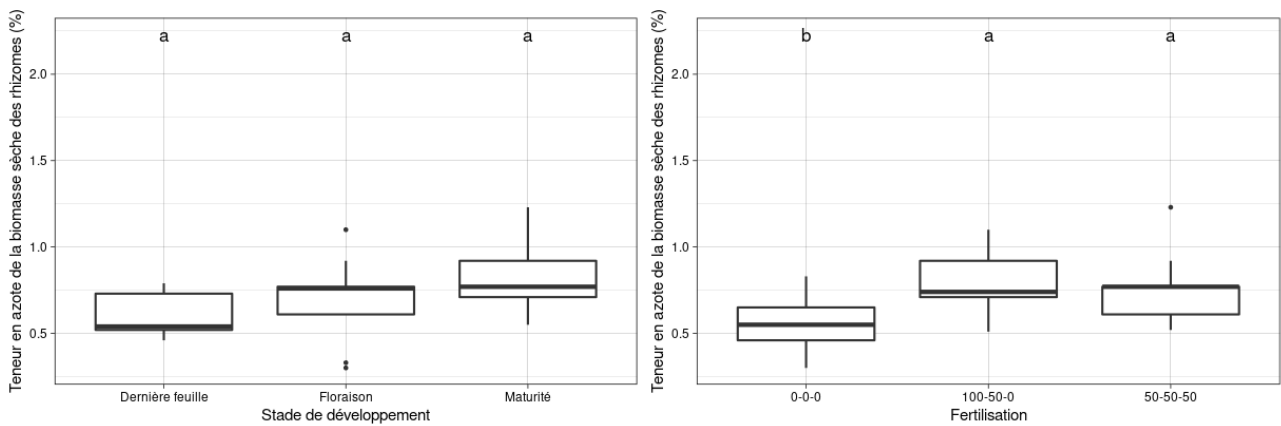


FIGURE 3.5 – Evolution de la teneur en azote de la biomasse sèche des rhizomes de l’essai K17 en fonction du stade de développement (graphique de gauche) et de la fertilisation (graphique de droite). Les lettres correspondent aux résultats des tests SNK.

Variable	Valeur moyenne	Unité
MS	0,51±0,26	t/ha
%C	42,97±1,5	% de la biomasse sèche
QC	0,24±0,11	t/ha
QN	1,64±0,88	kgN/ha

TABLE 3.2 – Valeurs moyennes de la biomasse sèche, de la teneur en carbone et de la quantité de carbone et azote dans les rhizomes de l’essai K17.

3.1.2 Essai K19

Le tableau 3.3 présente un résumé des résultats des ANOVA à deux facteurs fixes et un facteur aléatoire ou à un facteur fixe et un facteur aléatoire réalisées pour étudier différents paramètres des organes souterrains prélevés sur 15 cm de l’essai K19. Les valeurs reprises dans ce tableau sont les statistiques de tests obtenus grâce aux ANOVA. Les cellules grisées mettent en relief les facteurs qui affectent significativement les variables. Contrairement à l’essai K17 qui a fait l’objet d’analyses pour toutes ses modalités, une seule modalité d’interligne de semis a été testée pour les contenus en azote et en carbone. Les conditions d’application ont été respectées pour chaque analyse de la variance. De plus, un stade de prélèvement a pu être ajouté par rapport à l’essai K17, pour étudier la production de matière sèche des racines et des rhizomes au stade végétatif d’automne. Ce dernier prélèvement tardif n’a malheureusement pas pu être analysé dans ses contenus en carbone et en azote.

Racines						
Source de variation	DF	MS	%C	%N	Quantité C	Quantité N
Stade de développement (S)	3	61,27	11,27	7,20	5,91	3,36
Interligne (I)	1	1,58				
Bloc (R)	3	4,69	1,61	16,40	0,45	2,14
S x I	3	2,89				
Rhizomes						
Source de variation	DF	MS	%C	%N	Quantité C	Quantité N
Stade de développement (S)	3	0,72	46,77	0,84	0,60	0,18
Interligne (I)	1	0,97				
Bloc (R)	3	1,14	61,68	2,04	0,12	0,18
S x I	3	0,70				

TABLE 3.3 – Résultats des différentes ANOVA sur les différents paramètres étudiés de la biomasse souterraine de l’essai K19.

La biomasse racinaire est uniquement influencée par le stade développement (tableau 3.3). Elle diminue fortement entre la dernière feuille et la floraison mais reste par la suite constante jusqu’au stade végétatif d’automne (voir figure 3.6, graphe de gauche). Concernant la teneur en carbone des racines, elle est aussi uniquement influencée par le stade de développement (voir figure 3.6, graphe de droite). Une augmentation significative de cette teneur est observée du stade dernière feuille au stade maturité physiologique, bien que les teneurs en carbone au stade floraison et maturité physiologique soient similaires. Contrairement à l’essai K17, la quantité totale de carbone dans les racines n’est pas significativement influencée par les stades de développement malgré une biomasse qui diminue de la même façon. Cette quantité de carbone s’élève à 1,37 t/ha ± 0,60 t/ha sur la saison de croissance.

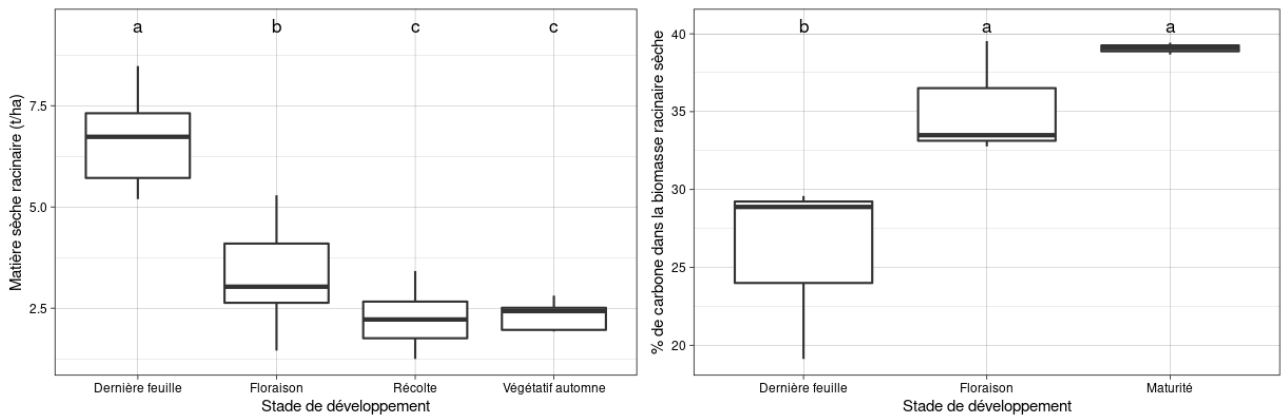


FIGURE 3.6 – Evolution de la biomasse sèche racinaire de l’essai K19 en fonction du stade de développement (graphique de gauche) et évolution de la quantité totale de carbone racinaire en fonction des stades de développement (graphique de droite). Les lettres correspondent aux résultats des tests SNK.

La teneur et la quantité d’azote dans les racines ne sont pas influencées par le stade de développement (table 3.3). Celles-ci sont en moyenne respectivement de $0,91\% \pm 0,24\%$ et $11,92 \text{ kgN/ha} \pm 4,77 \text{ kgN/ha}$ durant la saison de croissance étudiée.

La matière sèche produite par les rhizomes ainsi que leurs teneurs et quantités de carbone et d’azote ne sont pas influencées par le stade de développement. La production de matière sèche n’est pas non plus influencée par l’interligne. Les valeurs moyennes de ces paramètres sont reprises dans le tableau 3.4.

Variable	Valeur moyenne	Unité
MS	$0,27 \pm 0,1$	t/ha
%C	$39,21 \pm 7,89$	% de la biomasse sèche
%N	$0,93 \pm 0,21$	% de la biomasse sèche
QC	$0,13 \pm 0,05$	t/ha
QN	$1,22 \pm 0,47$	kgN/ha

TABLE 3.4 – Valeurs moyennes de la biomasse sèche, de la teneur en carbone et azote et de la quantité de carbone et azote dans les rhizomes de l’essai K19.

3.1.3 Discussion sur les résultats des biomasses de rhizomes des deux essais

En moyenne, la biomasse des rhizomes constitue 8% de la biomasse souterraine totale pour les deux essais. Cette proportion est deux fois moins élevée que les valeurs mesurées par SAKIROGLU et al. 2020. Cette différence pourrait provenir d’une différente méthodologie car le tri des deux types d’organes dans l’étude s’effectue avant séchage. Une autre explication pourrait provenir du tri des organes, en effet il est apparu qu’il existait une grande diversité de formes de rhizomes. Les rhizomes morts n’ont ainsi pas été différenciés des rhizomes vivants. De plus, des rhizomes jeunes, très proches morphologiquement de tiges aériennes ont été rencontrés à côté de rhizomes plus lignifiés vraisemblablement plus vieux présentant des racines au niveau de leurs noeuds et reliant deux plantes entre elles.

3.1.4 Comparaison des deux essais

Le tableau 3.5 présente un résumé des résultats des ANOVA à deux facteurs fixes réalisées pour étudier la biomasse des organes souterrains prélevés à 15 cm des essais K19 et K17 ayant reçu la même fertilisation. Les valeurs reprises dans ce tableau sont les statistiques de tests obtenues grâce aux ANOVA. Les cellules grisées mettent en relief les facteurs qui affectent significativement les variables.

Source de variation	DF	MS racines	MS rhizomes
Stade de développement (S)	2	15,87	2,58
Age (A)	1	5,40	12,68
S x A	2	0,09	4,44

TABLE 3.5 – Résultats des différentes ANOVA sur les différents paramètres étudiés de la biomasse souterraine pour comparer les essais K17 et K19.

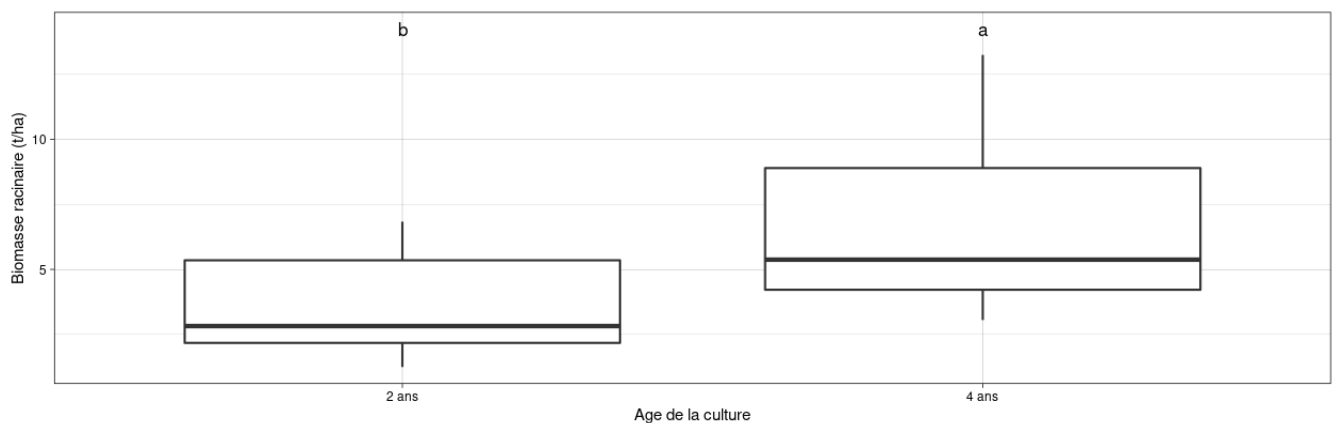


FIGURE 3.7 – Comparaison des biomasses sèches de racines entre modalités des essais K17 (4 ans) et K19 (2ans) similaires. Les lettres correspondent aux résultats du test SNK.

La biomasse racinaire est significativement influencée par le stade de développement selon la même tendance que présentée dans les sections précédentes. Un effet significatif de l'âge de la culture est aussi constaté, avec une biomasse racinaire significativement supérieure pour la culture la plus âgée (voir figure 3.7).

Les biomasses racinaires pour la culture âgée de deux ans sont similaires aux résultats de PUGLIESE, CULMAN et SPRUNGER 2019, DUCHENE, CELETTE et al. 2020 et SAKIROGLU et al. 2020 à des profondeurs similaires. Elles sont cependant plus faibles que celles présentées dans l'étude de SPRUNGER et al. 2018 qui présentent des biomasses de l'ordre de 6,5 t/ha. Cette différence pourrait provenir du fait que les prélèvements de cette étude ont été effectués en juin qui semble être la période où la biomasse racinaire est la plus élevée.

La biomasse des rhizomes est significativement influencée par l'âge de la culture et l'interaction entre l'âge et le stade de développement. La biomasse des rhizomes est plus élevée pour la culture la plus âgée (voir figure 3.8).

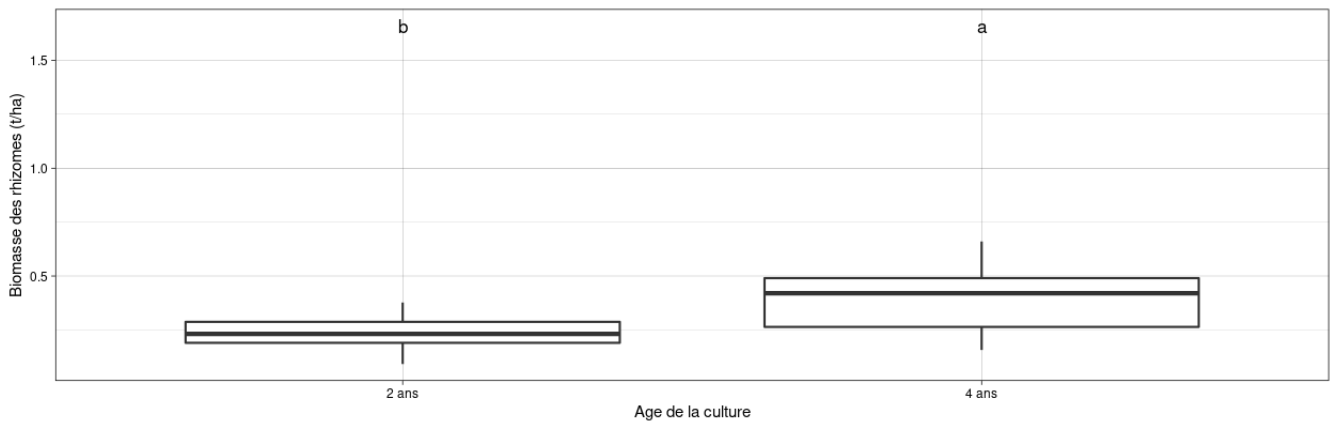


FIGURE 3.8 – Comparaison des biomasses sèches des rhizomes entre modalités des essais K17 (4 ans) et K19 (2 ans) similaires. Les lettres correspondent aux résultats du test SNK.

3.1.5 Analyse en profondeur de la biomasse racinaire pour deux cultures d'âges différents

Le tableau 3.6 reprend les résultats des ANOVA à deux facteurs fixes réalisés pour étudier la biomasse racinaire en fonction de la profondeur de prélèvements pour les essais K17 et K19. La profondeur est le seul facteur qui impacte significativement la biomasse racinaire. Le résultat du test SNK montre que les biomasses racinaires au-dessus de 30 cm de profondeur sont les plus élevées (figure 3.9).

Source de variation	DF	MS racines
Age (A)	1	2,75
Profondeur (P)	2	15,39
A x P	2	1,02

TABLE 3.6 – Résultats des différentes ANOVA sur les différents paramètres étudiés de la biomasse souterraine pour comparer les essais K17 et K19.

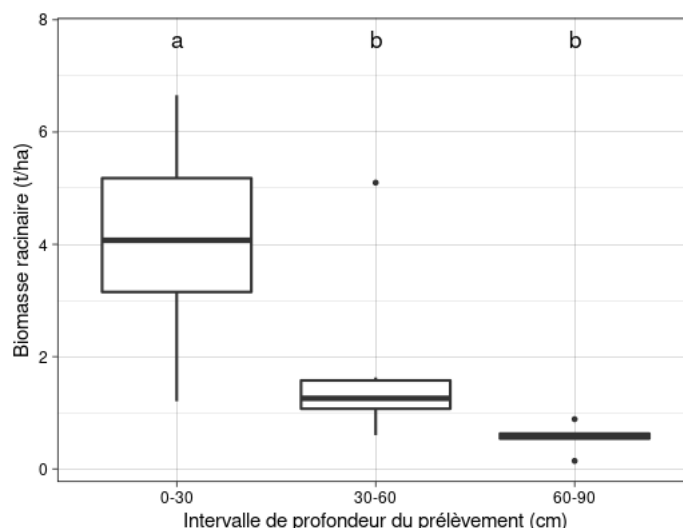


FIGURE 3.9 – Biomasse racinaire (t/ha) en fonction de la profondeur de prélèvement (cm) pour les modalités similaires des essais K17 et K19 confondus. Les lettres correspondent aux résultats du test SNK.

Le fait que l'impact de l'âge ne soit pas significatif est en contradiction avec les résultats présentés au point 3.1.4. Ceci pourrait être dû au faible diamètre de la sonde utilisée pour les échantillonnages. BÖHM 1979 met en effet en lumière l'importance du diamètre de la sonde utilisée pour les prélèvements et précise qu'une sonde de diamètre compris entre 5 et 7 cm de diamètre est un minimum. La sonde de 3 cm utilisée pour les prélèvements présentés dans ce travail pourrait expliquer cette absence d'effet âge alors qu'il a été montré avec des prélèvements effectués par carottages de diamètre beaucoup plus élevé. La très grande chute de biomasse racinaire en dessous de 30 cm suit une tendance similaire à ce qui est constaté par SAKIROGLU et al. 2020, SPRUNGER et al. 2018 et PUGLIESE, CULMAN et SPRUNGER 2019 avec une biomasse racinaire d'environ 0,5 t/ha en dessous de cette profondeur.

3.2 Calibration et validation du modèle pour kernza

Cette partie présente les performances finales du modèle obtenues après le processus de calibration des paramètres. Les résultats seront d'abord présentés pour kernza *prairie*, puis pour kernza *céréale*. Finalement, une dernière partie présentera les valeurs finales des paramètres optimisés obtenues pour les paramètres en fonction des deux approches.

3.2.1 Résultats en considérant kernza comme une graminée prairiale pérenne

Tous les graphes présentés dans cette section suivent le même code couleur pour différencier les années les unes des autres. Ainsi, l'année 2018 sera représentée en vert, 2019 en orange, 2020 en mauve et 2021 en rose. Pour chaque variable, des graphes seront présentés pour illustrer la concordance entre les données observées et simulées pour chaque année reprenant tout le jeu de données. Des tableaux présenteront les critères statistiques d'évaluation des performances du modèle (voir point 2.4.5 du matériel et méthode). Lorsque cela est pertinent, les critères excluant la seconde période de culture seront aussi présentés dans ce tableau.

Phénologie

Les graphes figure 3.10 représentent les données estimées par le modèle en fonction des valeurs observées d'occurrence des stades phénologiques. Les critères d'évaluation des performances du modèle sont repris sur les graphes et dans le tableau 3.7. Les graphes (figure 3.10) illustrent les bonnes performances du modèle avec une déviation de la droite $x=y$ très faible. Les valeurs concernant les besoins en vernalisation et photopériode paramétrées grâce aux valeurs déterminées dans DUCHENE, DUMONT et al. 2021 semblent donc assez robustes pour se confronter à un nouveau set de données.

La figure 3.11 présente les différences entre les jours d'occurrence des stades observés et simulés pour le set de calibration qui semble souffrir d'un décalage systématique en dessous de la droite $x=y$. Ce décalage n'a pas pu être corrigé par la calibration, des changements de valeurs des paramètres induisant des critères moins bons et des dispersions plus importantes des résultats. Ce graphe suggère l'existence d'un changement physiologique dans les besoins en accumulation de degré jour de la plante à mesure du vieillissement de la culture. Cependant, ceci doit être considéré avec prudence, les observations des stades physiologiques sur le terrain ont été effectuées à une semaine d'intervalle chacune sur des populations hétérogènes. Le stade de développement observé est de plus une moyenne des stades constatés sur plusieurs individus de ces populations. Le décalage observé avec cette modélisation pourrait donc être un artéfact de la prise de mesure et de l'incapacité du modèle à reproduire l'hétérogénéité d'une population de *Th. intermedium*.

	RMSE (jours)	EF	R ²	ND
calibration	8,604	0,959	0,989	0,04
validation	6,892	0,975	0,99	0,026

TABLE 3.7 – Critères statistiques pour l'évaluation de la simulation de la phénologie par le modèle, les cellules grisées indiquent les critères rencontrant les niveaux d'acceptabilité.

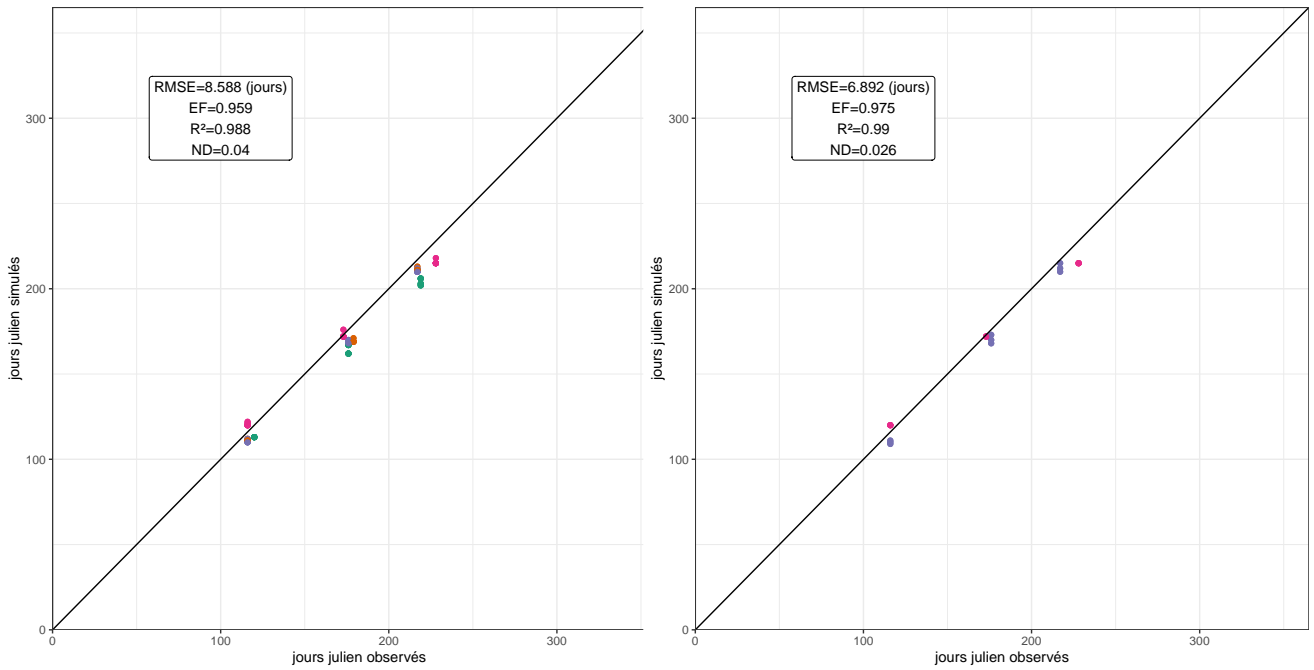


FIGURE 3.10 – Occurrence des stades phénologiques BBCH30, BBCH65 et BBCH89 dans les simulations par rapport à leur occurrence réelle en jours juliens depuis la dernière récolte pour le set de calibration à gauche et le set de validation à droite. L'année 2018 est représentée en vert •, 2019 en orange •, 2020 en mauve • et 2021 en rose •. La droite noire représente l'équation $x=y$.

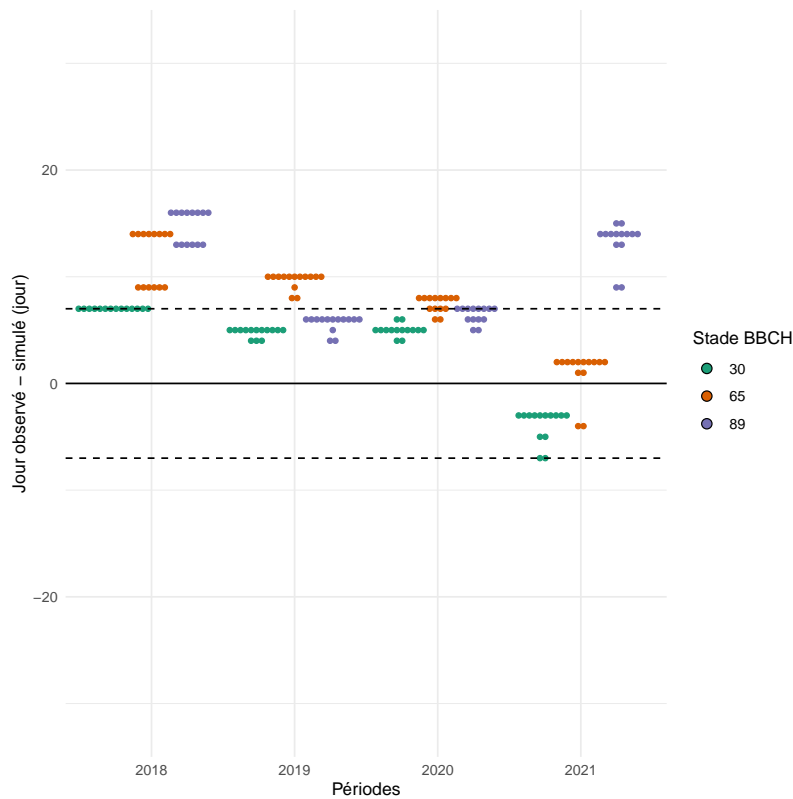


FIGURE 3.11 – Différence d'occurrence des stades phénologiques BBCH30, BBCH65 et BBCH89 dans les simulations par rapport à leur occurrence réelle en jours juliens depuis le début de l'année de la simulation. La droite noire représente le 0. Les deux droites pointillées représentent 7 et -7 jours.

Leaf Area Index

Les graphes figure 3.12 représentent les données estimées par le modèle en fonction des valeurs observées de LAI. Les critères d'évaluation des performances du modèle sont repris sur les graphes et dans le tableau 3.8. Ces critères ne remplissent pas, dans leur majorité, les niveaux d'acceptabilité. La capacité du modèle à simuler le LAI est particulièrement mauvaise sur le set de validation et aucun critère ne rencontre les niveaux d'acceptabilité (voir figures 3.12 graphe de droite et tableau 3.8). Concernant le set de validation, l'ignorance de la deuxième période culturale permet d'améliorer certains critères sans toutefois qu'ils atteignent les niveaux d'acceptabilité (voir tableau 3.8).

Selon BRISSON, LAUNAY et al. 2009, la modélisation du LAI fait l'objet de nombreuses approches différentes plus ou moins fructueuses selon les cultures considérées. STICS adopte une approche généraliste (au contraire de modèles simulant chaque feuille individuellement) qui ne s'avère pas robuste dans tous les cas de figure. Néanmoins, l'étude de la dynamique du LAI simulé grâce aux graphes de valeurs de LAI journaliers permet de constater que sa tendance est globalement bien modélisée.

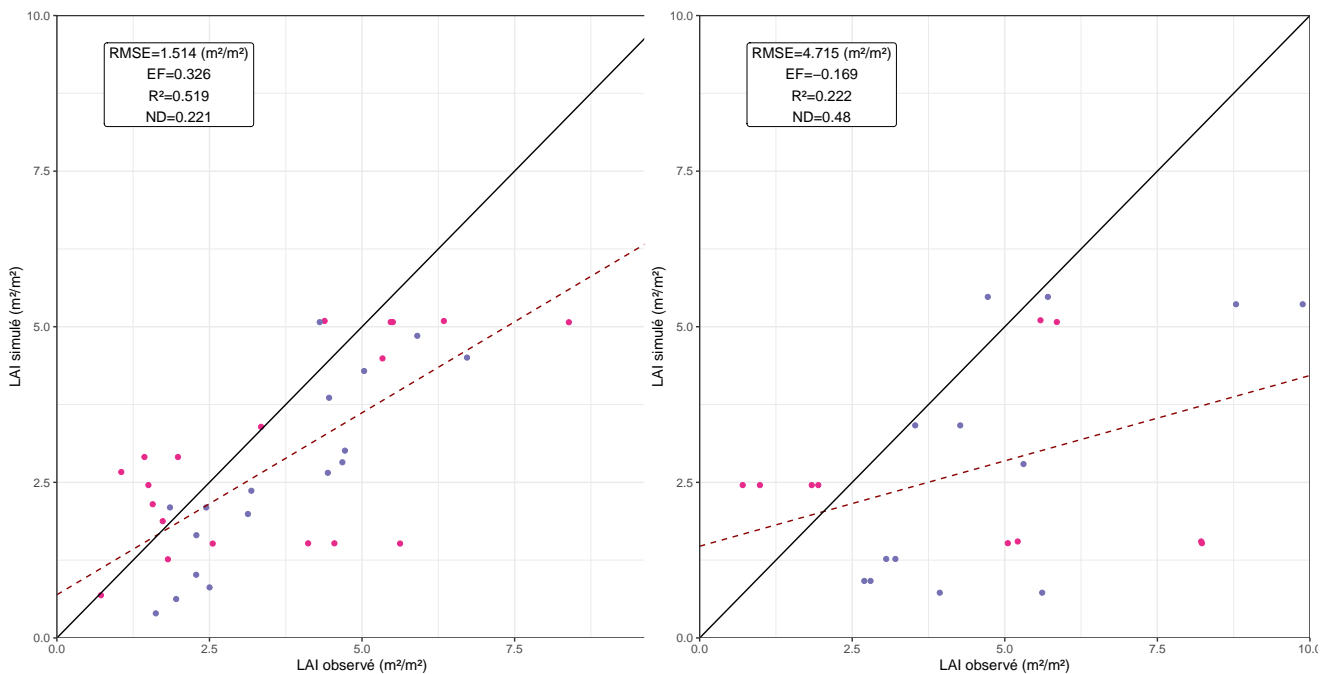


FIGURE 3.12 – LAI simulé en fonction du LAI observé Pour le set de calibration (figure de gauche) et le set de validation (figure de droite). L'année 2020 est représentée en mauve • et 2021 en rose •. La droite noire représente l'équation $x=y$ et la droite discontinue rouge représente la droite de régressions des valeurs.

	RMSE (m^2/m^2)	EF	R ²	ND
calibration	1,514	0,326	0,51	0,221
validation	4,715	-0,169	0,222	0,48
validation sans 2ème année	2,597	-0,461	0,475	0,415

TABLE 3.8 – Critères statistiques pour l'évaluation de la simulation de la variable LAI par le modèle, les cellules grisées indiquent les critères rencontrant les niveaux d'acceptabilité.

Matière sèche

La matière sèche simulée par rapport à la matière sèche observée est présentée sur les graphes figure 3.13. Les critères repris dans le tableau 3.9 indiquent de bonnes performances du modèle à simuler la biomasse sèche. Lorsque la deuxième période de culture est ignorée, les différents critères de validation s'en retrouvent fortement améliorés et remplissent en majorité les critères d'acceptabilité (voir tableau 3.9).

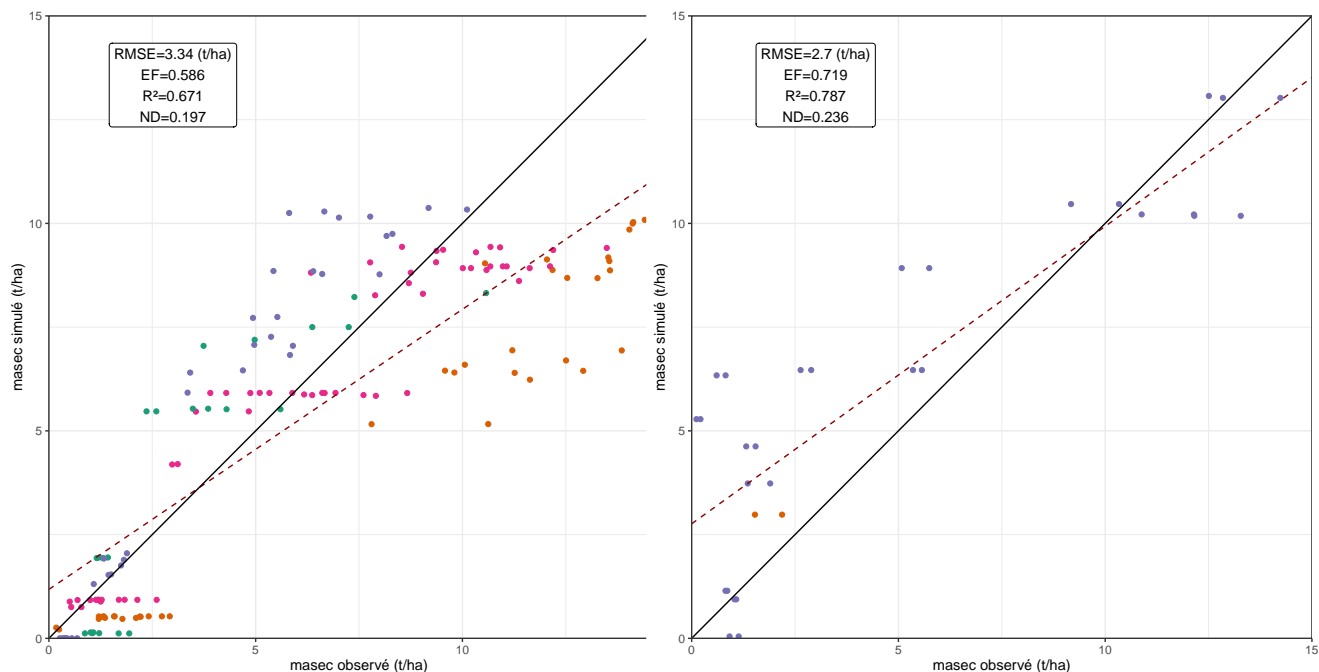


FIGURE 3.13 – Matière sèche simulée en fonction des valeurs observées pour le set de calibration (à gauche) et de validation (à droite). L'année 2018 est représentée en vert •, 2019 en orange •, 2020 en mauve • et 2021 en rose •. La droite noire représente l'équation $x=y$ et la droite discontinue rouge représente la droite de régressions des valeurs.

	RMSE (t/ha)	EF	R^2	ND
calibration	3,34	0,586	0,67	0,197
calibration sans 2ème année	1,629	0,795	0,806	0,042
validation	2,822	0,704	0,713	0,015
validation sans 2ème année	2,7	0,719	0,787	0,236

TABLE 3.9 – Critères statistiques pour l'évaluation de la simulation de la variable matière sèche par le modèle, les cellules grisées indiquent les critères rencontrant les niveaux d'acceptabilité.

Concernant le set de validation, les critères restent majoritairement dans les valeurs d'acceptabilité lorsque la seconde année est ignorée (tableau 3.9), à l'exception du ND qui se détériore.

Quantités d'azotes dans la plante

La comparaison des quantités d'azote présentes dans la plante simulées par rapport aux observées sont présentées dans les graphes figure 3.14. Lorsque la seconde période de culture est ignorée, le RMSE et le R^2 sont améliorés pour le set de calibration à l'inverse de l'EF et ND qui se détériorent (voir tableau 3.10). Ceci indique que les valeurs sont moins dispersées mais que le modèle est moins performant pour simuler la variable. Confronté aux données de validation,

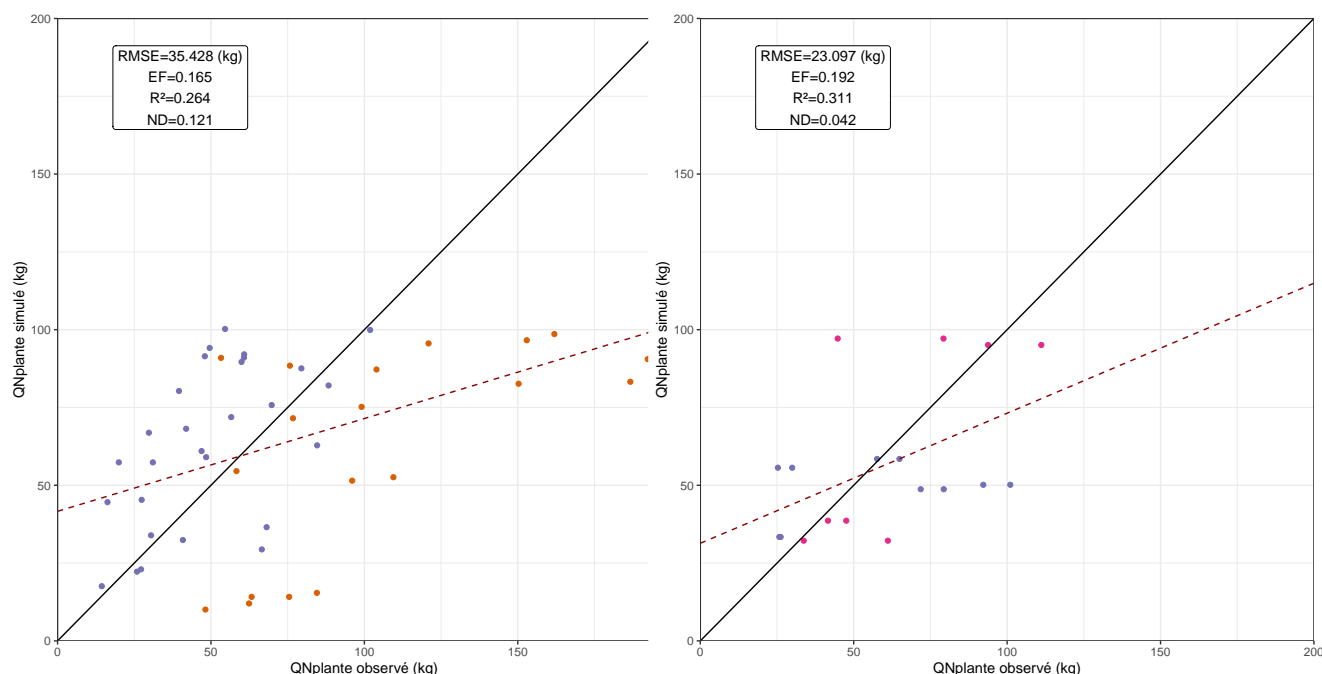


FIGURE 3.14 – Quantité d'azote dans la plante simulée en fonction des valeurs observées en kgN/ha. L'année 2019 est représentée en orange •, 2020 en mauve • et 2021 en rose •. La droite noire représente l'équation $x=y$ et la droite discontinue rouge représente la droite de régressions des valeurs.

le modèle ne se comporte pas avec l'efficacité attendue (tableau 3.10) et les critères sont tous détériorés par l'ignorance de la seconde période culturale.

	RMSE (kgN/ha)	EF	R^2	ND
calibration	35,428	0,165	0,264	0,121
calibration sans 2ème année	21,101	-0,068	0,533	0,23
validation	23,097	0,192	0,311	0,042
validation sans 2ème année	27,5	0,008	0,095	0,142

TABLE 3.10 – Critères statistiques pour l'évaluation de la simulation de la variable QNplante par le modèle, les cellules grisées indiquent les critères rencontrant les niveaux d'acceptabilité.

Rendement grains

La comparaison des rendements en grains observés et simulés est présentée dans les graphes figure 3.15. L'utilisation d'un indice de récolte même calibré (valeur finale :0,11) pour améliorer les critères ne permet pas de simuler convenablement le rendement en grains pour kernza *prairie* bien que cette approche montre de bons résultats pour simuler la biomasse totale. Les critères

présentés dans le tableau 3.11 sont de ce fait tous médiocres à l'exception du R^2 pour le set de validation qui illustre simplement le faible écart des valeurs par rapport à leur droite de régression.

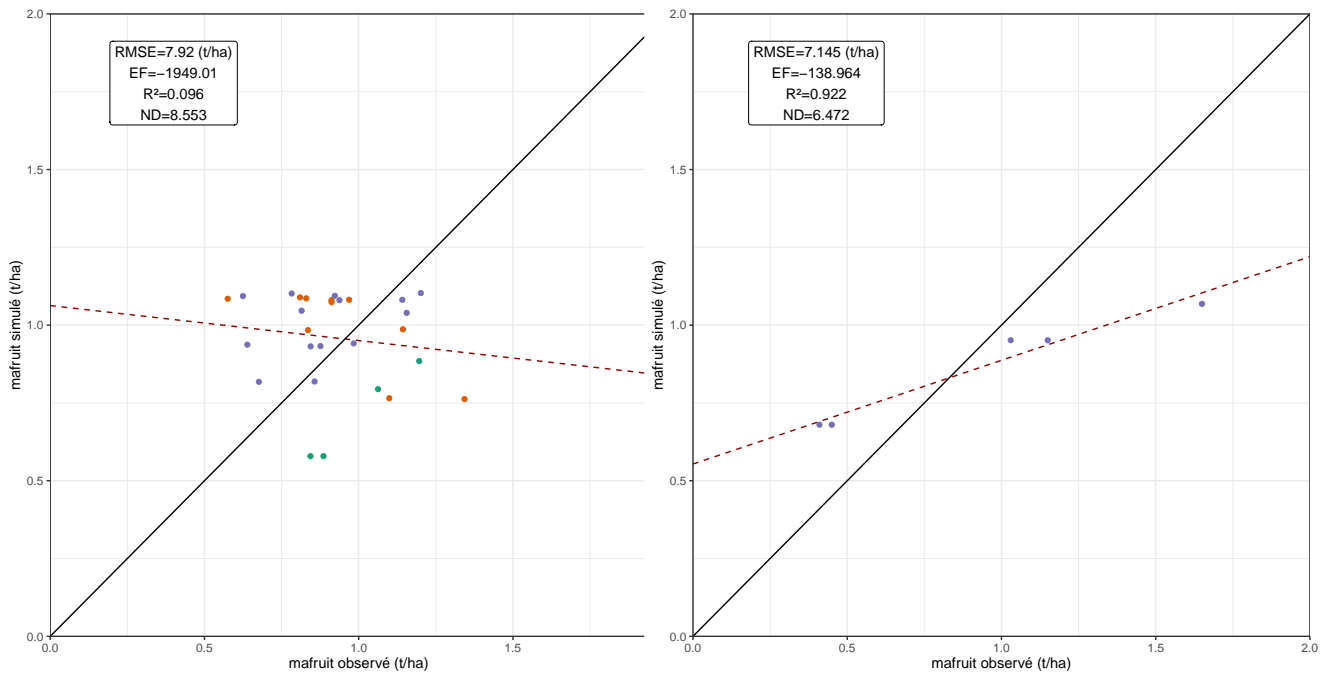


FIGURE 3.15 – Rendements grain simulés en fonction des valeurs observées pour le set de calibration (à gauche) et le set de validation (à droite). L'année 2018 est représentée en vert •, 2019 en orange • et 2020 en mauve •. La droite noire représente l'équation $x=y$ et la droite discontinue rouge représente la droite de régressions des valeurs.

	RMSE (t/ha)	EF	R^2	ND
calibration	7,92	-1949	0,096	8,553
calibration sans 2ème année	7,811	-2664,645	0,26	9,253
validation	7,145	-138,964	0,922	6,472

TABLE 3.11 – Critères statistiques pour l'évaluation de la simulation de la variable mafruit par le modèle, les cellules grisées indiquent les critères rencontrant les niveaux d'acceptabilité.

Biomasse racinaire

La comparaison des biomasses racinaires observées et simulées est présentée dans les graphes figure 3.16. Les performances du modèle sont médiocres pour le set de calibration et le set de validation, aucun critère n'atteint en effet les seuils d'acceptabilité (voir tableau 3.12). La très bonne valeur de R^2 illustre simplement le fait que les valeurs dévient peu de leur droite de régression.

Plusieurs éléments peuvent expliquer les mauvaises performances de STICs pour simuler la biomasse racinaire de kernza. Tout d'abord, les observations sont très parcellaires et ne permettent pas de rendre compte de l'évolution de l'appareil racinaire de la plante sur plusieurs années. Ensuite, STICS ne simule pas réellement une biomasse racinaire mais calcule cette biomasse à posteriori sur base de la densité et longueur racinaire (BRISSON, LAUNAY et al. 2009). Ainsi, le modèle ne reproduit pas la dynamique observée de diminution de la biomasse racinaire au cours de l'été et l'automne. Enfin, STICS simule la mortalité de la totalité des racines lorsqu'une fauche est effectuée. Tous ces éléments expliquent l'incapacité du modèle à correctement simuler la biomasse racinaire de kernza *prairie* avec l'approche utilisée dans ce travail. Il est à noter que la mortalité systématique des racines à la fauche pourrait aussi expliquer les mauvaises performances de STICS pour simuler la dynamique de l'azote dans la plante en faisant disparaître tout le stock d'azote présent dans le compartiment fictif des racines.

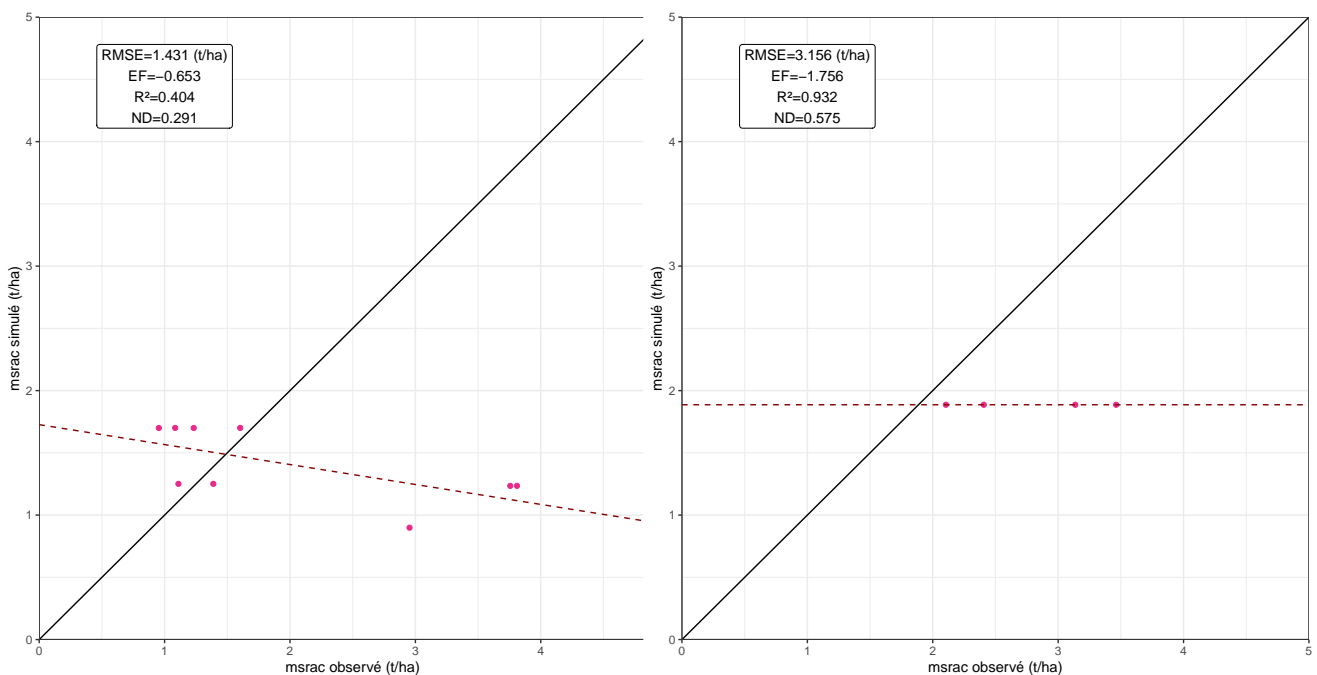


FIGURE 3.16 – Biomasse racinaire simulée en fonction de l'observée en t/ha. L'année 2021 est représentée en rose •. La droite noire représente l'équation $x=y$ et la droite discontinue rouge représente la droite de régressions des valeurs.

	RMSE (t/ha)	EF	R^2	ND
calibration	1,431	-0,653	0,404	0,291
validation	3,156	-1,756	0,932	0,575

TABLE 3.12 – Critères statistiques pour l'évaluation de la simulation de la variable QNplante par le modèle, les cellules grisées indiquent les critères rencontrant les niveaux d'acceptabilité.

3.2.2 Résultats en considérant kernza comme une céréale annuelle

Tous les graphes présentés dans cette section suivent le même code couleur pour différencier les périodes culturales les unes des autres. Ainsi, la période 2017-2018 sera représentée en vert, 2018-2019 en orange, 2019-2020 en mauve et 2020-2021 en rose. Pour chaque variable, des graphes seront présentés pour illustrer la concordance entre les données observées et simulées pour chaque année reprenant tout le jeu de données. Des tableaux présenteront les critères statistiques d'évaluation des performances du modèle (voir point 2.4.5 du matériel et méthode). Lorsque cela est pertinent, les critères excluant la seconde période de culture seront aussi présentés dans ce tableau.

Phénologie

Le graphe 3.17 présente, pour chaque période de culture, la différence (en jour juliens après la récolte) entre l'apparition d'un stade dans la réalité et l'estimation de l'occurrence de ce stade produite par le modèle pour le set de calibration. La phénologie de kernza est très bien simulée par le modèle et tous les critères rencontrent les conditions d'acceptabilité pour le set de calibration et le set de validation (voir tableau 3.13). Ce résultat est similaire à celui obtenu avec l'approche *prairie* avec des valeurs de paramètres identiques après calibration.

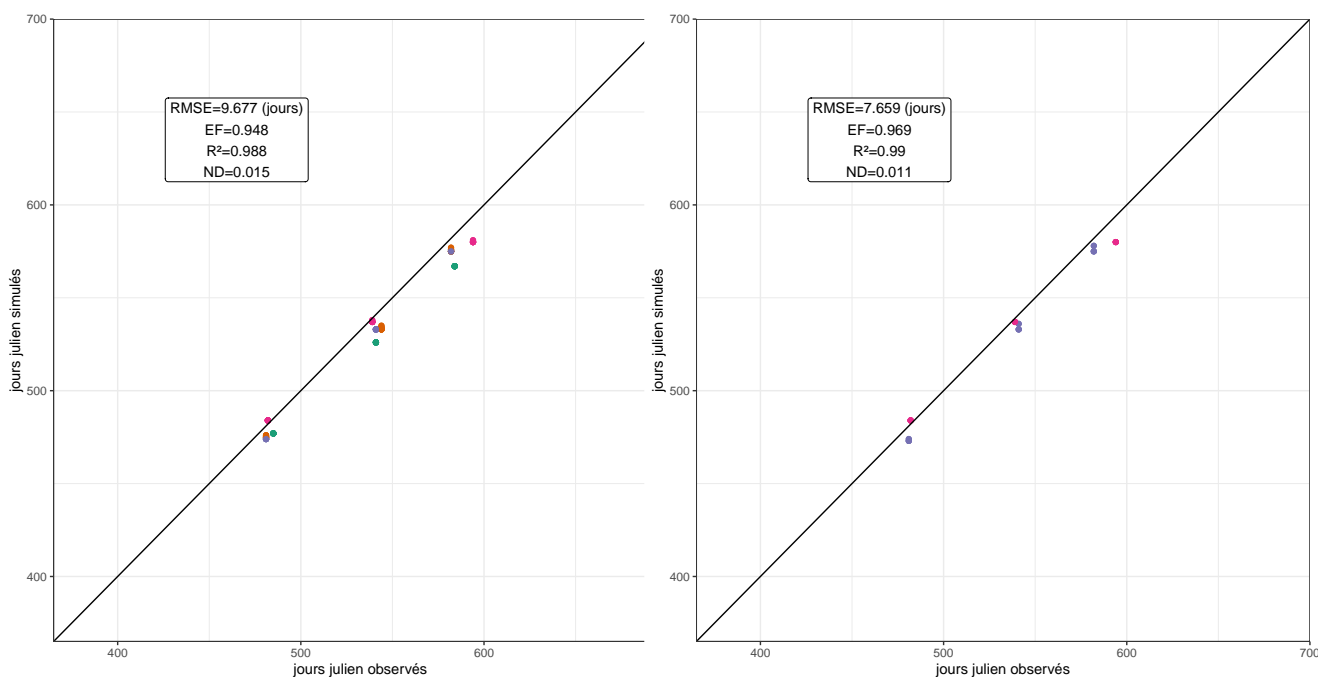


FIGURE 3.17 – Occurrence des stades phénologiques BBCH30, BBCH65 et BBCH89 dans les simulations par rapport à leur occurrence réelle en jours juliens depuis la dernière récolte. Les années 2017-2018 sont représentées en vert •, 2018-2019 en orange •, 2019-2020 en mauve • et 2020-2021 en rose •. La droite noire représente l'équation $x=y$.

	RMSE (jours)	EF	R ²	ND
calibration	9,677	0,948	0,988	0,015
validation	7,659	0,969	0,99	0,011

TABLE 3.13 – Critères statistiques pour l'évaluation de la simulation de la phénologie par le modèle, les cellules grisées indiquent les critères rencontrant les niveaux d'acceptabilité.

Le modèle se comporte très bien avec le set de validation et les critères sont meilleurs qu'avec le set de calibration (tableau 3.13). Ceci peut être dû à la moins grande quantité de données observées et de simulations prises en compte, ce qui limite mécaniquement la dispersion des observations.

Leaf Area Index

Les graphes figure 3.18 représentent les données estimées par le modèle en fonction des valeurs observées de LAI pour le set de calibration et le set de validation. Les critères ne remplissent pas dans leur majorité les niveaux d'acceptabilité pour le set de calibration (tableau 3.14). Les performances du modèle ne rencontrent pas non plus les niveaux d'acceptabilité pour le set de validation bien que les critères de RMSE, R^2 et ND soient améliorés lorsqu'on ignore la seconde période de culture (voir tableau 3.14). Comme pour l'approche *prairie*, le LAI est mal simulé par le modèle. L'étude des courbes dynamiques de variation journalière du LAI permet cependant de voir que la tendance simulée est proche de celle observée et que la dynamique est reproduite.

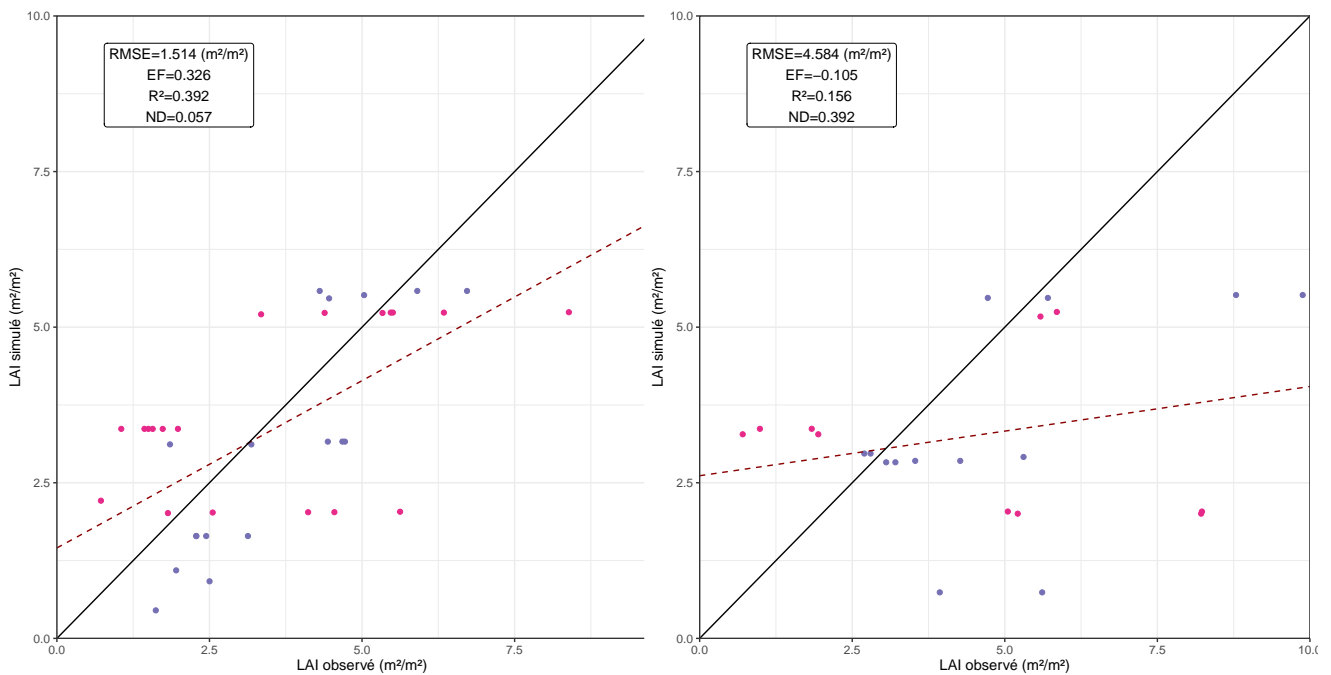


FIGURE 3.18 – LAI simulé en fonction du LAI observé pour le set de calibration (à gauche) et le set de validation (à droite). Les années 2019-2020 sont représentées en mauve • et 2020-2021 en rose •. La droite noire représente l'équation $x=y$ et la droite discontinue rouge représente la droite de régressions des valeurs.

	RMSE (m^2/m^2)	EF	R^2	ND
calibration	1,514	0,326	0,392	0,057
validation	4,584	-0,105	0,156	0,392
validation sans 2ème période	2,367	-0,213	0,323	0,312

TABLE 3.14 – Critères statistiques pour l'évaluation de la simulation de la variable LAI par le modèle, les cellules grisées indiquent les critères rencontrant les niveaux d'acceptabilité.

Matière sèche

La matière sèche simulée par rapport à la matière sèche observée est présentée sur les graphes figure 3.19 pour le set de calibration et le set de validation. Les différents critères sont améliorés lorsque la deuxième période culturale est ignorée pour le set de calibration (voir tableau 3.15).

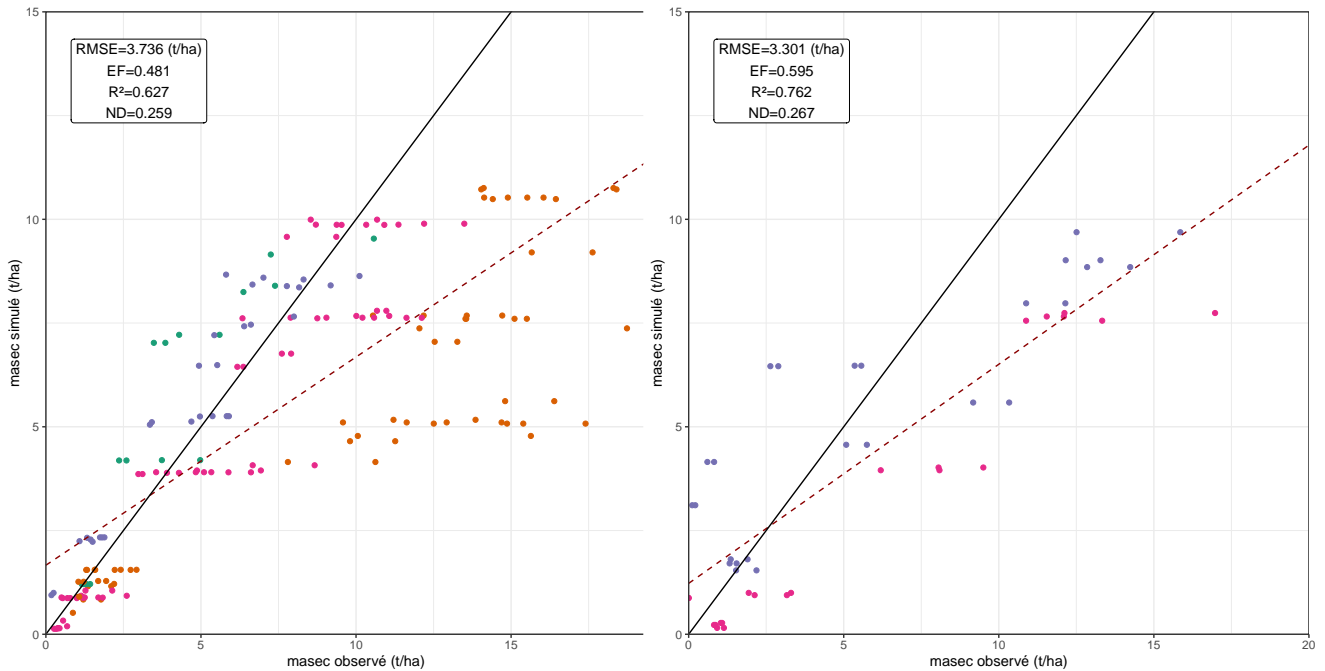


FIGURE 3.19 – Matière sèche simulée en fonction des valeurs observées en t/ha pour le set de calibration (à gauche) et le set de validation (à droite). Les années 2017-2018 sont représentées en vert •, 2018-2019 en orange •, 2019-2020 en mauve • et 2020-2021 en rose •. La droite noire représente l'équation $x=y$ et la droite discontinue rouge représente la droite de régressions des valeurs.

Concernant le set de validation, les critères restent majoritairement dans les valeurs d'acceptabilité (tableau 3.15). Leurs valeurs sont également améliorées lorsque la deuxième période culturale est ignorée comme pour le set de calibration. Malgré cette amélioration, le ND ne rencontre pas les seuils d'acceptabilité.

	RMSE (t/ha)	EF	R ²	ND
calibration	3,736	0,481	0,627	0,259
calibration sans 2ème période	1,582	0,807	0,81	0,034
validation	3,301	0,595	0,762	0,267
validation sans 2ème période	3,121	0,636	0,775	0,126

TABLE 3.15 – Critères statistiques pour l'évaluation de la simulation de la matière sèche par le modèle, les cellules grisées indiquent les critères rencontrant les niveaux d'acceptabilité.

Rendement grains

Le rendement en grain simulé par rapport au rendement observé est présenté dans les graphes figure 3.20 pour le set de calibration et le set de validation. Comme pour la matière sèche, les critères du modèle sont améliorés lorsque la période 2018-2019 est ignorée (tableau 3.16) pour le set de calibration.

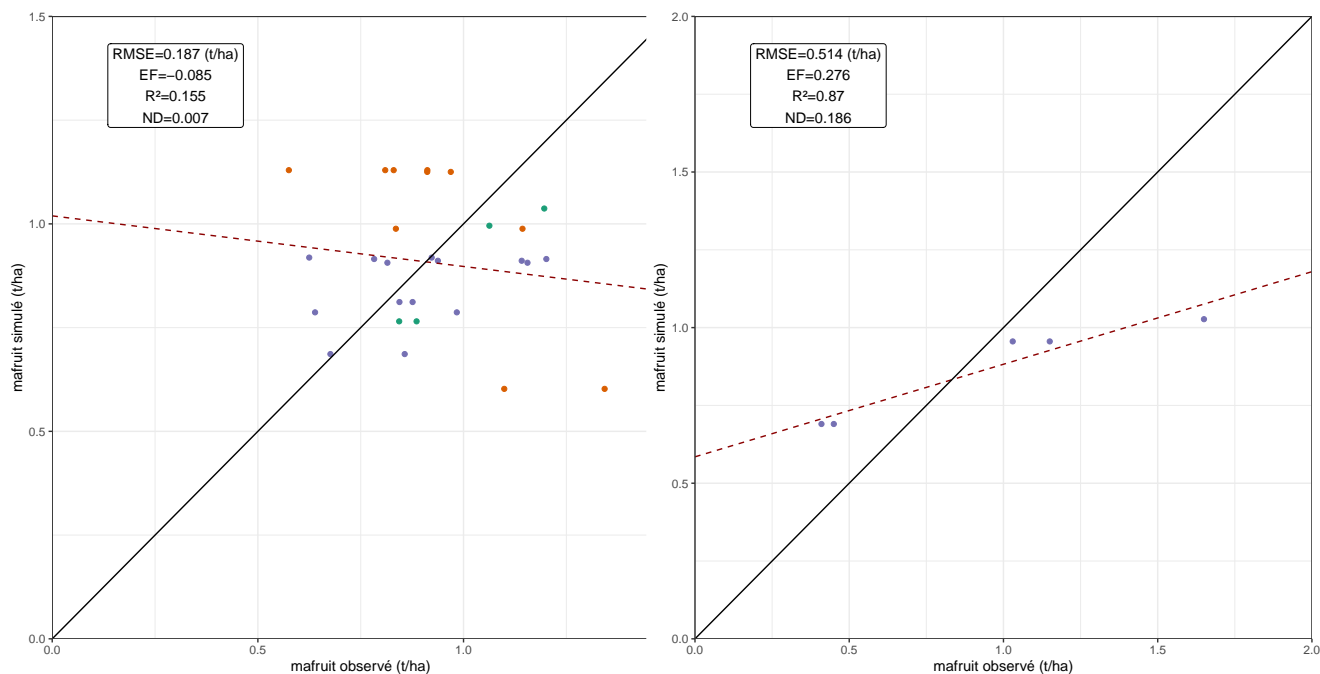


FIGURE 3.20 – Rendement grains simulé en fonction des valeurs observées (t/ha). Les années 2017-2018 sont représentées en vert •, 2018-2019 en orange • et 2019-2020 en mauve •. La droite noire représente l'équation $x=y$ et la droite discontinue rouge représente la droite de régressions des valeurs.

Le rendement en grain estimé par le modèle pour le set de validation ne valide pas les critères d'acceptabilité. Le RMSE de 0,5 t/ha est très élevé comparé aux rendements obtenus qui sont compris entre 0,3 et 1,75 t/ha.

	RMSE (t/ha)	EF	R ²	ND
calibration	0,187	-0,085	0,155	0,007
calibration sans 2ème année	0,077	0,742	0,86	0,033
validation	0,514	0,276	0,87	0,186

TABLE 3.16 – Critères statistiques pour l'évaluation de la simulation de la variable mafruit par le modèle, les cellules grisées indiquent les critères rencontrant les niveaux d'acceptabilité.

Quantités d'azotes dans la plante

La quantité d'azote dans la plante simulée par rapport à celle observée est présentée dans les graphes figure 3.21 pour le set de calibration et le set de validation. Comme pour le rendement grain et la matière sèche, les critères sont améliorés en ignorant la période de culture 2018-2019 (voir tableau 3.17). Confronté aux données de validation, le modèle se comporte mieux qu'avec

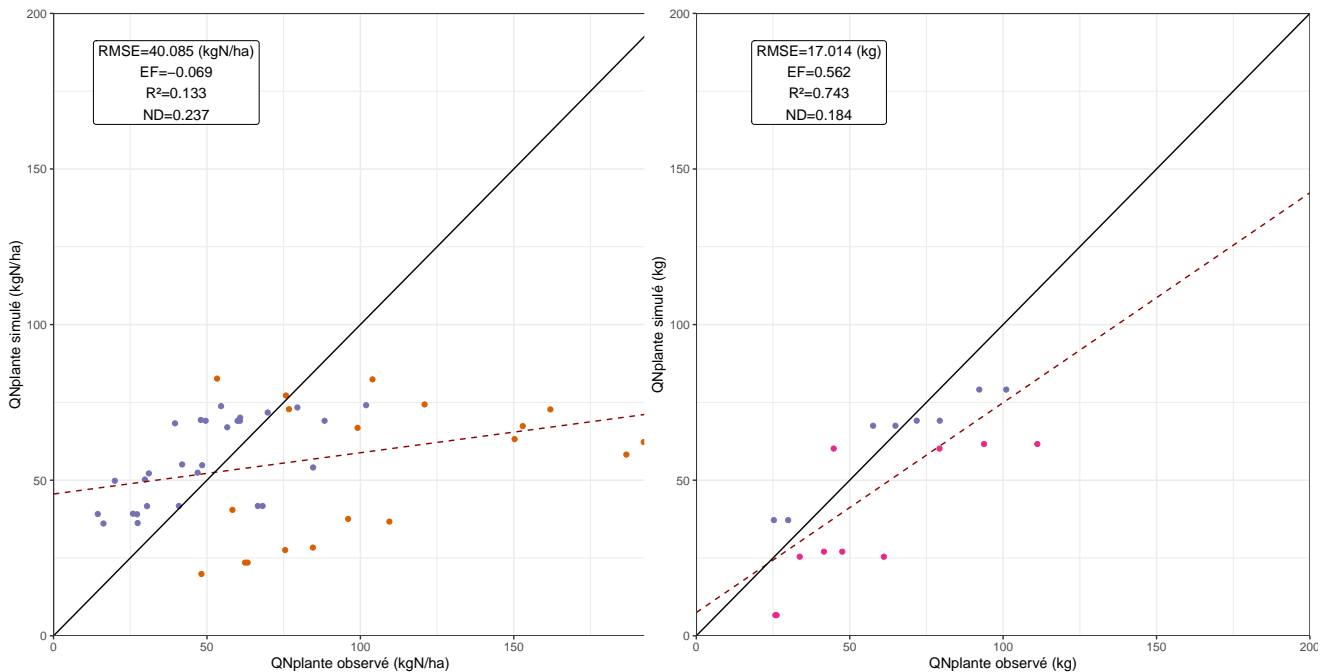


FIGURE 3.21 – Quantité d'azote dans la plante simulé en fonction des valeurs observées (kgN/ha). Les années 2018-2019 sont représentées en orange •, 2019-2020 en mauve • et 2020-2021 en rose •. La droite noire représente l'équation $x=y$ et la droite discontinue rouge représente la droite de régressions des valeurs.

les données de calibration (tableau 3.17). Ceci est sans doute corrélé au fait que les plantes de l'essai retenu pour la validation ont reçu le même apport de 50-50-50 kgN/ha contrairement à celle du set de calibration qui ont reçu 7 fertilisations différentes. Comme pour les cas précédents, le fait d'ignorer la seconde période culturale améliore considérablement les critères (voir tableau 3.17). La quantité d'azote dans la plante est sous-estimée pour la seconde période de production (voir graphe de gauche figure 3.21).

	RMSE (kgN/ha)	EF	R ²	ND
calibration	39,819	-0,054	0,151	0,242
calibration sans 2ème année	13,735	0,548	0,605	0,08
validation	17,014	0,562	0,743	0,184
validation sans 2ème année	11,516	0,794	0,915	0,031

TABLE 3.17 – Critères statistiques pour l'évaluation de la simulation de la variable QNplante par le modèle, les cellules grisées indiquent les critères rencontrant les niveaux d'acceptabilité.

Biomasse racinaire

La comparaison des biomasses racinaires observées et simulées est présentée dans les graphes figure 3.22 pour le set de calibration et le set de validation. Les performances du modèle sont médiocres quelques soit les critères pris en compte, aucun d’eux n’atteint les seuils d’acceptabilité (voir tableau 3.18).

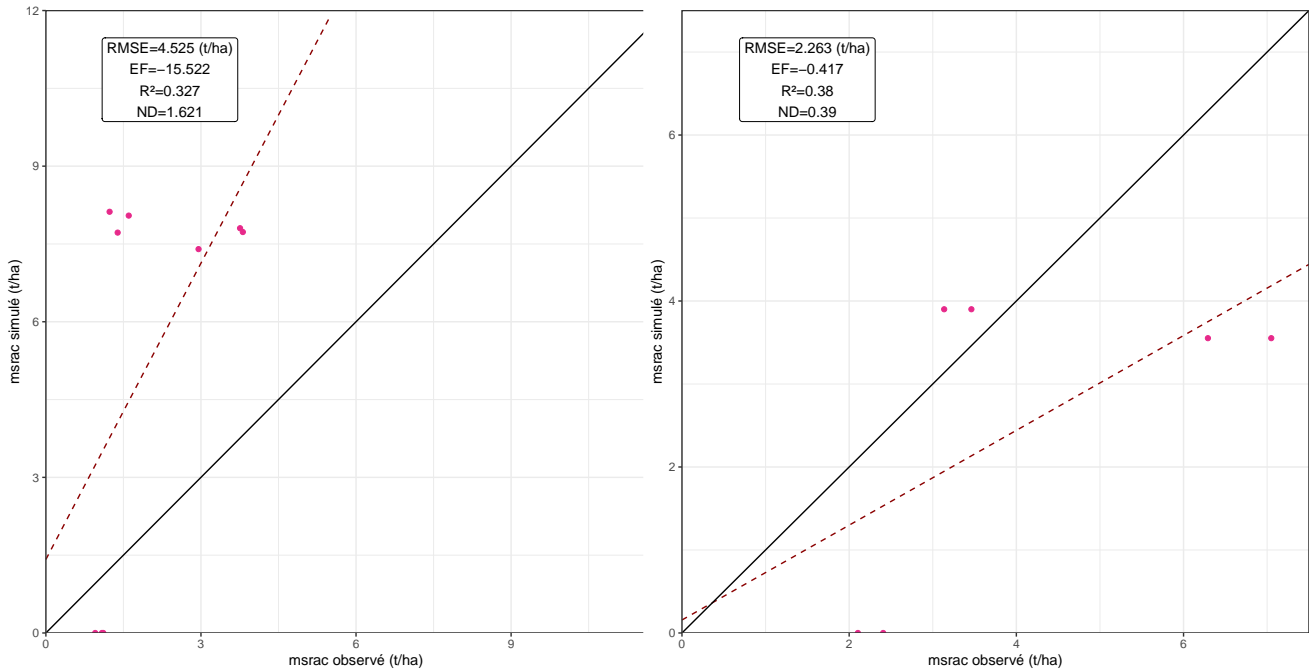


FIGURE 3.22 – Biomasse racinaire de la plante simulée en fonction des valeurs observées (t/ha). Les années 2020-2021 sont représentées en rose •. La droite noire représente l’équation $x=y$ et la droite discontinue rouge représente la droite de régressions des valeurs.

	RMSE (t/ha)	EF	R ²	ND
calibration	4,525	-15,522	0,327	1,621
validation	2,263	-0,417	0,38	0,39

TABLE 3.18 – Critères statistiques pour l’évaluation de la simulation de la biomasse racinaire (variable *msrac*) par le modèle, les cellules grisées indiquent les critères rencontrant les niveaux d’acceptabilité.

Contrairement à l’approche *prairie*, l’externalisation du passage d’une période culturale à une autre et l’initialisation des valeurs de densité racinaire à chaque début de simulation semble responsable de la surestimation de cette biomasse par le modèle. En effet, elle s’accumule alors de période de culture en période de culture. Ceci provient du fait que STICS calcule une biomasse racinaire fictive en fonction de la longueur des racines et d’un paramètre fixe; initialiser cette longueur en début de simulation génère alors une biomasse racinaire qui n’a pas de sens.

3.2.3 Paramètres finaux

Le tableau 3.19 reprend les valeurs finales de tous les paramètres optimisés en fonction des deux approches *prairie* et *céréale*. Les paramètres permettant de simuler la phénologie sont identiques pour les deux approches et ce malgré les différences dans les modalités de simulations (enchaînement par le modèle d’année à année pour *kernza prairie* et enchaînement externalisé de récolte

à récolte pour kernza *céréale*). Concernant la modélisation du LAI, tous les paramètres sont eux aussi identiques à l'exception du paramètre *durevief* qui est légèrement plus faible pour kernza *prairie*.

Les paramètres d'efficacité d'utilisation des radiations sont en revanche tous différents, *efcroijuv* et *efcroiveg* sont nettement plus élevés pour kernza *prairie* que pour kernza *céréale*. Ce constat s'inverse pour le paramètre *efcroirepro*. Une explication qui pourrait être avancée est que kernza *céréale* est simulée avec une densité racinaire initiale à laquelle STICS attribue une biomasse. Ainsi, la plante simulée dispose dès le départ d'organes souterrain et doit allouer moins de ressources pour leur croissance. La comparaison des graphes dynamiques de la variable respiratoire (stock de carbone de la plante) pour les deux approches montre que ce compartiment de stockage a des valeurs plus élevées au cours de la saison dans l'approche *céréale* que l'approche *prairie*. Ainsi, le coefficient d'efficacité de conversion n'a pas besoin d'être élevé car la plante simulée dispose de stocks à remobiliser. Les valeurs obtenues pour kernza *céréale* sont cependant très faibles en comparaison des valeurs de ces paramètres pour le blé, la fétuque ou la fléole.

Nom du paramètre	valeur finale pour kernza <i>prairie</i>	valeur finale pour kernza <i>céréale</i>
stlevamf	240	240
stamflax	600	600
stlevdrp	900	900
durevief	140	150
tigefeuille	1	1
stressdev	0,3	0,3
dlaimaxbrut	0,0006	0,0006
udlaimax	1,7	1,7
adens	-0,5	-0,5
bdens	7	7
efcroijuv	1,6	1
efcroiveg	2,6	1,8
efcroirepro	1,8	4,25
cgrain		0,5
vitircarbT		0,00015

TABLE 3.19 – Tableau reprenant les valeurs finales des paramètres qui ont été optimisés pour simuler kernza *céréale* et kernza *prairie*. Les cellules grisées indiquent des valeurs de paramètres différentes.

3.2.4 Discussion sur la modélisation

L'approche kernza *céréale* semble la plus à même de correctement simuler la culture. En effet, hormis le LAI et la biomasse racinaire qui sont très mal simulés, les autres variables rencontrent dans leur majorité les niveaux d'acceptabilité des critères. Cependant, cette approche reste imparfaite car elle ne tient pas compte des modalités d'exploitation par fauche de la plante qui sont pourtant fondamentales pour sa double finalité. La fauche a en effet démontré qu'elle avait un impact positif sur la production de biomasse aérienne et souterraine de la culture (PUGLIESE, CULMAN et SPRUNGER 2019). Ainsi, ne pas rendre compte de ce mécanisme apporte des erreurs dans l'évaluation des performances du modèle.

Les limites du modèle STICS concernant la modélisation des racines sont problématiques. S'agissant de la simulation d'une graminée pérenne comme kernza, le fait que la biomasse racinaire soit considérée par STICS comme une densité à laquelle est allouée a posteriori une part de la biomasse pose question, surtout dans le cas de simulation de plantes pérennes. La mortalité totale des racines à la récolte de grains ou de fourrage, que la plante soit considérée comme pérenne ou annuelle, représente mal la réalité. De plus, STICS considère que les quantités de carbone mobilisable (variable *resperenne*) et d'azote mobilisable (variable *QNplante*) ne sont pas réparties dans des compartiments ou organes précis. Ainsi, lorsque la biomasse aérienne est récoltée, la biomasse racinaire est considérée comme égale à zéro et les stocks sont alors perdus pour la suite des enchaînements. Cette limite a été rencontrée pour la simulation du *Miscanthus*, une autre graminée rhizomateuse pérenne dont le développement d'année en année dépend fortement de ses réserves. Une des solutions apportée par STRULLU et al. 2014 est donc l'ajout au modèle STICS de nouveaux réservoirs et flux de biomasse et d'azote avec de très bons résultats dans la simulation des dynamiques de ces variables pour *Miscanthus*. Ce problème de la simulation des réserves et de leur remobilisation lors de la repousse n'est pas qu'une limite rencontrée par STICS. CATIMO, un modèle dédié à la simulation de la croissance et du développement de la fléole sur plusieurs années, a lui aussi été amélioré par l'introduction de nouveaux formalismes similaires qui ont permis de simuler correctement la repousse de la plante (JING et al. 2012). Ces exemples illustrent l'importance d'intégrer à STICS les nouveaux formalismes proposés par STRULLU et al. 2014. A l'avenir, ces nouvelles équations et variables seront intégrées à STICS afin d'améliorer sa capacité à simuler des plantes pérennes.

Concernant le LAI, les deux approches se sont avérées décevantes. Les mauvaises performances de STICS pour simuler le LAI ont aussi été rencontrées par JÉGO et al. 2013 pour la simulation de la fléole et STRULLU et al. 2014 pour la simulation du miscanthus. Dans la première étude, l'efficacité de modélisation du LAI n'atteint que 0,25 pour la seconde année de culture. L'introduction des nouveaux formalismes explicités au paragraphe précédent par STRULLU et al. 2014 n'ont permis d'obtenir qu'une efficacité de modélisation du LAI de 0,46 malgré des performances améliorées dans la simulation de toutes les autres variables. Ces exemples illustrent les limites de STICS dans la simulation du développement de l'appareil foliaire surtout concernant des cultures à géométries complexes que sont les graminées pérennes. Le fait que les populations de kernza soient très hétérogènes d'un point de vue génétique ajoute un niveau supplémentaire de complexité inaccessible pour le modèle. Ceci ne doit cependant pas occulter les bonnes performances de STICS pour simuler la biomasse aérienne totale ou le rendement en fruits de nombreuses cultures très différentes.

Les très bonnes performances du modèle pour simuler la phénologie de kernza rejoignent les résultats de DUCHENE, DUMONT et al. 2021 et J. JUNGERS et al. 2018. L'utilisation d'une accumulation de degrés-jours en prenant en compte la photopériode et la vernalisation permet de simuler assez précisément la phénologie de la plante, quelle que soit l'approche utilisée.

Malgré les nombreuses limites présentées dans les paragraphes précédents, la calibration de STICS pour la simulation de kernza avec une approche *céréale* offre des performances satisfaisantes pour la simulation de la biomasse aérienne, la quantité d'azote dans la plante et le rendement en grains.

3.3 Optimisation de la fertilisation azotée

Les résultats concernant les rendements en grain obtenus pour les 11500 simulations sont illustrés par le graphe figure 3.23. Hormis pour certains fractionnements peu élevés, les distributions de valeurs de rendement ont tendance à se regrouper autour de la moyenne à mesure que la fertilisation totale augmente. L'augmentation des rendements n'est de plus pas linéaire et semble atteindre une valeur seuil malgré une fertilisation croissante. Ceci est en accord avec la loi des accroissements moins que proportionnels de MITSCHERLICH 1930.

L'étude des valeurs de *skewness* calculées pour chaque distribution de probabilité de rendement (voir graphe 3.24) indique que les fractionnements induisant une dissymétrie vers la droite des distributions de probabilité (soit une valeur médiane plus élevée que la moyenne) sont 50-25-25 et 75-0-25. Ce dernier fractionnement est celui qui apporte la dissymétrie la plus importante avec une valeur de *skewness* de -0,48 pour un apport total de 100 kgN/ha en seulement deux apports. Les fractionnements les plus faibles induisent dans leur majorité une dissymétrie dans le sens inverse, c'est-à-dire un rendement médian en dessous de la moyenne (voir figure 3.24). Les valeurs de *skewness* proches de 0 pour les apports élevés indiquent des distributions proches de la distribution normale.

Le résultat du test de Kolmogorov-Smirnov permet d'affirmer que la distribution de rendement de l'itinéraire technique 75-0-25 n'est pas normale ($p\text{-valeur}=0,035 < 0,05$) et qu'une dissymétrie existe bel et bien dans cette distribution de probabilité de rendement. Elle est illustrée à la figure 3.25.

Le résultat de l'ANOVA à un facteur (fractionnement de la fertilisation) réalisée pour tous les itinéraires techniques indique bien un effet significatif de ce facteur sur le rendement en grains ($p\text{-valeur} < 2 \times 10^{-16}$ ***). Le test de Student-Newman-Keuls réalisé ensuite classe l'itinéraire technique retenu dans un groupe différent des itinéraires ayant les rendements moyens les plus élevés, ce groupe ne contient que des itinéraires techniques appliquant au total plus de 125 kgN/ha. Le rendement moyen le plus élevé s'élève à 1,073 t/ha par application de trois fractions de 100 kgN/ha (300kgN/ha en tout). Comparé à un rendement moyen de 1,026 t/ha (soit 47 kg de différence) pour seulement 100 kgN/ha appliqué en tout, l'itinéraire technique retenu semble économiquement beaucoup plus pertinent tout en garantissant des rendements intéressants.

La dose la plus pertinente d'azote à apporter à une culture de kernza, déterminée grâce à la multisimulation, est dans la gamme de valeur déterminée par J. M. JUNGERS et al. 2017. En effet, cette étude a déterminé que la fertilisation idéale à apporter à une culture de kernza semée à l'automne devait idéalement se situer entre 60 kgN/ha et 100 kgN/ha pour maximiser le rendement en grains. Contrairement aux apports fractionnés de nitrate d'ammonium étudiés dans la multisimulation, les fertilisations qui ont été testées dans l'étude de J. M. JUNGERS et al. 2017 ont toutes été apportées en une seule dose d'urée en avril avec des doses variant de 0 à 200 kgN/ha par pas de 20 kgN/ha. Un premier apport important d'azote au stade BBCH30 semble donc être un facteur déterminant à l'établissement d'un rendement en grains important en augmentant le nombre de talles allant jusqu'à épiaison (DUCHENE 2020). Malgré ses nombreuses limites, le modèle semble bien reproduire cet aspect car les probabilités d'obtenir un rendement plus faible que la moyenne sont plus élevées avec les itinéraires techniques non fertilisés ou peu fertilisés au redressement (BBCH30) (voir figure 3.24, itinéraires techniques en jaune et orange clair).

Une des limites de cette approche multisimulation est la non-prise en compte de la fauche de la culture et des éventuels bénéfices qu'elle pourrait avoir sur la plante et sur la biomasse totale récoltée. Une autre limite est l'incapacité du modèle à reproduire le pic de production de grain et de biomasse de la plante la seconde année de production. Cet aspect pourrait avoir un impact non négligeable sur les distributions de probabilité de rendement établies par la simulation.

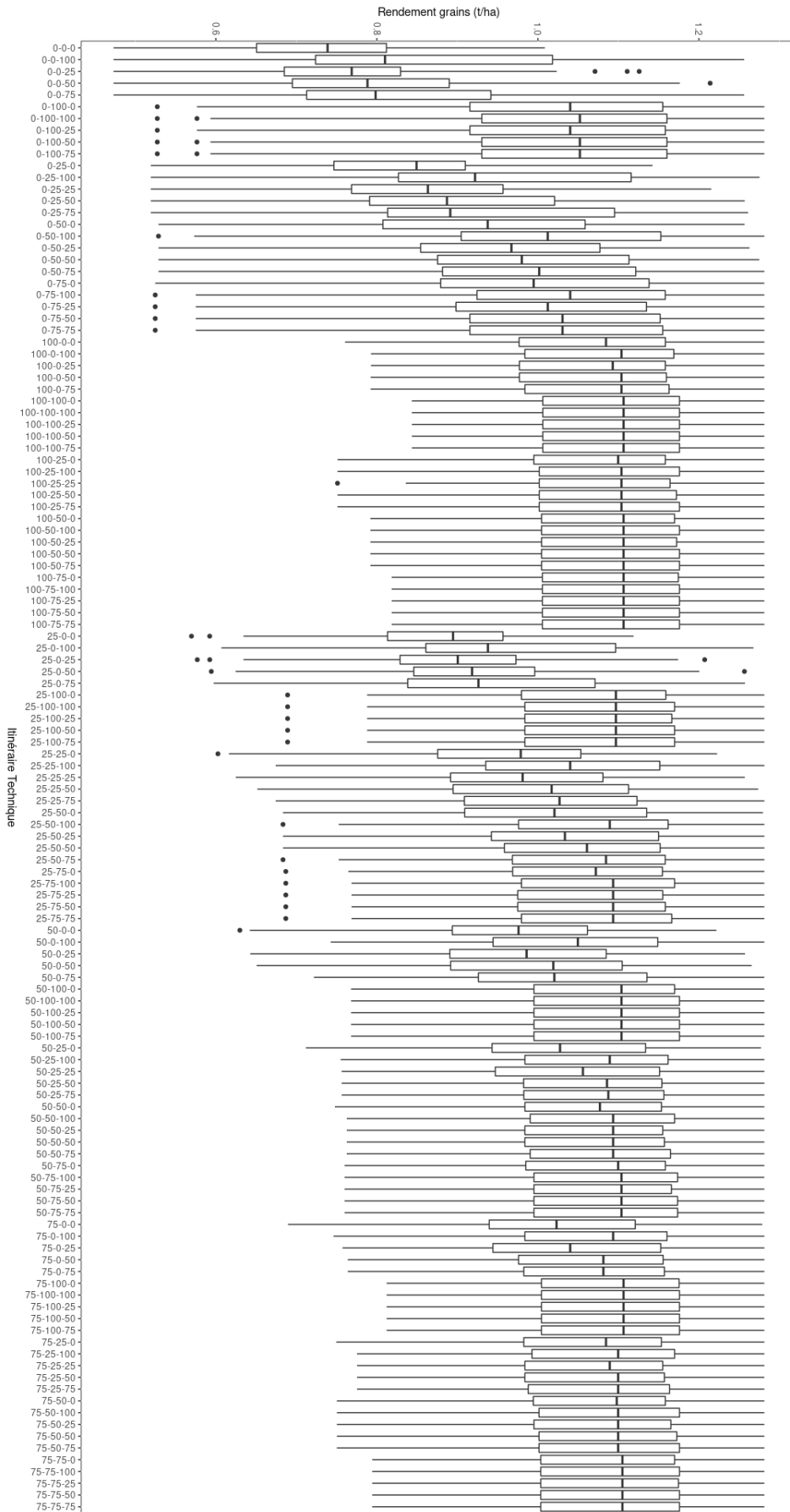


FIGURE 3.23 – Boxplot des rendements en grains obtenus pour chaque itinéraire technique sur 23 années de simulation.



FIGURE 3.24 – Valeurs de skewness des distributions pour chaque itinéraire technique. Un gradient de couleur allant du jaune (0 kgN/ha) au rouge (300 kgN/ha) représente la quantité totale de fertilisant apportée pour chaque itinéraire technique.

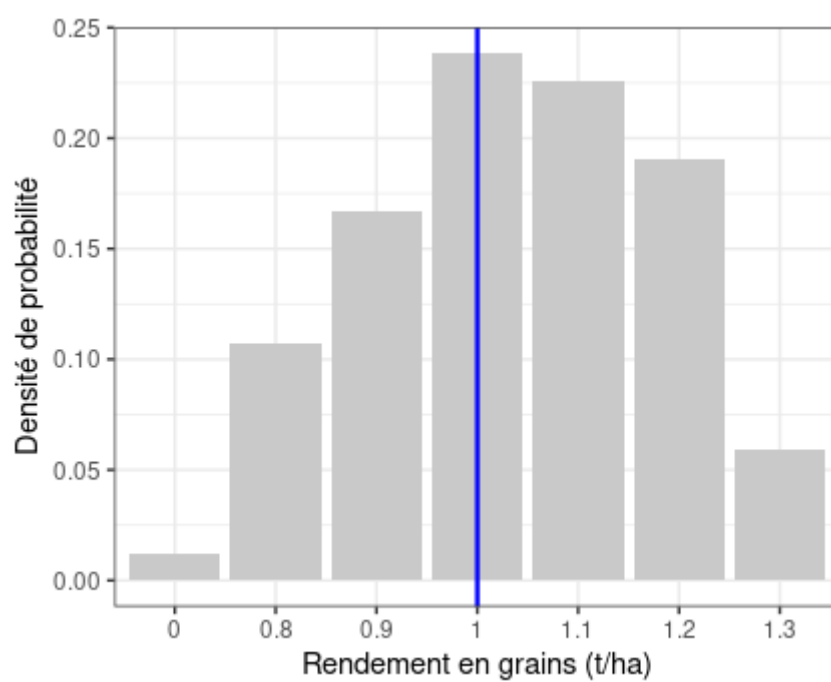


FIGURE 3.25 – Distribution de probabilité du rendement en grain pour un fractionnement de 75-0-25 kgN/ha. La ligne verticale bleue illustre la moyenne des données, égale à 1,026 t/ha.

Chapitre 4

Conclusion et perspectives

Ce travail a permis d'étoffer les données relatives à la biomasse souterraine du kernza. Les tendances constatées concernant la diminution de la biomasse racinaire de juin à septembre sont en accord avec les résultats de PUGLIESE, CULMAN et SPRUNGER 2019, ce qui permet de valider la méthodologie des prélèvements mise en oeuvre. Cependant, ces informations restent parcellaires et des prélèvements sur plusieurs saisons de cultures seront nécessaires pour comprendre les dynamiques en jeu. De plus, des analyses chimiques plus poussées devront être réalisées pour mieux rendre compte des changements qualitatifs de composition chimique dans les racines et rhizomes, en lien avec le développement des organes aériens. Concernant les rhizomes, leur biomasse faible et le manque de dynamique des éléments chimiques les concernant pendant la période de culture semble écarter l'hypothèse qu'ils sont des organes de stockage comme chez *miscanthus*. Leur tri plus précis pourrait aider à la compréhension des dynamiques de reproduction végétative chez kernza au cours du temps.

Les prélèvements en profondeurs n'ont pas permis de correctement caractériser la biomasse souterraine à plus de 15 cm. L'utilisation d'une sonde plus grande pour réaliser ces prélèvements devrait corriger ce problème.

La biomasse souterraine du kernza étudié pour ce travail représentait en moyenne un quart de la biomasse totale de la culture, son étude précise ne semble donc pas anecdotique pour comprendre et améliorer les performances agronomiques du kernza.

La calibration du modèle STICS a été complexe. Des choix de formalismes mutuellement exclusifs ont mené à simuler le kernza selon deux approches très différentes. Ceci illustre que la version de STICS 9.2 n'est pas capable de simuler les propriétés hybrides *prairie/céréale annuelle* de gestion du kernza. L'approche *céréale annuelle* s'est néanmoins révélée plus performante. De plus, cette version de STICS rencontre de réelles limites dans la simulation des organes souterrains. La mortalité totale des racines à la fauche ou à la récolte de grains n'est pas réaliste, surtout s'agissant d'une culture pérenne. Le calcul de la biomasse racinaire par une attribution fictive de biomasse en fonction de la longueur et de la densité des racines ne semble pas être un formalisme très robuste. Enfin, cette incapacité de STICS à correctement simuler les organes souterrains a une influence sur les stocks de carbone et d'azote que la plante est capable de remobiliser pour maintenir sa pérennité. Les nouveaux formalismes proposés par STRULLU et al. 2014 qui seront implémentés dans la prochaine version de STICS devraient permettre de mieux simuler les plantes pérennes telles que le kernza.

Le LAI n'a pas pu être correctement simulé par le modèle, potentiellement en raison de l'hétérogénéité génétique des populations de kernza et des limites du formalisme utilisé pour simuler une géométrie foliaire complexe. STICS s'est tout de même montré assez performant pour simuler la biomasse aérienne et le rendement en grain avec l'approche céréale. Il faudra cependant

vérifier que les bonnes choses sont simulées pour les bonnes raisons. Des paramètres ont en effet pu être sous ou sur estimés à cause de phénomènes de compensation. La meilleure modélisation de l'appareil racinaire dans la nouvelle version de STICS devrait répondre à ces interrogations.

Enfin, le fractionnement de la fertilisation optimale de 75 kgN/ha au redressement et 25 kgN/ha à l'automne déterminé par la multi simulation est en accord avec les résultats de J. M. JUNGERS et al. 2017. De plus, la quantité d'azote apportée au stade redressement semble être un facteur déterminant dans l'établissement des composantes de rendement. Enfin, l'incapacité du modèle à reproduire le pic de production de grains et de biomasse de la seconde année de production pourrait avoir un impact non négligeable sur les conclusions de la multi simulation. Ces résultats ne sont cependant pour le moment valables que dans le contexte pour lequel le modèle a été calibré. L'élargissement de la base de données à de nouveaux contextes permettra de confronter les résultats obtenus à d'autres situations.

En conclusion, l'étude plus approfondie du système racinaire de kernza, bien que fastidieuse, s'avère cruciale pour améliorer la compréhension de cette nouvelle culture.

Le modèle STICS n'est pas, en l'état capable de simuler correctement tous les aspects phytotechniques et physiologiques de la plante mais sa prochaine version intégrant de nouveaux formalismes pour les organes souterrains semble prometteuse.

Contribution personnelle de l'étudiant

J'ai réalisé l'ensemble de la collecte et du tri de la biomasse souterraine, puis j'ai développé l'application d'analyse statistique afin d'en faciliter les analyses.

Concernant l'aspect modélisation, j'ai compilé la base de données rassemblant toutes les informations collectées par ma co-promotrice Laura Fagnant sur les essais durant les 4 années passées. J'ai ensuite développé toutes les fonctions R permettant la visualisation des résultats de simulations ainsi que celles permettant de générer les fichiers nécessaires au fonctionnement de STICS à partir de la lecture de la base de données. A la suite de problèmes d'enchaînement des simulations par le modèles, j'ai développé les fonctions permettant d'externaliser ces enchaînements et d'exécuter les nombreuses simulations de façon automatisée, sans passer par l'interface graphique du modèle.

J'ai exploré toutes les possibilités offertes par STICS afin de modéliser le plus fidèlement le kernza. Ceci qui a mené aux deux approches présentées dans ce travail. J'ai de plus effectué toute la calibration des paramètres de la plante par itérations manuelles grâce aux fonctions de visualisations et d'enchaînement mentionnées plus haut. Suite à cela, j'ai effectué la validation du modèle sur un jeu de données indépendant. Finalement, j'ai réalisé les multi-simulations pour déterminer l'optimum de fertilisation ainsi que l'analyse des résultats.

Mon travail s'inscrivant dans le cadre du projet européen NAPERDIV, j'ai pu collaborer avec des partenaires internationaux de ce projet pour les aider à la collecte de données sur les essais de la ferme expérimentale.

Bibliographie

- AMATO, M. et A. PARDO, (1994). « Root length and biomass losses during sample preparation with different screen mesh sizes ». In : *Plant and Soil* 161.2, p. 299-303. ISSN : 1573-5036. DOI : 10.1007/BF00046401.
- AWIKA, Joseph M., (2011). « Major Cereal Grains Production and Use around the World ». In : *Advances in Cereal Science : Implications to Food Processing and Health Promotion*. T. 1089. 0 t. ACS Symposium Series 1089. American Chemical Society, p. 1-13. ISBN : 9780841226364. DOI : 10.1021/bk-2011-1089.ch001.
- BAJGAIN, Prabin et al., (2020). « 'MN-Clearwater', the first food-grade intermediate wheatgrass (Kernza perennial grain) cultivar ». In : *Journal of Plant Registrations* 14.3, p. 288-297. ISSN : 1940-3496. DOI : 10.1002/plr2.20042.
- BASSO, B. et al., (2011). « A strategic and tactical management approach to select optimal N fertilizer rates for wheat in a spatially variable field ». In : DOI : 10.1016/J.EJA.2011.06.004.
- BÖHM, Wolfgang, (1979). « Techniques of Root Washing ». In : *Methods of Studying Root Systems*. Sous la dir. de Wolfgang BÖHM. Ecological Studies. Berlin, Heidelberg : Springer, p. 115-124. ISBN : 9783642672828. DOI : 10.1007/978-3-642-67282-8_11.
- BRISSON, Nadine, Christian GARY et al., (2003). « An overview of the crop model STICS ». In : *European Journal of Agronomy* 18, p. 309-332. DOI : 10.1016/S1161-0301(02)00110-7.
- BRISSON, Nadine, Marie LAUNAY et al., (2009). *Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model*. Editions Quae. ISBN : 9782759201693.
- CRUZ, Pablo et al., (2010). « Typologie fonctionnelle de graminées fourragères pérennes : une classification multitraits ». In : *Fourrages* 201, p. 11-17.
- CULMAN, Steve W. et al., (2013). « Soil and Water Quality Rapidly Responds to the Perennial Grain Kernza Wheatgrass ». In : *Agronomy Journal* 105.3, p. 735-744. ISSN : 1435-0645. DOI : 10.2134/agronj2012.0273.
- DEHAAN, Lee et al., (2018). « Development and Evolution of an Intermediate Wheatgrass Domestication Program ». In : *Sustainability* 10.5, p. 1499. DOI : 10.3390/su10051499.
- DICK, C., D. CATTANI et M.H. ENTZ, (2018). « Kernza intermediate wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*) grain production as influenced by legume intercropping and residue management ». In : *Canadian Journal of Plant Science* 98.6, p. 1376-1379. ISSN : 0008-4220. DOI : 10.1139/cjps-2018-0146.
- DINNES, Dana L. et al., (2002). « Review and Interpretation : Nitrogen Management Strategies to Reduce Nitrate Leaching in Tile-Drained Midwestern Soils ». In : *Publications from USDA-ARS / UNL Faculty*.
- DUCHENE, Olivier, (2020). « Caractérisation fonctionnelle et performances d'une céréale vivace (*Thinopyrum intermedium*) : une alternative agroécologique pour les systèmes de grandes cultures d'Europe occidentale. » These de doctorat. Paris, Institut agronomique, vétérinaire et forestier de France.
- DUCHENE, Olivier, Florian CELETTE et al., (2020). « Introducing Perennial Grain in Grain Crops Rotation : The Role of Rooting Pattern in Soil Quality Management ». In : *Agronomy* 10.9, p. 1254. DOI : 10.3390/agronomy10091254.

- DUCHENE, Olivier, Benjamin DUMONT et al., (2021). « Process-based analysis of *Thinopyrum intermedium* phenological development highlights the importance of dual induction for reproductive growth and agronomic performance ». In : *Agricultural and Forest Meteorology* 301-302, p. 108341. ISSN : 0168-1923. DOI : 10.1016/j.agrformet.2021.108341.
- DUMAS, J.B.A., (1831). « Procédés de l'analyse organique. » In : *Ann. Chim. Phys.* 247, p. 198-213.
- DUMONT, Benjamin et al., (2013). « Yield variability linked to climate uncertainty and nitrogen fertilisation ». In : *Precision Agriculture 2013 - Papers Presented at the 9th European Conference on Precision Agriculture, ECPA 2013*, p. 427-434.
- FAGNANT, L., (2021). « Learning about *Th. intermedium*'s growing habits and reproductive strategy through its nitrogen dilution curve. (en cours de publication) ». In.
- FLÉNET, Francis, Pierre VILLON et Françoise RUGET, (2004). « Methodology of adaptation of the STICS model to a new crop : spring linseed (*Linum usitatissimum*, L.) » In : *Agronomie* 24.6, p. 367-381. DOI : 10.1051/agro:2004032.
- GARCIA DE CORTAZAR-ATAURI, Iñaki, (2006). « Adaptation du Modèle STICS à la Vigne (*Vitis vinifera* L.). Utilisation dans le Cadre d'une Étude d'Impact du Changement Climatique à l'Échelle de la France ». Thèse de doct.
- GATE, P., (1995). *Ecophysiologie du blé GATE Philippe*. Librairie Lavoisier. URL : <https://www.lavoisier.fr/livre/agriculture/ecophysiologie-du-ble/gate/descriptif-9782743000462> (visité le 05/01/2022).
- GLOVER, J. D. et al., (2010). « Increased Food and Ecosystem Security via Perennial Grains ». In : *Science* 328.5986, p. 1638-1639. DOI : 10.1126/science.1188761.
- GLOVER, JERRY D. et JOHN P. REGANOLD, (2010). « Perennial Grains : Food Security for the Future ». In : *Issues in Science and Technology* 26.2, p. 41-47. ISSN : 0748-5492.
- GUO, Jun et al., (2016). « Phylogenetic relationships of *Thinopyrum* and *Triticum* species revealed by SCoT and CDDP markers ». In : *Plant Systematics and Evolution* 302.9, p. 1301-1309. ISSN : 2199-6881. DOI : 10.1007/s00606-016-1332-4.
- HUANG, Wen-Yuan, (2007). *Impact of Rising Natural Gas Prices on U.S. Ammonia Supply*. Google-Books-ID : jJXQ5aaRdyEC. DIANE Publishing. 19 p. ISBN : 9781437921113.
- JAME, Y. et H. CUTFORTH, (1996). « Crop growth models for decision support systems ». In : *Canadian Journal of Plant Science* 76. DOI : 10.4141/cjps96-003.
- JÉGO, Guillaume et al., (2013). « Calibration and performance evaluation of the STICS crop model for simulating timothy growth and nutritive value ». In : *Field Crops Research* 151, p. 65-77. ISSN : 0378-4290. DOI : 10.1016/j.fcr.2013.07.003.
- JENSEN, Kevin B. et al., (2016). « Agronomic and genetic diversity in intermediate wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*) ». In : *Plant Breeding* 135.6, p. 751-758. ISSN : 0179-9541. DOI : 10.1111/pbr.12420.
- JING, Qi et al., (2012). « Regrowth simulation of the perennial grass timothy ». In : *Ecological Modelling* 232, p. 64-77. ISSN : 0304-3800. DOI : 10.1016/j.ecolmodel.2012.02.016.
- JONES, James W. et al., (2017). « Brief history of agricultural systems modeling ». In : *Agricultural Systems* 155, p. 240-254. ISSN : 0308-521X. DOI : 10.1016/j.agsy.2016.05.014.
- JUNGERS, J.m. et al., (2018). « Growth, development, and biomass partitioning of the perennial grain crop *Thinopyrum intermedium* ». In : *Annals of Applied Biology* 172.3, p. 346-354. ISSN : 1744-7348. DOI : 10.1111/aab.12425.
- JUNGERS, Jacob M. et al., (2017). « Intermediate Wheatgrass Grain and Forage Yield Responses to Nitrogen Fertilization ». In : *Agronomy Journal* 109.2, p. 462-472. ISSN : 1435-0645. DOI : 10.2134/agronj2016.07.0438.
- LEMAIRE, Gilles, (1997). *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer Science & Business Media. 240 p. ISBN : 9783642606847.

- MITSCHERLICH, E. A., (1930). *Die Bestimmung des Düngerbedürfnisses des Bodens*. Paul Parey, Berlin.
- PIMENTEL, David, David CERASALE et al., (2012). « Annual vs. perennial grain production ». In : *Agriculture, Ecosystems & Environment* 161, p. 1-9. ISSN : 0167-8809. DOI : 10.1016/j.agee.2012.05.025.
- PIMENTEL, David, Paul HEPPERLY et al., (2005). « Environmental, Energetic, and Economic Comparisons of Organic and Conventional Farming Systems ». In : *BioScience* 55.7, p. 573-582. ISSN : 0006-3568. DOI : 10.1641/0006-3568(2005)055[0573:EEAECO]2.0.CO;2.
- PUGLIESE, Jennie Y., (2017). « Above- and Belowground Response to Managing Kernza (*Thinopyrum intermedium*) as a Dual-Use Crop for Forage and Grain ». Thèse de doct. The Ohio State University.
- PUGLIESE, Jennie Y., Steve W. CULMAN et Christine D. SPRUNGER, (2019). « Harvesting forage of the perennial grain crop kernza (*Thinopyrum intermedium*) increases root biomass and soil nitrogen cycling ». In : *Plant and Soil* 437.1, p. 241-254. ISSN : 1573-5036. DOI : 10.1007/s11104-019-03974-6.
- R CORE TEAM, (2020). *R : A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.
- RANDALL, G. W. et D. J. MULLA, (2001). « Nitrate nitrogen in surface waters as influenced by climatic conditions and agricultural practices ». In : *Journal of Environmental Quality* 30.2, p. 337-344. ISSN : 0047-2425. DOI : 10.2134/jeq2001.302337x.
- ROUMET, Catherine, Carlos URCELAY et Sandra DÍAZ, (2006). « Suites of root traits differ between annual and perennial species growing in the field ». In : *New Phytologist* 170.2, p. 357-368. ISSN : 1469-8137. DOI : 10.1111/j.1469-8137.2006.01667.x.
- RSTUDIO, INC, (2013). *Easy web applications in R*. URL : <http://www.rstudio.com/shiny/>.
- SAKIROGLU, Muhammet et al., (2020). « How does nitrogen and forage harvest affect belowground biomass and nonstructural carbohydrates in dual-use Kernza intermediate wheatgrass? » In : *Crop Science* 60.5, p. 2562-2573. ISSN : 1435-0653. DOI : 10.1002/csc2.20239.
- SELIGMAN, No'am G., (1990). « The crop model record : promise or poor show? » In : *PLOS ONE*.
- SILVA, João Vasco et Ken E. GILLER, (2020). « Grand challenges for the 21st century : what crop models can and can't (yet) do ». In : *The Journal of Agricultural Science* 158.10, p. 794-805. ISSN : 0021-8596, 1469-5146. DOI : 10.1017/S0021859621000150.
- SMITH, J. Stephen C et al., (2014). *Yield gains in major U.S. field crops*. OCLC : 881826468. Madison, WI : American Society of Agronomy : Crop Science Society of America : Soil Science Society of America. ISBN : 9780891186199.
- SPRUNGER, Christine D. et al., (2018). « How Does Nitrogen and Perenniality Influence Belowground Biomass and Nitrogen Use Efficiency in Small Grain Cereals? » In : *Crop Science* 58.5, p. 2110-2120. ISSN : 1435-0653. DOI : 10.2135/cropsci2018.02.0123.
- STEEN, Eliel et Kjell LARSSON, (1986). « Carbohydrates in Roots and Rhizomes of Perennial Grasses ». In : *New Phytologist* 104.3, p. 339-346. ISSN : 1469-8137. DOI : 10.1111/j.1469-8137.1986.tb02901.x.
- STRULLU, L. et al., (2014). « Simulation of Biomass and Nitrogen Dynamics in Perennial Organs and Shoots of *Miscanthus*×*Giganteus* Using the STICS Model ». In : *BioEnergy Research*. DOI : 10.1007/s12155-014-9462-4.
- WALLACH, Daniel, David MAKOWSKI et al., (2006). *Working with Dynamic Crop Models : Evaluation, Analysis, Parameterization, and Applications*. Google-Books-ID : nG7DEXen9QAC. Elsevier. 465 p. ISBN : 9780080461939.
- WALLACH, Daniel, Taru PALOSUO et al., (2021). « The chaos in calibrating crop models : Lessons learned from a multi-model calibration exercise ». In : *Environmental Modelling & Software* 145, p. 105206. ISSN : 1364-8152. DOI : 10.1016/j.envsoft.2021.105206.

- ZHANG, Xiaofei et al., (2016). « Establishment and Optimization of Genomic Selection to Accelerate the Domestication and Improvement of Intermediate Wheatgrass ». In : *The Plant Genome* 9.1. ISSN : 1940-3372. DOI : 10.3835/plantgenome2015.07.0059.
- ZHANG, Yanming et al., (2011). « Potential of Perennial Crop on Environmental Sustainability of Agriculture ». In : *Procedia Environmental Sciences*. 2011 3rd International Conference on Environmental Science and Information Application Technology ESIAT 2011 10, p. 1141-1147. ISSN : 1878-0296. DOI : 10.1016/j.proenv.2011.09.182.

Annexe A

Echelle BBCH pour les céréales

Stades	Description
Stade principal 0	Germination, levée
00	Semence sèche (caryope sec)
01	Début de l'imbibition de la graine
03	Imbibition de la graine
05	La radicule sort de la graine
06	Élongation de la radicule, apparition des poils absorbants et développement des racines secondaire
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
1.	Et ainsi de suite
19	9 ou davantage de feuilles étalées
Stade principal 2	Le tallage
20	Aucune talle visible
21	Début tallage : la première talle est visible
22	Deuxième talle visible
2.	Et ainsi de suite
29	Fin tallage
Stade principal 3	Élongation de la tige principale
30	Début montaison : pseudo-tiges et talles dressées, début d'élongation du premier entre-nœud, inflorescence au plus à 1 cm au-dessus du plateau de tallage
31	Le premier nœud est au plus à 1 cm au-dessus du plateau de tallage
32	Le deuxième nœud est au plus à 2 cm au-dessus du premier nœud
33	Le troisième nœud est au plus à 2 cm au-dessus du deuxième nœud
3.	Et ainsi de suite
37	La dernière feuille est juste visible, elle est encore enroulée sur elle-même
39	Le limbe de la dernière feuille est entièrement étalé, la ligule est visible
Stade principal 4	Gonflement de l'épi ou de la panicule, montaison
41	Début gonflement : élongation de la gaine foliaire de la dernière feuille
43	La gaine foliaire de la dernière feuille est visiblement gonflée
45	Gonflement maximal de la gaine foliaire de la dernière feuille
46	La gaine foliaire de la dernière feuille s'ouvre
49	Les premières arrêtes (barbes) sont visibles (pour les variétés aristées)

TABLE A.1 – Échelle BBCH, stades principaux et secondaires, pour les céréales (Witzenberger et al. 1989 ; Lancashire et al. 1991)

Stades	Description
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
5.	Et ainsi de suite
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
Développement des graines	Stade principal 7
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 à l'ongle
93	Des graines se détachent
97	La plante meurt et s'affaisse
99	Produit après récolte

TABLE A.2 – Suite et fin de l'échelle BBCH, stades principaux et secondaires, pour les céréales (Witzenberger et al. 1989; Lancashire et al. 1991)