

Dissociation symptomatique du stress azoté et des maladies fongiques du blé d'hiver par imagerie multispectrale de proximité

Auteur : Heens, Jérôme

Promoteur(s) : Dumont, Benjamin; Mercatoris, Benoît

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/2268.2/15773>

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.



**DISSOCIATION SYMPTOMATIQUE DU STRESS
AZOTÉ ET DES MALADIES FONGIQUES DU
BLÉ D'HIVER PAR IMAGERIE
MULTISPECTRALE DE PROXIMITÉ.**

HEENS JÉRÔME

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

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021-2022

CO-PROMOTEURS : PROF. BENJAMIN DUMONT, PROF. BENOÎT MERCATORIS

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

Le présent document n'engage que son auteur.



**DISSOCIATION SYMPTOMATIQUE DU STRESS
AZOTÉ ET DES MALADIES FONGIQUES DU
BLÉ D'HIVER PAR IMAGERIE
MULTISPECTRALE DE PROXIMITÉ.**

HEENS JÉRÔME

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

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021-2022

CO-PROMOTEURS : PROF. BENJAMIN DUMONT, PROF. BENOÎT MERCATORIS

Ce travail de fin d'études a été réalisé au sein de l'axe Biosystems Dynamics and Exchanges et de l'axe Plant Sciences.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier amplement mes deux encadrants, Alexis Carlier et Sébastien Dandrifosse, pour leur encadrement tout au long de mon travail de fin d'études. Ils ont toujours été disponibles pour répondre à la moindre question et ont largement contribué à l'avancement de ce travail.

Je remercie également mes deux co-promoteurs, Benjamin Dumont et Benoît Mercatoris, pour leurs précieux conseils et analyses lors des réunions.

Je tiens aussi à remercier Jesse et Françoise pour leur aide technique en laboratoire. Je remercie aussi Nicolas Derenne et l'équipe de la Ferme expérimentale pour la rapidité de leurs disponibilités et de leurs réponses.

Je remercie également Gauthier pour sa bonne humeur quotidienne, pour son soutien et surtout pour les pauses ping-pong. Je remercie aussi les autres tffistes et les membres de l'axe BIODYNE pour la bonne ambiance qu'ils ont contribué à apporter.

Enfin, je tiens à remercier tout particulièrement ma famille et mes proches pour leur soutien et encouragement tout au long de mes études. Merci à Armande sans qui je n'aurais pu arriver jusque-là.

Résumé

La détection spectrale proximale a le potentiel d'identifier des stress biotiques et abiotiques sur les plantes. En raison des similitudes symptomatiques, une multitude de méthodes ont été développées en présence d'un seul stress ou en conditions contrôlées. L'objectif de ce travail est de dissocier, en conditions de terrain, un stress lié à la nutrition azotée d'un stress lié aux maladies fongiques, et de les quantifier. Ce travail est effectué sur la culture du blé d'hiver. Différents traitements fongiques et fertilisants ont été appliqués au cours de deux saisons. Des données agronomiques ont été récoltées à différents stades de la culture. Les images ont été acquises à l'aide d'une plateforme de phénotypage équipée de caméras multispectrales, de caméras rouge vert bleu (RVB) et d'un spectromètre. La segmentation des dégâts foliaires a permis de dissocier les deux types de stress. Elle s'est construite en trois étapes : le pré-traitement des images, l'annotation d'images RVB et la sélection d'indices de végétation (IV) parmi 17 recensés dans la littérature. Une partie de ces IV ont été testés pour leur capacité à quantifier ces stress. Des études de corrélation ont été menées afin de relier la méthode d'imagerie à des variables d'intérêt tels que le rendement, l'indice de nutrition azotée (INN) et les cotations maladies. L'imagerie multispectrale s'est montrée efficace pour estimer le rendement en surpassant même la méthode de cotation en champ. La dissociation des stress s'est révélée intéressante dans l'estimation de l'INN. Enfin, des contraintes ont été rencontrées, abordées et discutées afin de proposer des pistes d'amélioration.

Mots-clés : multispectrale, maladie, stress azoté, blé d'hiver, indice de végétation, réflectance

Abstract

Proximal spectral detection has the potential to identify biotic and abiotic stresses on plants. Due to symptomatic similarities, a multitude of methods have been developed in the presence of a single stress or under controlled conditions. The objective of this work is to dissociate, under field conditions, a stress related to nitrogen nutrition from a stress related to fungal diseases and to quantify them. This work was carried out on winter wheat. Different fungal and fertiliser treatments were applied over two seasons. Agronomic data were collected at different stages of the crop. Images were acquired using a phenotyping platform equipped with multispectral cameras, red green blue (RGB) cameras and a spectrometer. The segmentation of leaf damage made it possible to dissociate the two types of stress. It was built in three stages: image pre-processing, annotation of RGB images and selection of vegetation index (VI) from among 17 listed in the literature. Some of these VI were tested for their ability to quantify these stresses. Correlation studies were conducted to link the imaging method to variables of interest such as yield, nitrogen nutrition index (NNI) and disease scores. Multispectral imaging was shown to be effective in estimating yield, outperforming even the field rating method. Stress dissociation was found to be useful for NNI estimation. Finally, constraints were encountered, addressed and discussed in order to propose ways of improvement.

Keywords : multispectral, disease, nitrogen stress, winter wheat, vegetation index, reflectance

Liste des abréviations

AOV : Analyse de la variance

AUDPC : Aire sous la courbe de progression de la maladie

BRF : Facteur de réflexion bidirectionnel

Car : Caroténoïdes

Chl : Chlorophylle

F : Nombre de traitements fongiques

INN : Indice de nutrition azotée

IV : Indice de végétation

GES : Gaz à effet de serre

MCARI : Indice modifié du taux d'absorption de la chlorophylle

MRESAVI : RESAVI modifié

NDRE : Différence normalisée dans le bord rouge

NDVI : Indice de végétation par différence normalisée

NPCI : Indice normalisé du rapport pigment chlorophylle

NRI : Indice de réflectance de l'azote

PMG : Poids de mille grains

PRI : Indice de réflectance photochimique

PSRI : Indice de réflectance de la sénescence de la plante

RESAVI : Indice de végétation ajusté au sol dans le bord rouge

RERDVI : Indice de végétation différent renormalisé dans le bord rouge

RVB : Rouge vert bleu

SIPI : Indice pigmentaire insensible à la structure

SLI : Spectromètre de lumière incidente

SNK : Student-Newman-Keuls

TCARI : Indice transformé du taux d'absorption de la chlorophylle

Z : Zadoks

Table des matières

I.	Introduction	9
II.	Synthèse bibliographique	10
1.	Le blé d'hiver	10
1.1.	Généralités.....	10
1.2.	Nutrition azotée	10
1.3.	Maladies fongiques.....	11
2.	Télétection	14
2.1.	Introduction	14
2.2.	Les capteurs.....	14
2.3.	Propriétés spectrales des feuilles	15
2.4.	Stress et indices de végétation.....	15
2.5.	Dissociation des stress.....	17
III.	Objectifs	17
IV.	Matériel et méthodes	18
1.	Essais expérimentaux	18
1.1.	Description générale.....	18
1.2.	Protocole expérimental.....	19
2.	Collecte des données	19
2.1.	Généralités.....	19
2.2.	Données agronomiques	21
2.3.	Cotations maladies.....	21
2.4.	Imagerie.....	22
3.	Traitement des données de référence	23
4.	Traitement des images.....	23
4.1.	Pré-traitement des images.....	23
4.2.	Segmentation des dégâts foliaires	24
5.	Quantification des stress biotiques et abiotiques.....	27
5.1.	Quantification des dégâts foliaires	27
5.2.	Quantification du stress en azote	27
V.	Résultats	28
1.	Essais expérimentaux	28
1.1.	Rendement agronomique 2021.....	28
1.2.	Rendement agronomique 2022.....	29
1.3.	Indice de nutrition azotée	30
1.4.	AUDPC	31

2.	Segmentation des dégâts foliaires	32
3.	Quantification des dégâts foliaires	34
4.	Quantification du stress en azote.....	35
VI.	Discussion	37
1.	Rendements agronomiques.....	37
2.	Indice de nutrition azotée	37
3.	Cotation maladie et AUDPC	37
4.	Segmentation	38
5.	Quantification.....	39
5.1.	Dégâts foliaires.....	39
5.2.	Stress azoté.....	39
VII.	Conclusions	40
VIII.	Améliorations et perspectives.....	41
	Bibliographie.....	42
	Annexes.....	49

Liste des figures

Figure 1 : Symptômes foliaires de la septoriose (Arvalis, 2012).	12
Figure 2 : Symptômes foliaires de la rouille jaune (Arvalis, 2012).	13
Figure 3 : Symptômes foliaires de la rouille brune (Arvalis, 2012).	14
Figure 4 : Signature spectrale des plantes (Anamaria et Tudor-Mihai, 2016).....	15
Figure 5 : Précipitations décadaires sur les saisons 2021 et 2022.	18
Figure 6 : Radiation solaire et température moyenne décadaires sur les saisons 2021 et 2022.	18
Figure 7 : Plateforme de phénotypage munie des différentes caméras et du spectromètre.	22
Figure 8 : Procédé de pré-traitement des images.....	24
Figure 9 : Synthèse de la quantification des différents stress.....	26
Figure 10 : Boîte à moustaches exprimant les rendements 2021 en fonction des différentes modalités.	28
Figure 11 : Boîte à moustaches exprimant le poids sec des épis à maturité en 2022 en fonction des différentes modalités.	29
Figure 12: Boîte à moustaches exprimant les INN à différents stades Zadoks, en 2021 et 2022 en fonction des différentes modalités.....	30
Figure 13 : Graphique exprimant l'évolution de l'AUDPC au cours du temps en 2022 selon les différentes modalités « Fongicide ».	31
Figure 14 : Graphique exprimant, pour chacun des 17 IV, le score d'exactitude moyen de différents seuils normalisés obtenus dans le cadre de la segmentation des dégâts foliaires.	33
Figure 15 : Graphiques exprimant la corrélation entre $NPCI_{AUDPC}$ et le poids sec des épis (Z89) à l'échelle de la microparcelle.	35
Figure 16 : Graphique exprimant l'INN aux différents stades Zadoks en fonction de RESAVI (feuille saine).	36
Figure 17 : Erreur d'alignement observée sur une image du canal 680 nm.....	38
Figure 18 : Erreur de segmentation de la végétation.	38

Liste des tableaux

Tableau 1 : Modalités de l'expérimentation.....	19
Tableau 2 : Ensemble des données récoltées pour les différentes modalités.	20
Tableau 3 : Ensemble des données 2021 récoltées aux différent(e)s dates/stades Zadoks.	20
Tableau 4 : Ensemble des données 2022 récoltées aux différent(e)s dates/stades Zadoks.	21
Tableau 5 : Échelle de cotation maladie.....	22
Tableau 6 : Indices de végétation recensés dans la littérature scientifique.	25
Tableau 7 : Matrice de confusion destinée au calcul du score d'exactitude.....	26
Tableau 8 : Test de SNK sur les rendements de 2021.....	29
Tableau 9 : Etude de corrélation de Pearson entre les rendements de 2021 et les données de biomasse de 2021 au stade Z89.....	29
Tableau 10 : Test de SNK sur les poids secs des épis à maturité en 2022.	30
Tableau 11 : Test de SNK sur les INN à différents stades Zadoks en 2021 et 2022.	31
Tableau 12 : Test de SNK sur les AUDPC à différents stades en 2022, basé sur l'AOV2 sans la modalité 200 kgN.ha ⁻¹	32
Tableau 13 : Test de SNK sur les AUDPC à différents stades en 2022, basé sur l'AOV2 sans la modalité 2F.....	32
Tableau 14 : Test de SNK sur les IV avec leur seuil optimal.....	34
Tableau 15 : Matrice de corrélation de Pearson entre les cotations maladies et la variable « % dégâts » sur l'année 2022.	34
Tableau 16 : Matrice de corrélation de Pearson entre l'AUDPC et la variable « % dégâts _{AUDPC} » sur l'année 2022.	34
Tableau 17 : Étude de corrélation de Pearson entre les différents INN et les IV sélectionnés.....	35
Tableau 18 : Étude de corrélation de Pearson entre les différents INN et RESAVI basé sur les feuilles saines et les feuilles avec dégâts.....	36

Liste des annexes

Annexe 1 : Bulletin d'analyse de l'azote dans le profil de terre réalisé le 1 mars 2021.....	49
Annexe 2 : Bulletin d'analyse de l'azote dans le profil de terre réalisé le début mars 2022.....	49
Annexe 3 : Opérations culturales de l'essai 2021.	49
Annexe 4 : Opérations culturales de l'essai 2022.	50
Annexe 5 : P-valeurs obtenues pour les deux AOV2 des données de rendement 2021.	50
Annexe 6 : P-valeurs obtenues pour l' AOV1 des INN à différents stades Zadoks en 2021 et 2022.	50
Annexe 7 : P-valeurs obtenues pour les deux AOV2 des AUDPC aux différents stades Zadoks en 2022.	51
Annexe 8 : Test de SNK pour chaque date sur les IV avec leur seuil optimal.	51
Annexe 9 : Graphique exprimant les cotations moyennes attribuées aux modalités « Fongicide » aux différents stades Zadoks.	52
Annexe 10 : Graphique exprimant les cotations moyennes attribuées aux modalités « Fertilisation » aux différents stades Zadoks.	52
Annexe 11 : Étude de corrélation entre le rendement, le poids sec des épis (Z89) et le poids des grains provenant de ces épis (Saison 2021).	52

I. Introduction

Le changement climatique représente une menace grandissante dans le monde. L'émission des gaz à effet de serre (GES) provoquée par l'activité humaine en est la cause majeure. Selon le sixième rapport du GIEC, l'utilisation de fertilisants synthétiques et organiques et la pratique de l'aquaculture engendrent un peu plus de 50% des émissions anthropiques de protoxyde d'azote (N₂O). En outre, des émissions qualifiées d'indirectes viennent gonfler ces chiffres. Elles ont pour origine les pertes d'azote par lessivage et ruissellement (Stocker, 2014 ; Canadell et al., 2021). L'agriculture subit également les conséquences de ces émissions de GES. Elle est la plus vulnérable face aux changements climatiques en raison de sa sensibilité aux paramètres météorologiques.

Consciente de cela, l'Union Européenne s'est fixée des objectifs pour atteindre la neutralité climatique à l'horizon 2050. Au niveau du secteur agricole, une des stratégies est de réduire l'application des produits fertilisants mais aussi des produits phytopharmaceutiques (European Commission, 2019). La dégradation de la qualité des sols, la contamination des eaux de surface et souterraines et les risques sur la santé humaine sont des conséquences néfastes de l'utilisation des produits destinés à la protection des plantes (Rani et al., 2021).

Toutefois, les maladies fongiques et les carences nutritives font partie des principaux facteurs limitants de la production agricole. Le challenge est donc le suivant : « Comment diminuer l'utilisation des intrants tout en maintenant un niveau de production suffisant pour subvenir aux besoins de la population ». Une des solutions est la pratique d'une agriculture de précision. Les parcelles agricoles sont généralement pulvérisées de manière uniforme. Cependant, les infestations sont souvent réparties de manière locale. De même, les applications d'engrais pourraient être effectuées uniquement sur les zones carencées. Les avantages seraient nombreux, tant d'un point de vue écologique qu'économique.

Les avancées technologiques dans le domaine de la télédétection permettent de diagnostiquer et cartographier à différentes échelles les éventuels stress des cultures (Khanal et al., 2020). De nombreuses études ont été menées dans des environnements contrôlés mais il est encore compliqué d'obtenir des résultats similaires en conditions de terrain. Des contraintes liées notamment aux conditions météorologiques expliquent cette difficulté. De plus, des lacunes en termes de faisabilités technico-économiques peuvent justifier la faible manipulation de ces outils par les agriculteurs.

Ce travail se porte sur la dissociation et la quantification des stress biotiques et abiotiques par imagerie multispectrale. Les avantages de cette méthode sont qu'elle peut être utilisée à proximité de la culture et est peu onéreuse. La culture étudiée est le blé d'hiver. Afin d'étudier l'impact de ces stress sur une multitude de variables agronomiques, des quantités variables d'engrais azotés et de fongicides ont été appliquées.

II. Synthèse bibliographique

1. Le blé d'hiver

1.1. Généralités

Le blé d'hiver, *Triticum aestivum* L., est une plante annuelle monocotylédone de la famille des Poaceae. Aussi appelé blé tendre ou froment d'hiver, il est la principale culture en Région Wallonne, couvrant pas loin de 120 000 ha, soit 16% de la superficie agricole utilisée (Statbel, 2020a ; Statbel, 2020b). Sa production est principalement destinée à trois filières que sont l'élaboration de biocarburants, l'alimentation animale et la valorisation « matière » des pailles, à hauteur de 29%, 29% et 25% respectivement. Le reste est destiné à l'export, à l'alimentation humaine ou est simplement restitué au sol (Delcour et al., 2014).

Au cours de son cycle, cette céréale passe par différents stades de développement. Afin de les identifier, une échelle de repérage, développée par Zadoks, Chang et Konzak, est utilisée comme référence internationale (Zadoks et al., 1974). La connaissance de ces stades et de leur chronologie est d'une importance cruciale pour la bonne gestion de la culture. En effet, le rendement est la résultante de trois composantes que sont la densité d'épis, le nombre de grains par épi et le poids des grains. Ces dernières se construisent à différentes phases du cycle au cours de la saison et une multitude de facteurs vont les influencer. Un des facteurs principaux est le contexte pédoclimatique. Il va jouer notamment sur la disponibilité en éléments nutritifs dans le sol ou encore sur l'apparition des maladies et ravageurs.

1.2. Nutrition azotée

1.2.1. Azote

L'azote est un nutriment minéral essentiel pour le développement des plantes. De par sa présence dans divers constituants tels que les acides aminés, les enzymes ou encore la chlorophylle, il influence de nombreux processus métaboliques comme l'activité photosynthétique et l'absorption des nutriments par les racines. (Gate et al., 1995 ; Hawkesford et al., 2013 ; Hawkesford, 2014 ; Rasmussen et al., 2015 ; Taiz et al., 2015).

Le prélèvement de ce macro-élément, sous forme nitrique ou ammoniacale, est déterminé par les besoins de la plante qui varient au cours de sa croissance. Concernant le blé d'hiver, le besoin en azote est plutôt faible en début de saison et se voit augmenter à partir du stade Zadoks (Z) 29 (Gate et al., 1995 ; Livre Blanc Céréales, 2017a). Les reliquats des précédents culturaux et la minéralisation de la matière organique fournissent une partie des besoins azotés mais la fertilisation est nécessaire pour assurer une nutrition optimale aux stades appropriés : (1) en sortie d'hiver, afin d'apporter les ressources nutritives nécessaires pour le tallage, (2) lors du redressement de la plante, afin de favoriser au mieux la montée en épis des talles et (3) au stade d'émission de la dernière feuille, afin de maximiser le nombre de grains par épis.

1.2.2. Stress azoté et symptômes foliaires

En raison de sa forte demande en azote, le blé est une des cultures qui utilise le plus de fertilisants dans le monde (Heisey et Norton, 2007). Un manque azoté peut très vite limiter, voire inhiber sa croissance. En effet, des déficiences en azote se marquent par une diminution de l'indice de surface foliaire et de la teneur en azote des feuilles par unité de surface foliaire (Lemaire et al., 2008). Cela engendre une activité photosynthétique moins efficace, marquée par un jaunissement de la biomasse foliaire qui peut se développer en nécrose sur les feuilles plus âgées (Gate et al., 1995 ; Taiz et al., 2015 ; Živčák et al., 2015).

1.3. Maladies fongiques

1.3.1. Septoriose

1.3.1.1. Généralités

La septoriose est une maladie fongique existant sous deux formes : la septoriose des épis et la septoriose foliaire. La première forme est causée par *Staganospora nodorum* (anamorphe : *Paeosphaeria nodorum*) et est retrouvée de manière très sporadique dans les champs wallons. La deuxième est causée par *Zymoseptoria tritici* (anamorphe : *Mycosphaerella graminicola*) et est la forme la plus dominante et problématique (Bataille et al., 2018 ; Cunfer, 1997 ; Livre Blanc Céréales, 2017d). Cette maladie foliaire est la plus impactante en termes de rendement des cultures du blé d'hiver en Europe. Elle est capable d'induire des pertes de rendement jusqu'à 50% (Bataille et al., 2018 ; Fones et Gurr, 2015).

1.3.1.2. Cycle de développement de *Zymoseptoria tritici*

Les infections ont lieu à deux périodes de l'année. La première est la période automne-hiver où ce sont les ascospores, spores issues de la reproduction sexuée, qui vont se disséminer dans l'air et vont se propager sur de longues distances (Eyal, 1987 ; Bannon et Cooke, 1998 ; Bataille et al., 2018). Elles sont produites et libérées par les périthèces, fructifications servant à la survie du pathogène et présentes sur les résidus de culture et les repousses (Livre Blanc Céréales, 2017d ; Shaw et Royle, 1989).

La deuxième période a lieu dès le printemps. L'infection se fait via les pycnidiospores, spores issues de la reproduction asexuée, qui, une fois libérées des pycnides, se propagent sur de courtes distances par effet splash principalement (Eyal, 1987 ; Bannon et Cooke, 1998 ; Bataille et al., 2018). Les pluies printanières vont jouer un rôle important dans le développement de l'épidémie. Ces spores constituent la forme majoritairement responsable de la dissémination de la maladie lors de la saison culturale du blé d'hiver (Bataille et al., 2018).

Peu importe leur nature, les spores infectent le blé en pénétrant les feuilles via les stomates afin d'atteindre l'apoplasme. Il s'ensuit une phase de latence de 8 à 14 jours pendant laquelle le champignon se développe dans les tissus de manière asymptomatique (Sánchez-Vallet et al., 2015 ; Keon et al., 2007). L'accélération de sa croissance se marque par son entrée en phase nécrotrophe. Les premiers symptômes foliaires apparaissent et, sous les stomates, s'opère la production des pycnides. Les périthèces, quant à eux, sont produits dès la mort du tissu hôte, soit 25 à 30 jours après l'infection initiale (Livre Blanc Céréales, 2017d ; Sánchez-Vallet et al., 2015).

1.3.1.3. Symptômes foliaires

La septoriose peut s'exprimer durant la phase végétative, avant la période hivernale, jusqu'au remplissage des grains. C'est au printemps qu'elle se manifeste le plus souvent, avec des conditions météorologiques optimales pour la germination des spores, soit des conditions humides avec des températures supérieures à 3-4 °C. Les premiers symptômes observables sont la formation de petites poches d'eau sous l'épiderme. Ces zones imbibées deviennent très rapidement des nécroses brunâtres avec un halo chlorotique et présentant, un peu plus tard, des ponctuations noires en leur centre (Figure 1). La cause de ces modifications phénotypiques est la production des pycnides et la libération de ses spores (Livre Blanc Céréales, 2017d ; Keon et al., 2007).

Ces tâches peuvent apparaître soit en bordure de limbe et sont alors souvent irrégulières, soit au milieu du limbe où elles ont tendance à s'étendre de manière longitudinale en suivant les nervures. Si l'infection s'aggrave, leur coalescence peut avoir lieu, entraînant la nécrose partielle ou totale de la feuille. Une teinte plus blanchâtre peut alors apparaître (Livre Blanc Céréales, 2017d ; Rym Ben, 2010).



Figure 1 : Symptômes foliaires de la septoriose (Arvalis, 2012).

1.3.2. Rouille jaune

1.3.2.1. Généralités

La rouille jaune est une maladie fongique causée par *Puccinia striiformis* Westend, un basidiomycète comprenant 9 sous-espèces et dont l'une, nommée *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* Eriks, est celle impactant le blé d'hiver. Cette maladie est largement répandue dans le monde et engendre des pertes de rendement jusqu'à 70% (Bataille et al., 2018 ; Coram et al., 2008 ; Livre Blanc Céréales, 2017c).

1.3.2.2. Cycle de développement

Les premières infections débutent à la fin de l'hiver, avec la dissémination des urédospores dans l'air et par la pluie. Leur germination nécessite un minimum de 3 heures d'humidité saturée (Livre Blanc Céréales, 2017c). Ces spores, issues de la reproduction asexuée, développent un tube germinatif afin de pénétrer la feuille par les stomates. Il s'ensuit le développement et la propagation d'hyphes dans les tissus foliaires menant à l'apparition d'urédies (Coram et al., 2008 ; Chen, 2005 ; Chen et al., 2014). Ces urédosores produisent leurs spores aussi longtemps que les conditions météorologiques le permettent, à savoir à des températures entre 7 et 25°C. De plus, la survie du pathogène nécessite du tissu végétal vivant (Bataille et al., 2015).

Ce champignon possède également une reproduction sexuée mais un souci de synchronisation avec l'hôte alternatif l'empêche de se réaliser en Europe (Livre Blanc Céréales, 2017c).

1.3.2.3. Symptômes foliaires

Les symptômes apparaissent environ une semaine avant la sporulation, soit 6 à 8 jours après l'infection (Livre Blanc Céréales, 2017c). Ils sont identifiables par des chloroses, desquelles émergent des pustules ovales de couleur jaune-orange alignées entre les nervures des feuilles sous forme de stries longues et étroites (Livre Blanc Céréales, 2017c ; Chen et al., 2014). Ces éruptions peuvent apparaître dès l'émergence des plantules, jusqu'à la fin de la floraison (Bataille et al., 2018). Les nervures n'étant pas très développées sur les jeunes plantules, les pustules se retrouvent généralement dispersées sur toute la largeur de la feuille (Figure 2). Lors de fortes infestations, les symptômes peuvent également apparaître sur les épis (Bataille et al., 2018).



Figure 2 : Symptômes foliaires de la rouille jaune (Arvalis, 2012).

1.3.3. Rouille brune

1.3.3.1. Généralités

La rouille brune est une maladie fongique causée, tout comme la rouille jaune, par un basidiomycète biotrophe. Ce champignon, nommé *Puccinia triticina* Eriks, se retrouve dans toutes les régions où le blé est cultivé. En Europe, les dégâts peuvent atteindre jusqu'à 30% du rendement du blé d'hiver (Bataille et al., 2018 ; Roelfs et al., 1992 ; Livre Blanc Céréales, 2017b)

1.3.3.2. Cycle de développement

Tout comme la rouille jaune, l'infection débute par la germination des urédospores sur les feuilles. Des températures entre 15 et 25°C avec 100% d'humidité dans l'air durant 4 à 8 heures sont nécessaires pour le développement du tube germinatif (Livre Blanc Céréales, 2017b; Bolton et al., 2008). Lorsque ce dernier parvient à atteindre le stomate, la production d'urédies se fait en empruntant les mêmes étapes que celles de *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* Eriks. Il faut 7 à 20 jours après inoculation pour voir émerger et se disperser de nouvelles spores dans l'air (Livre Blanc Céréales, 2017b ; Bolton et al., 2008 ; Duvivier et al., 2016).

À nouveau, la reproduction sexuée joue un rôle mineur voire nul en Belgique étant donné la rareté des hôtes alternatifs (Bolton et al., 2008).

1.3.3.3. Symptômes foliaires

De même que l'infection, les symptômes apparaissent tard dans la saison, vers le stade Z39. Lors d'hiver doux, ils peuvent se manifester plus rarement dès le stade Z12 (Bataille et al., 2018 ; Zadoks et al., 1974). Ces symptômes se caractérisent par des pustules brunes-orangées réparties aléatoirement sur le limbe. Leur taille est supérieure à celle de la rouille jaune, avec environ 1,5mm de diamètre (Figure 3). Selon la sensibilité de la variété à la maladie, un halo chlorotique peut se développer autour des urédies (Bataille et al., 2018 ; Livre Blanc Céréales, 2017b ; Bolton et al., 2008).



Figure 3 : Symptômes foliaires de la rouille brune (Arvalis, 2012).

2. Télédétection

2.1. Introduction

Traditionnellement, les expérimentations en agriculture nécessitent la destruction de matériel végétal pour la production de données. Les mesures de biomasse, d'indice de surface foliaire ou encore de teneur en azote en font des exemples parfaits. Pour la plupart des données, leurs récoltes sont chronophages et onéreuses. Ces lacunes ont incité à utiliser de nouvelles technologies telles que la télédétection. Ce terme se rapporte à l'utilisation d'instruments mesurant le rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par un objet/organisme. En effet, une plante possède une signature spectrale qui se voit modifiée lorsqu'un stress, biotique ou abiotique, lui est appliqué (Martinelli et al., 2015). En plus d'être non-destructrice, cette méthode augmente le volume de données tout en étant fiable, précis et dynamique (Ali et al., 2019).

2.2. Les capteurs

Les instruments, ou capteurs, se différencient notamment par leur caractère passif ou actif. Les capteurs actifs émettent un rayonnement et mesurent l'énergie réfléchie ce qui les rend quasi indépendants des conditions environnementales. Néanmoins, ces outils tels que Radar sont moins adaptés à cette étude étant donné qu'ils travaillent avec une résolution spatiale trop faible (Moshou et al., 2006 ; Rosell et Sanz, 2012 ; Weiss et al., 2020). Un autre exemple de capteur actif avec une meilleure résolution est la caméra à fluorescence. Cependant, son maniement s'opère en laboratoire et requiert l'exportation du matériel végétal (Moshou et al., 2005 ; Tartachnyk et al., 2006). Les capteurs passifs mesurent des rayonnements émis ou réfléchis naturellement. Ils sont utilisés en thermographie ou encore en imagerie couleur, multispectrale et hyperspectrale. Concernant la thermographie, celle-ci se trouve être plus que pertinente dans l'identification de stress puisque que la présence de ces derniers induit souvent un changement des propriétés thermiques des plantes. Cela permet une détection précoce avant même l'apparition des symptômes (Martinelli et al., 2015 ; Galieni et al., 2021). Toutefois, la thermographie reste difficile à utiliser dans des conditions de terrain à cause de son incapacité à identifier la nature des stress (Walter et al., 2015 ; Gómez-Candón et al., 2016). L'imagerie couleur se base sur les composantes rouge vert bleu (RVB) de la lumière visible pour obtenir une image qui se rapproche de la perception de l'œil humain. Elle possède cette même faculté à caractériser des stress de différentes natures mais elle est bien plus apte à être exploitée en extérieur (Padmavathi et Thangadurai, 2016 ; Zermas et al., 2021). Il en est de même pour l'imagerie multispectrale et hyperspectrale. Cependant, elles mesurent le rayonnement solaire réfléchi dans différentes gammes de longueurs d'ondes, variant de 400 à 2500 nm (Martinelli et al., 2015). La différence entre ces deux techniques résulte dans le nombre de bandes spectrales mesurées qui ne dépasse pas la dizaine pour le multispectral, tandis qu'il peut franchir les 200 pour l'hyperspectral. De plus, la largeur des bandes est plus étroite pour l'hyperspectral ce qui augmente sa précision. Ce dernier apporte donc des informations plus riches mais demande un temps d'acquisition plus important et nécessite des coûts bien supérieurs comparativement à l'imagerie multispectrale.

Le point commun entre les capteurs cités précédemment est qu'ils produisent des images numériques. D'autres capteurs non-imageurs peuvent également être intéressants comme le spectromètre. Ce capteur passif permet d'obtenir une courbe du flux lumineux réfléchi par la canopée sur une large gamme de longueurs d'ondes. Cependant, l'imagerie possède l'avantage de donner des informations sur l'intensité et la distribution spatiale des signaux tandis que les capteurs non-imageurs ne considèrent que l'intensité du signal (Wang et al., 2018).

2.3. Propriétés spectrales des feuilles

La végétation possède une signature spectrale qui est définie par ses propriétés biophysiques et biochimiques (Figure 4). Du point de vue foliaire, cette signature est similaire pour toutes les plantes vertes (Sahoo et al., 2015). Ce sont la structure cellulaire et les contenus en pigments, en eau et en macromolécules qui définissent le spectre d'absorbance des feuilles (Cavender-Bares et al., 2020). Les pigments foliaires vont absorber la lumière dans le domaine du visible, c'est-à-dire de 400 à 700 nm. Au-delà de 700 nm et jusqu'à 1100 nm, c'est le domaine du proche infrarouge. Les pigments ne vont absorber que très peu de lumière ce qui explique les valeurs de réflectance élevées dans ce domaine. Ces valeurs augmentent principalement avec la taille des cellules et l'espace intercellulaire (Sahoo et al., 2015). C'est dans l'infra-rouge à ondes courtes, de 1100 nm à 2500 nm, que le contenu en eau, les protéines, la cellulose, la lignine et l'amidon vont influencer le facteur de réflexion des feuilles (Sahoo et al., 2015 ; Cavender-Bares et al., 2020). Cela étant, la variation du contenu en eau des feuilles peut impacter le rayonnement réfléchi à partir de 800 nm (Damm et al., 2018).

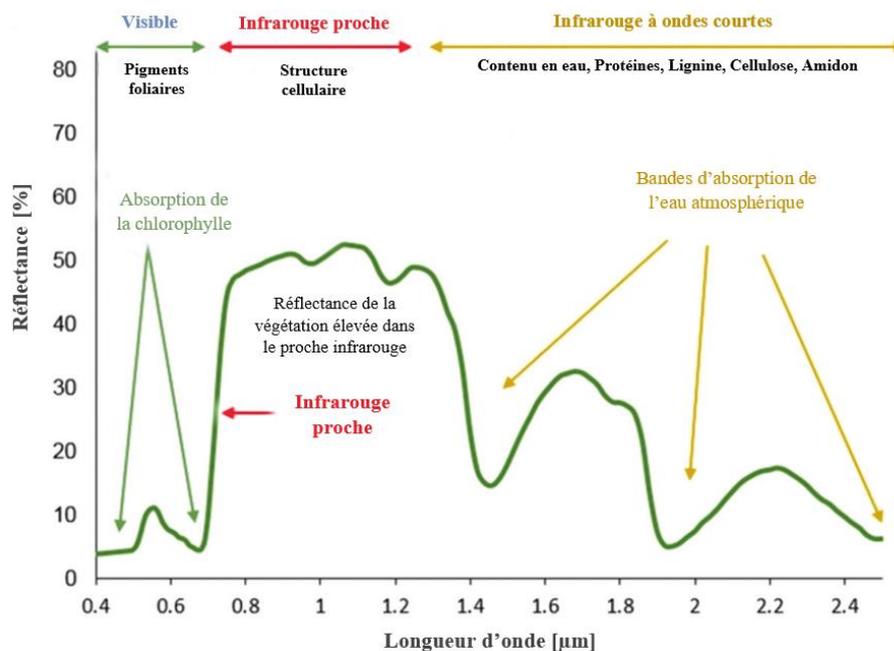


Figure 4 : Signature spectrale des plantes (Anamaria et Tudor-Mihai, 2016).

2.4. Stress et indices de végétation

Les pigments photosynthétiques sont des composés essentiels à la synthèse de molécules et composés organiques. Ils se caractérisent par des signatures spectrales uniques. Les chlorophylles *a* et *b* en sont les plus abondantes dans le sous-règne des *Viridiplantae*. Les longueurs d'ondes qu'elles absorbent sont typiquement la région bleue et rouge du spectre, soit respectivement vers 430 nm et 660 nm (Taiz et al., 2015). La quantité de rayonnement solaire absorbée par une feuille étant fonction de la concentration en chlorophylle, la production primaire est directement dépendante de cette dernière. De plus, et de par leur contenu en azote, les chlorophylles peuvent être de bons estimateurs de l'état nutritionnel des plantes (Blackburn, 2006). Cependant, la teneur en chlorophylle est influencée par d'autres facteurs ou stress

tels que les agents pathogènes (Gitelson et al., 2003 ; Franke et Menz, 2007). En effet, la majorité des maladies fongiques du blé entraîne une diminution de la concentration en chlorophylle. Le facteur de réflexion foliaire augmente alors et son pic, normalement situé vers 550 nm, se décale de plus en plus vers le rouge (Tucker et al., 1979 ; Adams et al., 1999 ; Merzlyak et al., 2003). Ce changement est perçu visuellement par un jaunissement des feuilles, appelé chlorose. Sur base de cela, des indices de végétation (IV) ont pu être établis pour mesurer et quantifier l'impact de ces changements physiologiques sur le blé d'hiver. Ces IV sont, en réalité, des combinaisons mathématiques de facteur de réflexion à différentes longueurs d'ondes.

Un premier indice intéressant est l'indice de réflectance photochimique (PRI). Considéré comme insensible aux changements de structure cellulaire, cet IV a été proposé pour mesurer les changements de l'activité photosynthétique du tournesol (Gamon et al., 1992). Cela étant, il présente une aptitude élevée à quantifier le niveau d'infection de la rouille jaune sur le blé d'hiver (Huang et al., 2007). Le PRI tire sa formule d'un IV classique à large bande qu'est l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) (Tucker, 1974 ; Peñuelas et al., 1995). En effet, ce dernier utilise la réflectance dans le rouge et le proche infrarouge pour estimer de nombreuses variables agronomiques telles que l'indice de surface foliaire, le rendement en grain ou encore la biomasse (Fernandez et al., 1994 ; Thenkabail et al., 2000 ; Hansen et Schjoerring, 2003). Ainsi, plusieurs NDVI sont définis à partir de différentes valeurs de réflectance. Par exemple, le NDVI basé sur le facteur de réflexion à 900 nm et 680 nm est utilisé comme moyen d'évaluation des effets de la salinité sur l'orge tandis que pour mesurer la verdure des plantes, le NDVI est défini sur base des bandes à 800 nm et 680 nm (Peñuelas et al., 1997 ; Xue et Su, 2017). Il a également été utilisé pour identifier des stress liés aux maladies et à l'azote (Zhao et al., 2004 ; Devadas et al., 2009).

À côté du PRI, d'autres IV ont été formulés en s'inspirant du NDVI. C'est le cas de l'indice de réflectance de l'azote (NRI) qui est initialement utilisé pour estimer le statut azoté du maïs mais qui s'avère être pertinent pour distinguer une plante saine d'une plante infectée par la rouille jaune ou la rouille brune (Bausch et Duke, 1996 ; Devadas et al., 2009). Cependant, en présence de rouille noire, la distinction ne peut se faire qu'en combinant le NRI avec l'indice transformé du taux d'absorption de la chlorophylle (TCARI) (Devadas et al., 2009). Cet IV possède une sensibilité accrue aux faibles concentrations en chlorophylle pouvant s'expliquer par l'utilisation du canal spectral à 700 nm qui est l'indicateur le plus sensible à ce pigment (Haboudane et al., 2002 ; Sims et Gamon, 2002).

Ainsi, de nombreux IV s'appuient sur les chlorophylles pour décrire l'état d'un phénomène. Mais il existe une deuxième grande classe de pigments végétaux qui sont pris en compte par d'autres IV : les caroténoïdes. En effet et de par leur rôle dans l'activité photosynthétique, l'estimation de leur concentration permet d'évaluer l'état de stress dans la végétation (Zhou et al., 2017). En général, cette estimation est réalisée indirectement étant donné que c'est le rapport des caroténoïdes sur les chlorophylles qui est estimé. C'est le cas avec l'indice pigmentaire insensible à la structure (SIPI), l'indice de réflectance de la sénescence de la plante (PSRI) et l'indice normalisé du rapport pigment chlorophylle (NPCI). Ces derniers ont la faculté de dissocier, comme le NRI, une plante saine d'une plante infectée par la rouille jaune (Devadas et al., 2009).

La plupart des indices cités précédemment sont basés sur le domaine du visible mais certains ont également recours à des bandes du proche infra-rouge comme la bande à 800 nm. Cela s'explique par la relation existante entre la structure des tissus foliaires, à l'origine de la réflexion importante dans ce domaine, et la concentration en pigments (Ollinger, 2011). Par ailleurs, d'autres indices utilisant cette bande se sont avérés pertinents dans l'estimation du statut azoté des plantes (Cao et al., 2013).

2.5. Dissociation des stress

De nombreuses études ont cherché à identifier un stress par télédétection sur des plantes qui n'en présentaient qu'un seul (Franke et Menz, 2007 ; Zheng et al., 2018 ; He et al., 2018 ; Kitić et al., 2019) et/ou sur des plantes cultivées en environnement contrôlé (Thomas et al., 2018 ; Gold et al., 2020). Pourtant, les cultures sont soumises à de multiples stress de natures différentes et les recherches effectuées en conditions contrôlées sont non-représentatives de la réalité du terrain (Poorter et al., 2016).

À ce jour, seules deux études se sont attardées sur la discrimination entre un stress biotique et abiotique. Zhang et al. (2012) ont tenté de développer une méthode utilisant des données issues d'un spectromètre. Même si elle s'est avérée efficace, celle-ci est sujette à des confusions symptomatiques et structurelles au niveau de la canopée (Reynolds et al., 2020). Une éventuelle quantification des stress pourraient être fastidieuse à réaliser sur base de données spectrales. Peteinatos et al. (2016) ont utilisé le spectromètre combiné à un fluorimètre pour identifier plusieurs stress sur du blé de printemps cultivé en pot. Cette étude mentionne que les capteurs imageurs ne sont pas adaptés à la dissociation d'un stress azoté et d'un stress lié aux maladies fongiques.

III. Objectifs

Ce travail est divisé en trois parties : la première est l'étude des différentes modalités de fertilisation et d'application de fongicides. L'objectif est d'identifier des corrélations entre différentes variables agronomiques d'intérêt et mesurer l'impact des traitements sur ces variables.

Le second objectif vise à évaluer la capacité des caméras multispectrales à identifier et dissocier des stress biotiques et abiotiques en conditions de terrain. Cette étape s'appuie notamment sur la littérature et la segmentation de différents éléments de la canopée.

Finalement, la quantification individuelle des stress sera réalisée et les résultats seront comparés aux variables de référence spécifiques à chacun d'eux. Ces variables sont l'indice de nutrition azotée (INN) et la cotation maladie.

IV. Matériel et méthodes

1. Essais expérimentaux

1.1. Description générale

Les essais expérimentaux 2021 et 2022 ont été réalisés en région de Hesbaye, à Gembloux, sur un sol limoneux à drainage naturel favorable avec un horizon B textural tacheté (SPW et al., 2021). Le bulletin d'analyse d'azote dans le profil de terre de l'essai 2021 est présenté dans l'Annexe 1 et celui de l'essai 2022 dans l'Annexe 2. Les coordonnées géographiques précises sont les suivantes : 50°32'44"N et 4°44'13"E pour l'essai 2021 et 50°32'45.1"N et 4°44'02.4"E pour l'essai 2022. Le climat y est tempéré avec une température moyenne annuelle de 10,2 °C, 793.4 mm de précipitations par an et un rayonnement solaire global de 1044 J.cm⁻².jour⁻¹ (IRM, 2022). Les bilans saisonniers sont détaillés dans les Figures 5 et 6 et reprennent les données de la station météorologique d'Éghezée, située à 10 km des essais (Agromet, 2022).

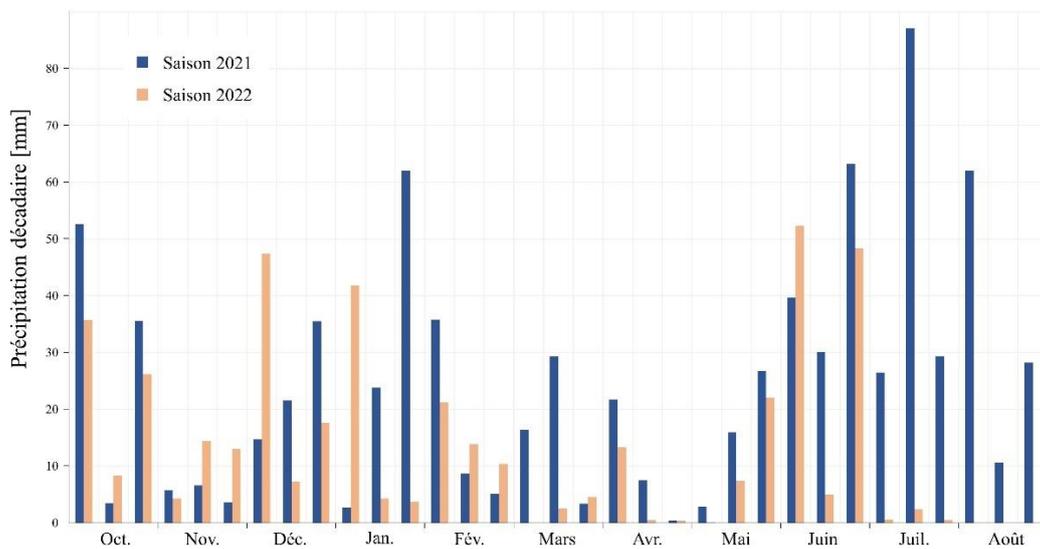


Figure 5 : Précipitations décadaires sur les saisons 2021 et 2022.

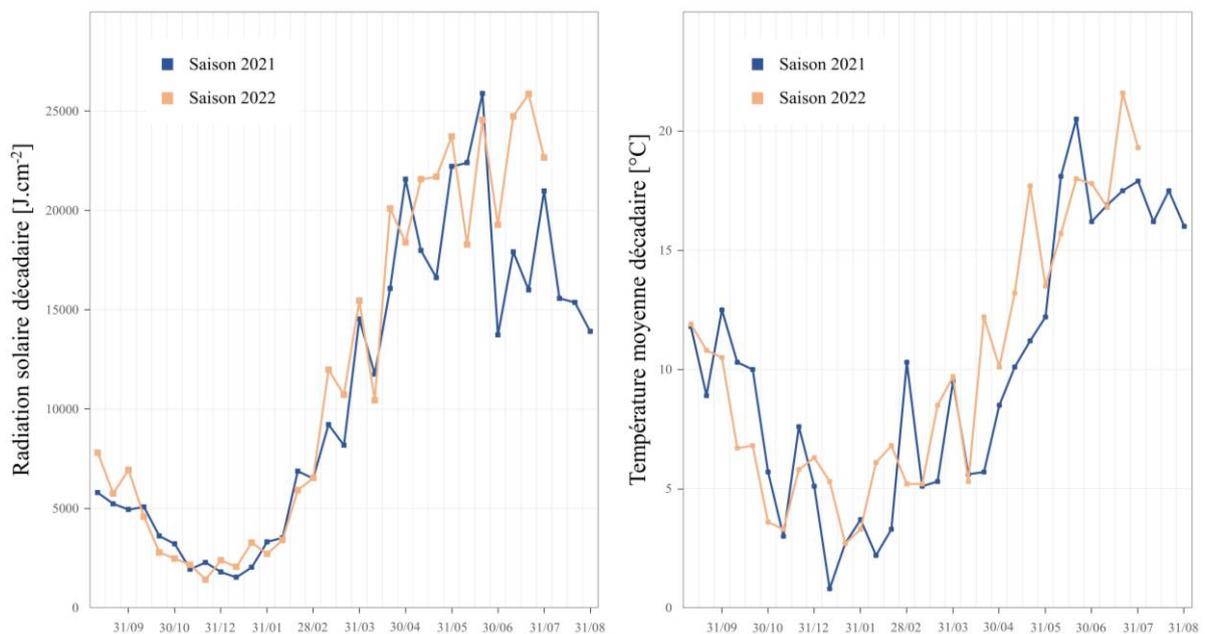


Figure 6 : Radiation solaire et température moyenne décadaires sur les saisons 2021 et 2022.

1.2. Protocole expérimental

L'expérimentation s'est portée sur le blé d'hiver et a eu pour cible l'étude de différentes modalités de fertilisation azotée et de traitements fongiques qui sont détaillées dans le Tableau 1. Les variétés utilisées étaient LG Vertikal pour la saison 2021 et Bennington pour celle de 2022. Concernant la fertilisation, elle a été fractionnée sur trois stades de développement clés que sont le tallage (Zadoks 23-25), le redressement/premier nœud (Zadoks 30) et le stade dernière feuille étalée (Zadoks 39). Chacune des modalités a été déterminée selon des objectifs précis. Premièrement, la modalité 180 kgN.ha⁻¹ est la fertilisation traditionnelle en trois apports équivalents. La modalité 200 kgN.ha⁻¹, calquée sur la précédente, permet de favoriser l'émission des talles en augmentant la dose de la première fraction de 20 kgN.ha⁻¹. Enfin, les deux modalités extrêmes, que sont celles à 120 kgN.ha⁻¹ et 260 kgN.ha⁻¹, ont été définies de la sorte afin d'accentuer les caractéristiques phénotypiques attendues et contrastées. Concernant les traitements fongiques, ceux-ci se différenciaient par le nombre d'interventions, variant entre zéro et trois. L'application du fongicide a été réalisée au stade Z39 pour la modalité « 1F », aux stades Z32 et Z55 pour la modalité « 2F » et aux stades Z32, Z39 et Z65 pour la modalité « 3F ».

Tableau 1 : Modalités de l'expérimentation.

Fertilisation [kgN.ha ⁻¹]				Nombre de traitements fongiques (F)				Modalité
Zadoks 23-25	Zadoks 30	Zadoks 39	Apport total	0F	1F	2F	3F	
40	40	40	120	120_0F	120_1F	120_2F	120_3F	
60	60	60	180	180_0F	180_1F	180_2F	180_3F	
80	60	60	200	200_0F	200_1F	/	200_3F	
100	80	80	260	260_0F	260_1F	260_2F	260_3F	

Le plan expérimental était un dispositif en quatre blocs aléatoires complets dont les deux facteurs fixes sont la fertilisation et le traitement fongique. Chaque modalité est ainsi répétée à quatre reprises. La particularité de ce plan est que chaque micro-parcelle était doublée. La raison à cela est liée à la nature des données à récolter. En effet, certaines sont destructrices tandis que d'autres requièrent des micro-parcelles exemptes de dégradation.

De ce fait, chaque bloc présentait 15 modalités réparties sur 30 micro-parcelles rectangulaires de 5,9 mètres sur 1,9 mètre. La modalité combinant une fertilisation à 200 kgN.ha⁻¹ et un traitement fongique en deux interventions n'a pas été représentée en raison d'une contrainte de superficie liée à la quantité importante d'essais présents sur les terres agricoles.

Les itinéraires techniques des deux saisons et d'autres caractéristiques agronomiques sont détaillés en Annexe 3 et 4. Les moments d'application des fertilisants et des fongicides ont dû être adaptés en raison des conditions météorologiques.

2. Collecte des données

2.1. Généralités

Comme énoncé précédemment, certaines données ont été obtenues à partir de micro-parcelles qui n'ont subi aucun prélèvement. Ce sont les données de rendement et de poids de mille grains (PMG). Les autres micro-parcelles ont servi pour les cotations maladies, les mesures du taux de protéines dans le grain et pour la récolte de données destructrices. Ces dernières sont identifiées sous l'appellation « données agronomiques » et sont détaillées au point suivant.

Par soucis de temps et de main d'œuvre, une multitude d'informations n'ont pu être recueillies pour chacune des dates et modalités. Le détail est présenté dans le Tableau 2, 3 et 4.

Tableau 2 : Ensemble des données récoltées pour les différentes modalités.

Modalité	Données agronomiques	Cotations maladies	Imagerie	Rendement ^a	PMG ^a	Protéine ^a
120_0F	<input checked="" type="checkbox"/>					
120_1F	<input checked="" type="checkbox"/>					
120_2F	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
120_3F	<input checked="" type="checkbox"/>					
180_0F	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
180_1F	<input checked="" type="checkbox"/>					
180_2F	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
180_3F	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
200_0F	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
200_1F	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
200_3F	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
260_0F	<input checked="" type="checkbox"/>					
260_1F	<input checked="" type="checkbox"/>					
260_2F	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
260_3F	<input checked="" type="checkbox"/>					

a : Les données n'ont été obtenues que pour la saison 2021.

Tableau 3 : Ensemble des données 2021 récoltées aux différent(e)s dates/stades Zadoks.

Date	Stade	Données agronomiques	Cotations maladies	Imagerie
12-mars	22-25	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
25-mars	26	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
09-avri.	29	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
15-avri.	29	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
21-avri.	31	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
28-avri.	31	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
03-mai	31	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
11-mai	32	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
02-juin	39	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
11-juin	58	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
16-juin	65	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
25-juin	71	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
02-juil.	75	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
09-juil.	75	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
12-juil.	77	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
20-juil.	80	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
02-août	89	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Tableau 4 : Ensemble des données 2022 récoltées aux différent(e)s dates/stades Zadoks.

Date	Stade	Données agronomiques	Cotations maladies	Imagerie
17-mars	22-23	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
25-mars	25	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
11-avri.	30	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
19-avri.	31	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
25-avri.	31	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
02-mai	32	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
09-mai	33	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
17-mai	39	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
23-mai	52	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
30-mai	62	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
02-juin	65	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
13-juin	71	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
21-juin	73	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
25-juil	89	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2.2. Données agronomiques

Le terme « données agronomiques » désigne les données obtenues par destruction de matériel végétal au cours des saisons. Pour la saison 2021, elles ont été obtenues à trois dates différentes, correspondant aux stades Z39, Z65 et Z89 qui sont respectivement les stades dernière feuille, pleine floraison et maturation complète des grains (Tableau 3). Pour la saison 2022, elles ont été effectuées aux stades Z30, Z32, Z39, Z65, Z73 et Z89 afin d'ajouter des informations relatives à la phase de redressement, du début de l'élongation et du développement des grains (Tableau 4). Pour chacune des dates, les prélèvements ont été effectués sur 21 micro-parcelles afin d'obtenir trois échantillons par modalité (Tableau 2).

La biomasse aérienne a été récoltée sur 50 cm de long et sur trois rangs accolés. Chaque rang mesurant 14,6 cm de large, la surface récoltée était de 2190 cm². Selon le stade Zadoks, les différents organes que sont les épis, les tiges, les dernières feuilles et les autres feuilles ont été séparés et pesés (poids frais) avant d'être mis à l'étuve durant 72 heures à 60°C. Ils ont à nouveau été pesés à la sortie de l'étuve (poids sec). Enfin, les échantillons ont été envoyés en laboratoire pour obtenir les données liées aux taux d'azote dans les différents organes selon la méthode Dumas. Ces données, en plus d'être potentiellement valorisées de manière isolée, ont permis de calculer l'INN selon la formule suivante (Lemaire et Meynard, 1997) :

$$INN = \frac{\sum \text{azote prélevé par chacun des organes} / \text{Biomasse}_{\text{totale}}}{5.35 \times \text{Biomasse}_{\text{totale}}^{-0.442}}$$

2.3. Cotations maladies

Les différentes cotations ont été effectuées sur la septoriose et la rouille brune au cours de la saison 2021 et sur la rouille jaune au cours des deux saisons. Ces maladies sont les seules à s'être manifestées et leurs symptômes foliaires sont apparus au stade Z65 en 2021 tandis qu'ils se sont manifestés dès le stade Z30 en 2022. Chaque micro-parcelle s'est vue recevoir, pour chacune des maladies, une valeur entre 1 et 9 exprimant la capacité de résistance de la variété. Cette échelle de cotation se base sur le nombre de plants, l'intensité des dégâts et l'étage foliaire atteint (Tableau 5).

Tableau 5 : Échelle de cotation maladie.

		Feuilles affectées											
		F4 et feuilles inférieures			F3			F2			F1		
Intensité moyenne		faible	moyen	élevé	faible	moyen	élevé	faible	moyen	élevé	faible	moyen	élevé
Répartition	< 3 plantes	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
	< 10 plantes	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
	10<X<50 plantes	8	8	8	8	8	8	7	7	7	6	6	6
	1 plante sur 10	8	8	7	7	7	6	6	5	4	4	3	2
	1 plante sur 2	8	8	7	7	6	6	5	4	4	3	2	2
	Toutes les plantes	8	8	7	7	6	5	5	4	3	3	2	1
	Toutes les feuilles	7	7	6	6	5	5	4	3	3	2	1	1

Les cotations maladies ont été réalisées avec environ une semaine d'intervalle entre chacune. Les dates précises et stades correspondant sont présentés dans les Tableaux 3 et 4.

2.4. Imagerie

2.4.1. Caméras

L'acquisition d'images s'est faite à l'aide d'une caméra multispectrale Tétracam Micro-MCA (Tetracam Inc., Gainesville, FL, Etats-Unis) et de deux caméras RVB GO-5000C-USB (JAI A/S, Copenhagen, Danemark). La caméra multispectrale est en réalité un réseau de six caméras monochromes équipées de capteurs CMOS de 1,3 Mpx (1024 x 1280) dont les filtres optiques sont des filtres passe-bande étroits centrés sur 490, 550, 680, 720, 800 et 900 nm. Chaque bande possède une largeur de 10 nm hormis celle à 900 nm qui est deux fois plus large. Les caméras RVB ont quant à elles une taille d'image de 3,2 Mpx (2560 x 2048). L'ouverture de ces dernières étant modulable, elle a été fixée à f/4,0. Leur utilité est limitée à la vision couleur et stéréoscopique. Les différentes caméras étaient montées sur une plateforme de phénotypage de sorte que la hauteur entre le sommet de la canopée et les caméras soit de 1,6 mètre (Figure 7).

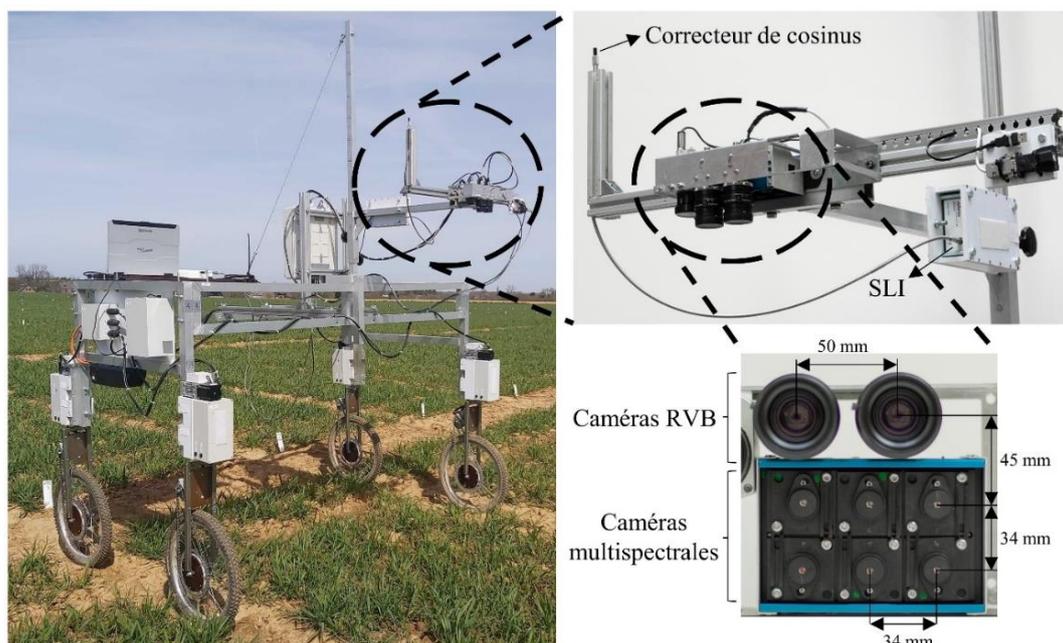


Figure 7 : Plateforme de phénotypage munie des différentes caméras et du spectromètre.

2.4.2. Acquisition des images

Les images ont été capturées à seize dates différentes en 2021 (Tableau 3). Pour chaque caméra, l'acquisition s'est faite à raison de quatre images par micro-parcelle. En 2022, seules trois images ont été capturées par micro-parcelle et à treize dates différentes (Tableau 4). Les réponses spectrales de la végétation étant dépendantes des conditions d'ensoleillement, il a été nécessaire de les normaliser par

rapport au flux incident. C'est via le spectromètre de lumière incidente (SLI) AvaSpec-ULS2048 que la mesure de ce flux a été réalisée et ce à chaque nouvelle capture d'image (Avantes, Apeldoorn, Pays-Bas). Cet instrument de mesure était également monté sur la plateforme de phénotypage et était muni d'une fibre optique avec correcteur de cosinus pointant vers le ciel. Il ne fallait que quelques dixièmes de seconde pour enregistrer le flux incident, en plus de l'ajustement du temps d'exposition de chaque caméra. En effet, les algorithmes d'auto-exposition ont été adaptés pour éviter toute saturation dans les images (Dandrifosse et al., 2020). A côté de cela, la variation du temps d'exposition entre caméras a engendré un léger décalage temporel à chaque prise.

3. Traitement des données de référence

Ce travail étant porté sur le stress azoté et les dégâts foliaires occasionnés par des maladies fongiques, trois variables ont été sélectionnées pour être étudiées. Il s'agit du rendement agronomique, de l'INN et des cotations maladies. L'objectif était de mesurer l'influence qu'ont les différentes modalités sur ces trois variables de référence. Pour chacune d'elles, une analyse de la variance suivie d'un test de Student-Newman-Keuls (SNK) ont été effectuées. Ce dernier permet d'identifier les moyennes significativement différentes les unes des autres en les classant dans des sous-ensembles. Le seuil de signification a été défini à 0.05. Les conditions d'application ont été systématiquement vérifiées via le test de Shapiro-Wilk (normalité) et le test de Levene (égalité des variances).

Concernant les cotations maladies, les analyses ont été effectuées sur des valeurs modifiées. Une première transformation fut la conversion de l'échelle de 1 à 9 en une échelle de 0 à 1 selon la formule suivante :

$$Cotation = (9 - Cotation_{initiale})/8$$

Ensuite, les nouvelles cotations ont permis de calculer l'aire sous la courbe de progression de la maladie (AUDPC). Cette nouvelle variable est une mesure quantitative de l'intensité de la maladie au fil du temps. Elle a été obtenue selon la formule suivante (Jeger et Viljanen-Rollinson, 2001) :

$$AUDPC = \sum_{i=1}^n \frac{(Cotation_{date_i} + Cotation_{date_{i+1}}) * \Delta t}{2}$$

avec dt = laps de temps entre $date_i$ et $date_{i+1}$.

Comparativement à la saison 2022, la saison 2021 a été touchée assez tardivement par des maladies fongiques, engendrant peu de données pertinentes. L'analyse ne s'est donc portée que sur l'année 2022.

4. Traitement des images

4.1. Pré-traitement des images

Le prétraitement des images est synthétisé à la Figure 8. La première opération consistait en l'alignement des différentes images. En effet, cette opération était nécessaire en raison des décalages spatiaux entre caméras (Figure 7). La méthode d'alignement B-spline a été utilisée comme solution à ce problème (Dandrifosse et al., 2021).

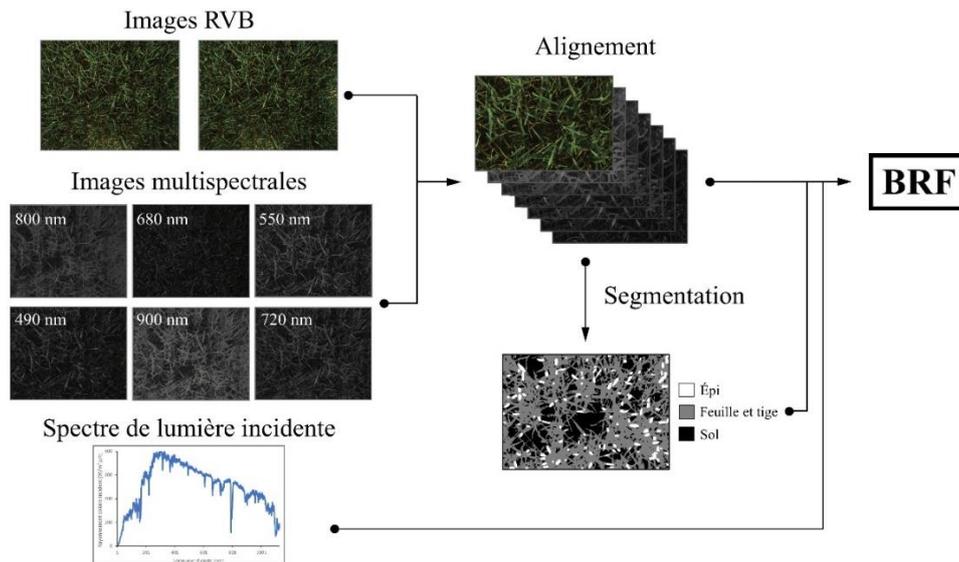


Figure 8 : Procédé de pré-traitement des images.

La seconde opération fut la segmentation des images. La première phase visait à isoler la végétation du sol. Pour ce faire, une approche de seuillage dans le canal du 800 nm a été utilisée et est décrite par Dandrifosse et al. (2022a). S'ensuit la seconde phase qui avait pour but de segmenter les épis du reste de la végétation. Cela a été rendu possible grâce à un algorithme d'apprentissage profond combinant le modèle YOLOv5 et DeepMAC (Dandrifosse et al., 2022b).

Les organes ayant été segmentés, le calcul du facteur de réflexion bidirectionnelle (BRF) de chacun d'eux a pu être réalisé. Celui-ci a été obtenu, pour chacun des six canaux, sur base du temps d'exposition de la caméra, d'une courbe de réponse la caractérisant et des valeurs numériques dans l'image. Ces informations ont permis de retrouver le flux lumineux qui était entré dans la caméra. Le rapport de ce flux sur le flux lumineux incident correspondant révèle la valeur du BRF. Le détail de ce calcul est présenté par Dandrifosse et al. (2022a).

4.2. Segmentation des dégâts foliaires

4.2.1. Annotation des images

Pour certains stades auxquels une cotation maladie a été effectuée, toutes saisons confondues, une étape d'annotation a été réalisée sur les images RVB. L'objectif de cette étape était de créer des références pour la segmentation des dégâts foliaires. Le nombre d'images à annoter variait selon les valeurs de cotations attribuées. En effet, pour une date donnée et pour une valeur de cotation donnée, trois images ont été sélectionnées aléatoirement. L'annotation, réalisée via le logiciel QuPath, consistait en la sélection d'un nombre équivalent de pixels, variant entre 50 et 120, pour chacune des classes définies : une dédiée aux dégâts foliaires, une pour les feuilles saines et une dernière dédiée aux tiges. La classe associée aux tiges ne pouvait être créée qu'à partir du stade Z65 étant donné que les tiges étaient très peu visibles à l'image avant ce stade.

Suite à un souci d'alignement, les images prises le 2 juillet 2021 et le 25 avril 2022 n'ont pas été considérées et ne le seront jamais dans la suite de ce travail. De plus, par contrainte de temps, les images prises au-delà du 30 mai 2022 n'ont pas été utilisées pour cette phase d'annotation. Ainsi, 93 images ont servi à la création des références.

4.2.2. Segmentation et validation

Sur base de la littérature scientifique, différents IV ont été sélectionnés et/ou modifiés afin d'être applicables à cette étude (Tableau 6). Pour chaque IV, une certaine valeur, appelée seuil, peut faire office de démarcation entre du matériel végétal sain et des dégâts foliaires.

Tableau 6 : Indices de végétation recensés dans la littérature scientifique.

Indice	Définition	Formule	Application	Référence
PSSRa	rapport simple spécifique au pigment Chl <i>a</i>	$BRF800/BRF680$	Chl <i>a</i>	Blackburn, 1998
TCARI	indice transformé du taux d'absorption de la chlorophylle	$3 \left[(BRF720 - BRF680) - 0,2(BRF720 - BRF550) \times \frac{BRF720}{BRF680} \right]$	Chl, rouille noire	modifié à partir de Haboudane et al., 2002
TCARI/OSAVI	indice transformé du taux d'absorption de la chlorophylle / Indice optimisé de végétation ajusté au sol	$\frac{TCARI}{\left[\frac{(1 + 0,16) \times (BRF800 - BRF680)}{BRF800 + BRF680 + 0,16} \right]}$	Chl	modifié à partir de Haboudane et al., 2002
NDVII	indice de végétation par différence normalisée	$\frac{BRF900 - BRF680}{BRF900 + BRF680}$	Chl, azote	Peñuelas et al., 1997 ; Zhao et al., 2004
NRI	indice de réflectance de l'azote	$\frac{BRF550 - BRF680}{BRF550 + BRF680}$	Azote, rouille jaune, rouille brune	modifié à partir de Bausch et Duke, 1996; Devadas et al., 2009
NPCI	indice normalisé du rapport pigment chlorophylle	$\frac{BRF680 - BRF490}{BRF680 + BRF490}$	Azote, rouille jaune, rapport pigmentaire Car/Chl	modifié à partir de Peñuelas et al., 1994; Devadas et al., 2009
SR17	rapport simple 17	$\frac{BRF800}{BRF550}$	Azote	modifié à partir de Li et al., 2010
MCARI	indice modifié du taux d'absorption de la chlorophylle	$[(BRF800 - BRF720) - 0,2(BRF800 - BRF550)] \times \frac{BRF800}{BRF720}$	Azote	Cao et al., 2013
RESAVI	indice de végétation ajusté au sol dans le bord rouge	$1,5 \left(\frac{BRF800 - BRF720}{BRF800 + BRF720 + 0,5} \right)$	INN	Cao et al., 2013
MRESAVI	RESAVI modifié	$0,5 \left[\frac{2 \times BRF800 + 1}{\sqrt{(2 \times BRF800 + 1)^2 - 8(BRF800 - BRF720)}} \right]$	INN	Cao et al., 2013
REDVI	indice de végétation de la différence dans le bord rouge	$BRF800 - BRF720$	INN	Cao et al., 2013
RERDVI	indice de végétation différent renormalisé dans le red-edge	$\frac{BRF800 - BRF720}{\sqrt{BRF800 + BRF720}}$	INN	Cao et al., 2013
NDVI2	indice de végétation par différence normalisée	$\frac{BRF800 - BRF680}{BRF800 + BRF680}$	Chl	Xue et Su, 2017
SIPI	indice pigmentaire insensible à la structure	$\frac{BRF800 - BRF490}{BRF800 + BRF680}$	Rapport pigmentaire Car/Chl <i>a</i> , maladies	modifié à partir de Huang et al., 2007; Yu et al., 2018
PSRI	indice de réflectance de la sénescence de la plante	$\frac{BRF680 - BRF490}{BRF800}$	Rapport pigmentaire Car/Chl <i>a</i> , sénescence, maladies	modifié à partir de Merzlyak et al., 1999; Devadas et al., 2009; Yu et al., 2018
NDRE	différence normalisée dans le bord rouge	$\frac{BRF800 - BRF720}{BRF800 + BRF720}$	INN	modifié à partir de Aranguren et al., 2020
PRI	indice de réflectance photochimique	$\frac{BRF490 - BRF550}{BRF490 + BRF550}$	Rouille jaune	Gamon et al., 1992 modifié par Zhou et al., 2021

La capacité des IV à isoler ces dégâts foliaires, pour un seuil donné, a été testée en mesurant un score d'exactitude sur les 93 images. Ces scores ont été obtenus selon la formule suivante :

$$Exactitude = \frac{VP + VN}{VP + FP + VN + FN}$$

où *VP*, *FP*, *VN* et *FN* sont respectivement les nombres de vrais positifs, faux positifs, vrais négatifs et faux négatifs issus de la matrice de confusion (Tableau 7). De manière plus précise, chacun de ces nombres exprime un rapport de quantité de pixels identifiés sur une quantité de pixels de référence. Ainsi, un VP est un pixel de feuille saine ou tige identifié comme feuille saine ou tige tandis qu'un FP est un pixel de dégât foliaire identifié comme feuille saine ou tige. Le principe est le même pour les VN et FN. Un VN est un pixel de dégât foliaire identifié comme tel contrairement au FN qui est identifié comme dégât foliaire alors que c'est un pixel de feuille saine ou tige.

Tableau 7 : Matrice de confusion destinée au calcul du score d'exactitude.

	Feuilles saines et tiges identifiées	Dégâts foliaires identifiés
Feuilles saines et tiges de référence	VP	FN
Dégâts foliaires de référence	FP	VN

Pour chaque IV, le seuil obtenant le meilleur score d'exactitude moyen a été trouvé de manière empirique et sélectionné comme seuil unique. Une analyse de la variance suivie d'un test de SNK ont été effectués afin de sélectionner le(s) meilleur(s) IV. Une illustration de l'application d'un IV sur image RVB est présentée à la Figure 9.

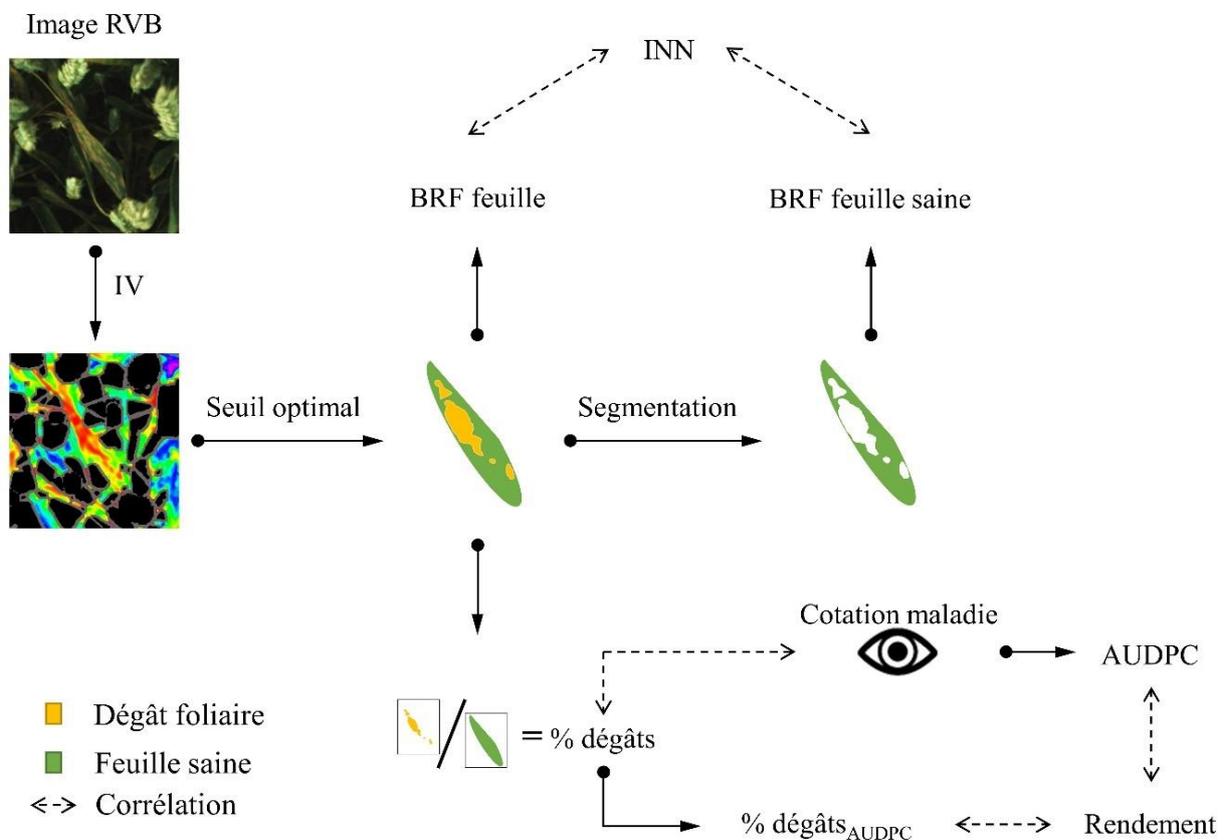


Figure 9 : Synthèse de la quantification des différents stress.

5. Quantification des stress biotiques et abiotiques

5.1. Quantification des dégâts foliaires

Sur base du/des IV avec son/leurs seuil(s) sélectionné(s), une variable exprimant la proportion des dégâts foliaires (% dégâts) a été établie. Celle-ci est définie comme la quantité de pixels identifiés comme dégâts foliaires sur la quantité de pixels identifiés comme feuilles et tiges.

Afin de définir sa potentielle utilité, une première étude de corrélation a été menée afin d'identifier le niveau de corrélation entre les cotations maladies et la variable « % dégâts ». Une seconde a été effectuée pour mesurer la capacité des deux méthodes à prédire le rendement, tant à l'échelle de la micro-parcelle qu'à celle de la modalité (Figure 9). Pour ce faire, la variable « % dégâts » a été intégrée pour obtenir une deuxième forme d'AUDPC :

$$\% \text{dégâts}_{AUDPC} = \sum_{i=1}^n \frac{(\% \text{dégâts}_{date_i} + \% \text{dégâts}_{date_{i+1}}) * \Delta t}{2}$$

avec dt = laps de temps entre $date_i$ et $date_{i+1}$.

Comparativement à la saison 2022, la saison 2021 a été touchée assez tardivement par des maladies fongiques, engendrant peu de données pertinentes. Suite à cela, les études de corrélation n'ont été menées que sur la saison 2022.

5.2. Quantification du stress en azote

Grâce à la segmentation du sol, des épis et des dégâts foliaires, la végétation saine a pu être isolée. Afin de quantifier le stress en azote, plusieurs IV ont été testés. Leur formule se basait sur les BRF moyens de cette végétation saine. Ces IV proviennent du Tableau 6 et sont ceux pour lesquels une application en lien avec ce stress abiotique a été recensée. Leur aptitude à identifier et à chiffrer ce stress azoté a été mesurée en procédant à une étude de corrélation avec les différentes données de l'INN (Figure 9). Le choix de cette variable s'explique par le fait qu'elle intègre à la fois la biomasse produite et le taux d'azote présent dans le matériel végétal (Lemaire et Meynard, 1997).

Une seconde étude de corrélation a été effectuée afin de juger l'utilité de déconvoluer les stress biotique et abiotique pour la quantification du stress azoté. Ainsi, le(s) IV sélectionné(s) a/ont été recalculé(s) sur base, cette fois-ci, des BRF moyens de la végétation saine et de la végétation dégradée.

V. Résultats

1. Essais expérimentaux

1.1. Rendement agronomique 2021

La Figure 10 présente la distribution des rendements obtenus selon les différentes modalités.

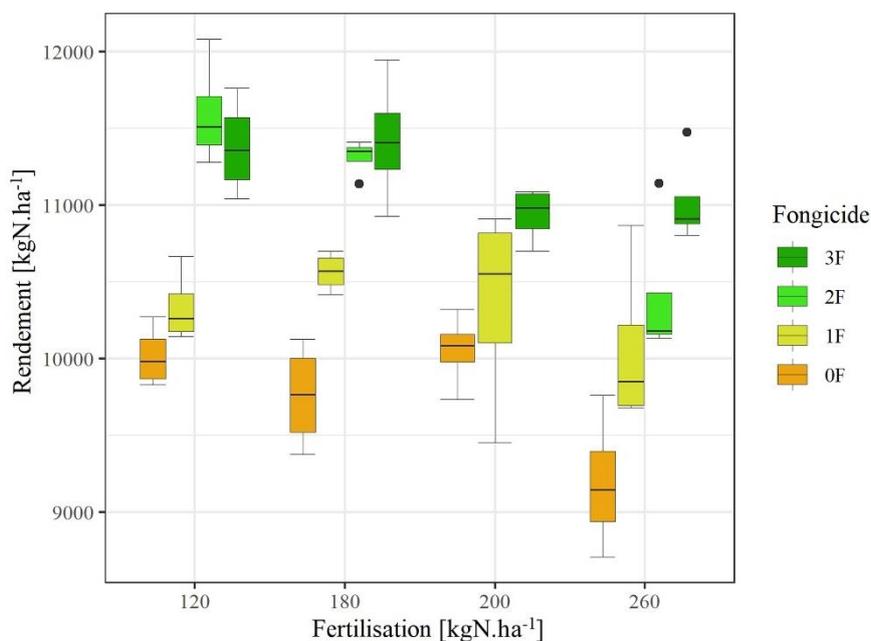


Figure 10 : Boîte à moustaches exprimant les rendements 2021 en fonction des différentes modalités.

La signification statistique des rendements de 2021 a été examinée par une analyse de la variance du second degré (AOV2), présentée en Annexe 5. Suite au manquement de la modalité 200_2F, l'AOV2 a été décomposée en deux AOV2. La première ne prend pas en compte le traitement 200 kgN.ha⁻¹ tandis que la seconde ne prend pas en compte le traitement 2F.

Peu importe l'AOV2, les conclusions sont identiques. Aucune interaction significative n'est observée entre les traitements « Fertilisation » et « Fongicide ». Ils peuvent donc être étudiés séparément. Pour la fertilisation, il y a au moins une inégalité des moyennes. Cependant, cette inégalité n'est que hautement significative pour l'AOV2 sans le traitement 2F, comparé à l'AOV2 sans le traitement 200 kgN.ha⁻¹ pour qui l'inégalité est très hautement significative. Concernant le traitement au fongicide, il y a au moins une inégalité des moyennes très hautement significative pour les deux AOV2.

Le test de SNK présente les rendements moyens obtenus selon les différents traitements et les classe en sous-ensembles (Tableau 8). Chaque lettre représente un sous-ensemble. Les moyennes avec une même lettre sont considérées comme non-significativement différentes. Quelle que soit l'AOV2, ce test regroupe les modalités de manière identique. Les fertilisations à 120, 180 et 200 kgN.ha⁻¹ ont donné des rendements moyens statistiquement équivalents et différents de la fertilisation à 260 kgN.ha⁻¹. Les applications fongiques en deux et trois apports ont donné des rendements moyens statistiquement équivalents et différents des deux autres modalités. De plus, les moyennes de ces dernières sont statistiquement différentes.

Tableau 8 : Test de SNK sur les rendements de 2021.

		Sans 200 kgN.ha-1		Sans 2F	
		Rendement moyen [kg/ha]	Groupe	Rendement moyen [kg/ha]	Groupe
Fertilisation	120	10832.12	a	10577.73	a
	180	10765.78	a	10583.27	a
	200	/	/	10454.99	a
	260	10172.77	b	10094.08	b
Fongicide	3F	11276.84	a	11192.55	a
	2F	11105.81	a	/	/
	1F	10322.25	b	10333.90	b
	0F	9656.00	c	9756.11	c

1.2. Rendement agronomique 2022

Les données de rendement de la saison 2022 n'ayant pu être rendues accessibles avant la fin de ce travail, elles ont été approximées par le poids sec des épis au stade Z89. Ce choix s'explique par l'étude de corrélation présentée au Tableau 9.

Tableau 9 : Etude de corrélation de Pearson entre les rendements de 2021 et les données de biomasse de 2021 au stade Z89.

	BS F1	BS Finf	BS tiges	BS épis	BS totale	BS feuilles
Rendement	0.090	0.320	0.098	0.592**	0.496*	0.262

avec BS = Biomasse sèche, F1 = dernière feuille et Finf = feuilles inférieures à F1.

Les données de biomasse sont les seules données agronomiques disponibles en 2022 au-delà du stade Zadoks 39.

La Figure 11 présente la distribution des poids secs des épis à maturité (Z89) selon les différentes modalités.

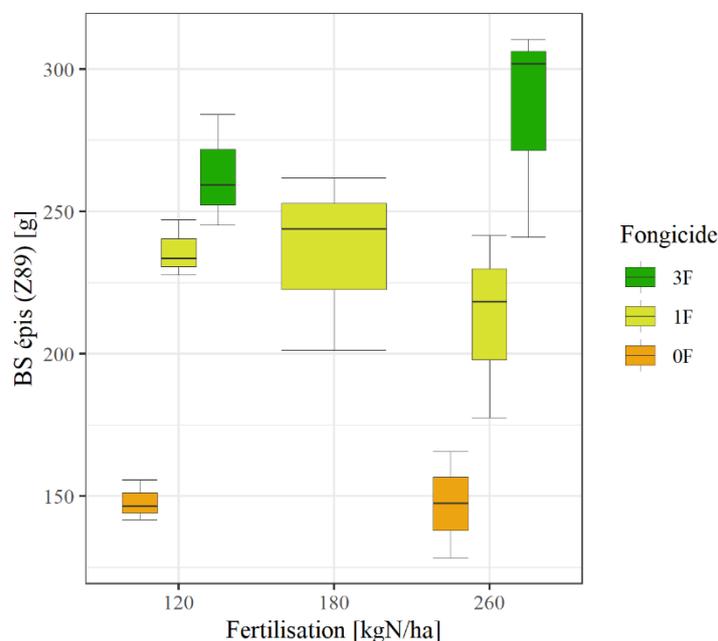


Figure 11 : Boîte à moustaches exprimant le poids sec des épis à maturité en 2022 en fonction des différentes modalités.

La signification statistique des poids secs des épis a été examinée par une analyse de la variance du premier degré (AOV). La p-valeur de cette analyse valant 3.77e-05, il y a au moins une différence significative entre les moyennes.

Le test de SNK, présenté au Tableau 10, montre une différence significative entre la modalité 0F et les deux autres. Aucune différence claire n'est identifiée concernant les différentes modalités de fertilisation.

Tableau 10 : Test de SNK sur les poids secs des épis à maturité en 2022.

	AOV1	
	Poids sec moyen des épis [g]	Groupe
260_3F	284.47	a
120_3F	262.90	ab
120_1F	236.17	ab
180_1F	235.67	ab
260_1F	212.50	b
120_0F	148.07	c
260_0F	147.27	c

1.3. Indice de nutrition azotée

La Figure 12 présente la distribution des INN aux différents stades Zadoks auxquels les données agronomiques ont été récoltées au cours des deux saisons.

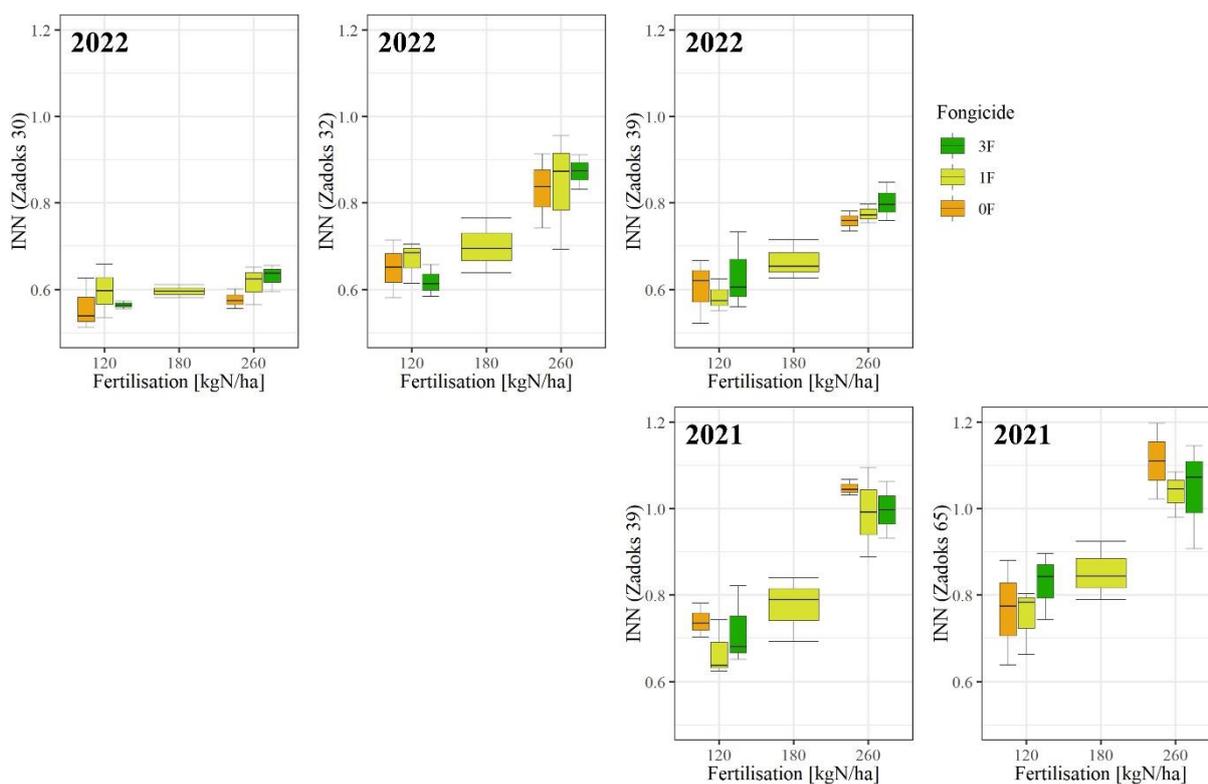


Figure 12: Boîte à moustaches exprimant les INN à différents stades Zadoks, en 2021 et 2022 en fonction des différentes modalités.

Les significations statistiques des INN ont été examinées par une analyse de la variance du premier degré (AOV1) et sont présentées en Annexe 6.

Il en résulte au moins une inégalité des moyennes pour les INN aux stades Z32, Z39 et Z65. Les moyennes sont considérées comme équivalentes pour l'INN au stade Z30. Le test de SNK est donc effectué sur chacun des INN hormis ce dernier.

Le Tableau 11 présente les INN moyens obtenus selon les différents traitements ainsi que leurs classements en sous-ensembles.

Tableau 11 : Test de SNK sur les INN à différents stades Zadoks en 2021 et 2022.

	2022				2021			
	Z32		Z39		Z39		Z65	
	INN moyen	Groupe						
260_3F	0.873	a	0.802	a	0.997	a	1.042	ab
260_1F	0.841	ab	0.776	ab	0.992	a	1.037	ab
260_0F	0.832	ab	0.760	ab	1.048	a	1.151	a
180_1F	0.700	abc	0.666	bc	0.775	b	0.853	bc
120_3F	0.619	c	0.633	c	0.719	b	0.828	bc
120_1F	0.668	bc	0.584	c	0.669	b	0.750	c
120_0F	0.650	c	0.603	c	0.741	b	0.765	c

En 2021, l'INN moyen a augmenté entre le stade Z39 et Z65, peu importe la modalité. À contrario, il a diminué entre le stade Z32 et Z39 en 2022, sauf pour la modalité 120_1F.

Au stade Z39, pour la fertilisation à 260 kgN.ha⁻¹, une différence de presque 20% est observée entre l'INN moyen le plus élevé de 2021 et le plus bas de 2022. Les écarts entre les INN moyens des autres modalités ne sont pas aussi importants mais ceux de 2021 restent plus élevés que ceux de 2022. Toujours au stade Z39, la variabilité des moyennes est plus importante en 2021 qu'en 2022.

Globalement, aucune différence significative n'est observée entre les différents traitements, que ce soit au niveau de la fertilisation où de l'application de fongicides. La seule exception se présente en 2021 au stade Z39 où une différence significative est observée entre les INN moyens obtenus avec la fertilisation à 260 kgN.ha⁻¹ et ceux avec la fertilisation à 120 et 180 kgN.ha⁻¹.

1.4. AUDPC

L'évolution temporelle de l'intensité des dégâts foliaires (AUDPC) est présentée en Figure 13. Les intervalles entre les stades sont exprimés en nombre de jours. Chaque point résume de manière quantitative, la sévérité de la rouille jaune au fil du temps, depuis son apparition au stade Z31.

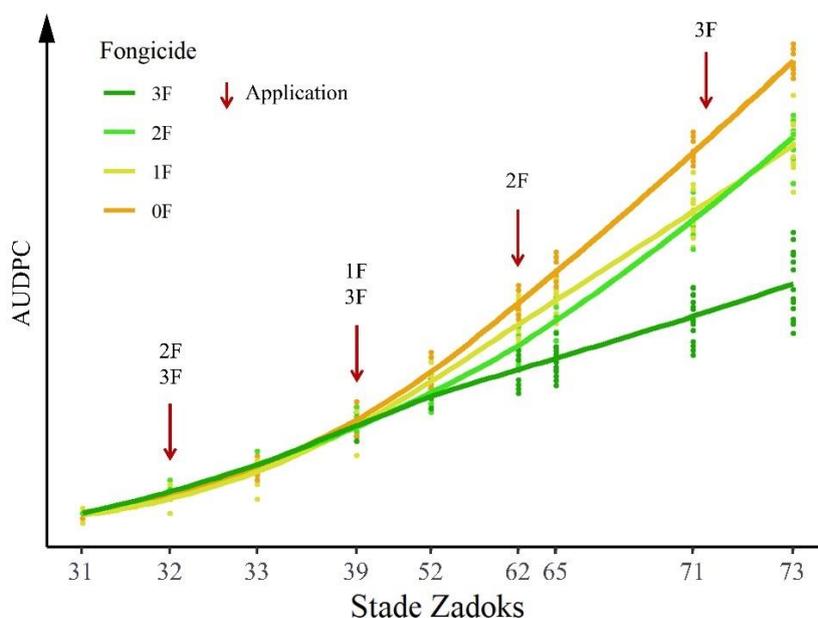


Figure 13 : Graphique exprimant l'évolution de l'AUDPC au cours du temps en 2022 selon les différentes modalités « Fongicide ».

Les significations statistiques des AUDPC aux différents stades Zadoks ont été examinées par une analyse de la variance du second degré (AOV2), présentée en Annexe 7. Suite au manquement de la modalité 200_2F, l'AOV2 a été décomposée en deux AOV2 comme décrite à la section 1.1.

Aucune interaction n'existe entre les deux traitements « Fertilisation » et « Fongicide ». Jusqu'au stade Z39, aucune différence significative n'est observée entre les moyennes. À partir du stade Z52, il y a au moins une inégalité des moyennes au niveau du traitement « Fongicide ». Il n'en est rien pour le traitement « Fertilisation », hormis pour l'AUDPC sans 2F où il y a au moins une inégalité des moyennes à partir du stade Z65.

Le test de SNK a donc été réalisé sur les variables pour lesquelles il y a une différence significative (Tableau 12 et 13).

Tableau 12 : Test de SNK sur les AUDPC à différents stades en 2022, basé sur l'AOV2 sans la modalité 200 kgN.ha⁻¹.

		Sans 200 kgN.ha-1									
		Z52		Z62		Z65		Z71		Z73	
		AUDPC moyenne	Groupe	AUDPC moyenne	Groupe	AUDPC moyenne	Groupe	AUDPC moyenne	Groupe	AUDPC moyenne	Groupe
Fongicide	3F	13.070	bc	15.367	d	16.281	d	20.234	c	23.672	c
	2F	12.632	c	16.813	c	19.396	c	28.868	b	35.701	b
	1F	14.203	ab	19.234	b	21.391	b	29.411	b	35.328	b
	0F	14.694	a	20.863	a	23.863	a	34.863	a	42.863	a

Tableau 13 : Test de SNK sur les AUDPC à différents stades en 2022, basé sur l'AOV2 sans la modalité 2F.

		Sans 2F									
		Z52		Z62		Z65		Z71		Z73	
		AUDPC moyenne	Groupe								
Fertilisation	260					20.500	a	28.292	a	33.958	a
	200					18.981	a	25.994	b	31.294	b
	180	/	/			20.338	a	27.969	a	33.919	a
	120					20.755	a	28.547	a	34.297	a
Fongicide	3F	12.612	b	14.862	c	15.759	c	19.540	c	22.719	c
	1F	14.205	a	19.256	b	21.455	b	29.705	b	35.795	b
	0F	14.582	a	20.740	a	23.740	a	34.740	a	42.740	a

Concernant l'AOV2 sans la modalité 200 kg.ha⁻¹, la différenciation des moyennes et les écarts entre elles se marquent de plus en plus entre le stade Z53 et Z65. À partir du stade Z71, les moyennes des modalités 1F et 2F sont considérées comme statistiquement équivalentes. Au stade 73, la moyenne de l'AUDPC à 2F devient même plus importante que celle à 1F.

Pour l'AOV2 sans la modalité 2F, au niveau du traitement « Fongicide », la différenciation des moyennes et les écarts entre elles se marquent de plus en plus au fil des stades. Au niveau du traitement « Fertilisation », des différences entre moyennes sont observées contrairement à l'autre AOV2. De plus, au stade Z65, les moyennes font toutes partie d'un même sous-ensemble. Cependant, aux deux derniers stades, la moyenne de la modalité 200 kg.ha⁻¹ est considérée comme statistiquement différente des trois autres.

2. Segmentation des dégâts foliaires

La Figure 14 présente, pour chaque IV, les scores d'exactitude moyens des 93 images obtenus par 10 seuils. Un de ces dix seuils se trouve être l'optimum, c'est-à-dire celui pour lequel le score est le plus

élevé. Par soucis de représentation graphique, les valeurs des seuils ont été normalisées par leurs extremums.

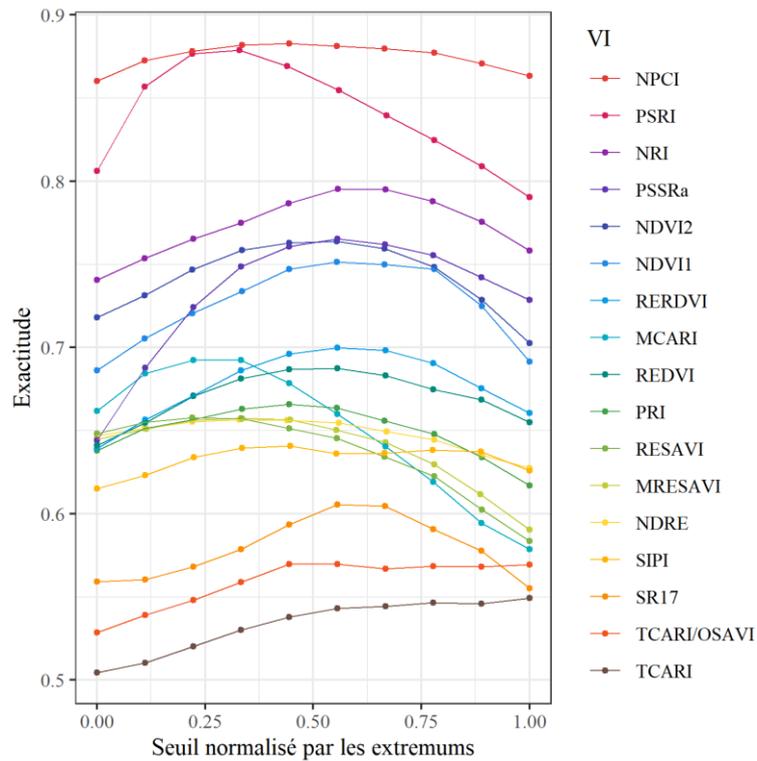


Figure 14 : Graphique exprimant, pour chacun des 17 IV, le score d'exactitude moyen de différents seuils normalisés obtenus dans le cadre de la segmentation des dégâts foliaires.

Les seuils optimaux des 17 IV ont été sélectionnés et leur score d'exactitude moyen avec leur écart-type sont présentés dans le Tableau 14. L'analyse statistique qui consiste en une AOV1 a montré qu'au moins une inégalité des moyennes est présente (p -valeur = $<2e-16$ ***). Cependant, les conditions d'application n'ont pu être vérifiées, même après élimination des valeurs extrêmes. Les populations ne sont pas de distribution normale. Un test de SNK a tout de même été réalisé. Il a permis d'identifier deux IV significativement supérieurs aux autres et considérés comme équivalents entre eux. Ce sont le NPCI avec le seuil optimal défini à 0.139 et le PSRI avec le seuil optimal défini à 0.033. D'autres tests de SNK ont été effectués pour chaque date et sont présentés en Annexe 8.

Tableau 14 : Test de SNK sur les IV avec leur seuil optimal.

IV	Seuil optimal	Score d'exactitude moyen	Groupe
NPCI	0.139	0.883 ± 0.097	a
PSRI	0.033	0.879 ± 0.100	a
NRI	0.067	0.795 ± 0.123	b
PSSRa	5.778	0.765 ± 0.124	bc
NDVI2	0.711	0.764 ± 0.123	bc
NDVI1	0.761	0.752 ± 0.124	c
RERDVI	2.667	0.700 ± 0.104	d
MCARI	33.333	0.692 ± 0.111	d
REDVI	19.444	0.687 ± 0.125	de
PRI	-0.361	0.666 ± 0.131	de
RESAVI	0.494	0.658 ± 0.112	de
MRESAVI	0.500	0.658 ± 0.111	de
NDRE	0.333	0.657 ± 0.112	de
SIPI	0.726	0.641 ± 0.112	e
SR17	3.944	0.606 ± 0.110	f
TCARI/OSAVI	28.889	0.570 ± 0.116	g
TCARI	30.000	0.549 ± 0.096	g

3. Quantification des dégâts foliaires

L'étude de corrélation entre les cotations maladies et la variable « % dégâts » est présentée dans le Tableau 15. Les données de cotation utilisées sont présentées en Annexe 9 et 10.

Tableau 15 : Matrice de corrélation de Pearson entre les cotations maladies et la variable « % dégâts » sur l'année 2022.

	PSRI	NPCI
Cotation maladie	-0.691 ***	-0.541 ***
PSRI		0.871 ***

avec PSRI = "% dégâts" obtenue en utilisant l'IV PSRI et
NPCI = "% dégâts" obtenue en utilisant l'IV NPCI.

Peu importe l'IV utilisé pour la création de la variable « % dégâts », il y a une faible corrélation significative avec les cotations maladies. De plus, le PSRI est un meilleur estimateur des cotations que le NPCI.

Comme énoncé en section 1.2, les données de rendement 2022 ne sont pas disponibles. Elles ont été remplacées par les poids des épis au stade Z89. L'étude de corrélation entre cette variable de remplacement, l'AUDPC et la variable « % dégâts_{AUDPC} » est présentée dans le Tableau 16.

Tableau 16 : Matrice de corrélation de Pearson entre l'AUDPC et la variable « % dégâts_{AUDPC} » sur l'année 2022.

	Échelle de la microparcelle			Échelle de la modalité		
	AUDPC	PSRI _{AUDPC}	NPCI _{AUDPC}	AUDPC	PSRI _{AUDPC}	NPCI _{AUDPC}
Poids épis (Z89)	-0.833 ***	-0.869 ***	-0.880 ***	-0.918 **	-0.956 ***	-0.961 ***
AUDPC		0.815 ***	0.821 ***		0.846 ***	0.856 ***
PSRI _{AUDPC}			0.987 ***			0.998 ***

avec PSRI_{AUDPC} = "% dégâts_{AUDPC}" obtenue en utilisant l'IV PSRI et NPCI_{AUDPC} = "% dégâts_{AUDPC}" obtenue en utilisant l'IV NPCI.

Tant à l'échelle de la microparcelle qu'à celle de la modalité, l'AUDPC est corrélée de manière très hautement significative avec les deux IV. De plus, les valeurs des corrélations sont supérieures avec le NPCI.

En comparant la méthode humaine (AUDPC) à celle par imagerie ($PSRI_{AUDPC}$ et $NPCI_{AUDPC}$) pour prédire le poids sec des épis au stade Z89, les corrélations montrent une meilleure relation avec le NPCI. Quelle que soit l'échelle considérée, il est défini comme meilleur IV pour la segmentation et la quantification des dégâts foliaires. La représentation graphique des poids secs des épis (Z89) en fonction de $NPCI_{AUDPC}$ est présentée à la Figure 15.

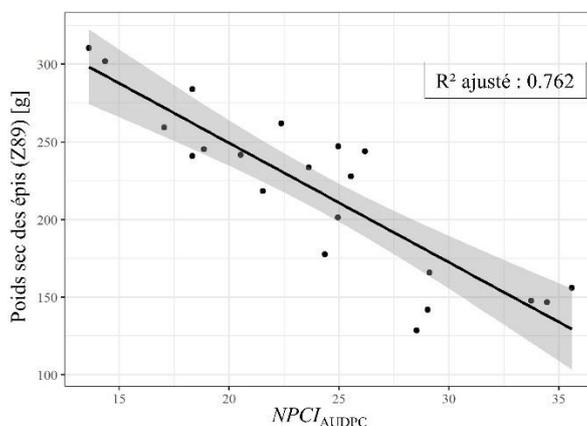


Figure 15 : Graphiques exprimant la corrélation entre $NPCI_{AUDPC}$ et le poids sec des épis (Z89) à l'échelle de la microparcelle..

4. Quantification du stress en azote

Les différents IV testés pour la quantification du stress azoté sont affichés dans le Tableau 17. Les valeurs des BRP qui les ont construits ont été créées sur base des feuilles saines, isolées par NPCI au seuil 0.139. L'étude de corrélation entre ces IV et les différents INN est présentée dans le Tableau 17.

Tableau 17 : Étude de corrélation de Pearson entre les différents INN et les IV sélectionnés.

	2022			2021		Moyenne
	INN (Z30)	INN (Z32)	INN (Z39)	INN (Z39)	INN (Z65)	
RESAVI	0.462 *	0.810 ***	0.684 ***	0.849 ***	0.783 ***	0.718
NDRE	0.464 *	0.811 ***	0.684 ***	0.847 ***	0.781 ***	0.717
MRESAVI	0.467 *	0.801 ***	0.684 ***	0.846 ***	0.780 ***	0.716
MCARI	0.313	0.821 ***	0.707 ***	0.881 ***	0.807 ***	0.706
RERDVI	0.320	0.789 ***	0.723 ***	0.862 ***	0.811 ***	0.701
SR17	0.294	0.820 ***	0.712 ***	0.824 ***	0.717 ***	0.673
REDVI	0.185	0.747 ***	0.730 ***	0.821 ***	0.789 ***	0.654
NDVI1	0.355	0.723 ***	0.404	0.619 **	0.496 *	0.519
PSRI	-0.154	-0.657 **	0.606 **	0.503 *	0.457 *	0.475
NPCI	-0.160	-0.785 ***	0.618 **	0.334	0.306	0.441
NRI	0.270	-0.472 *	-0.679 ***	-0.900 ***	-0.786 ***	0.621

Malgré que les corrélations avec l'INN au stade Z30 soient inexistantes pour la majorité des IV, de nombreuses corrélations très hautement significatives sont présentes aux autres stades. Afin de sélectionner un IV comme meilleur estimateur de l'INN, la moyenne des corrélations en valeur absolue a été calculée. C'est le RESAVI qui obtient la meilleure moyenne. Cependant, le NDRE et le MRESAVI sont très proches de cette moyenne. En faisant abstraction de l'INN au stade Z30, le MCARI et le RERDVI se montrent également intéressants.

Le RESAVI a été utilisé pour la seconde étude de corrélation présentée au Tableau 18.

Tableau 18 : Étude de corrélation de Pearson entre les différents INN et RESAVI basé sur les feuilles saines et les feuilles avec dégâts.

		RESAVI	
		feuilles saines	feuilles avec dégâts
2022	INN (Z30)	0.482 *	0.447 *
	INN (Z32)	0.816 ***	0.813 ***
	INN (Z39)	0.740 ***	0.663 **
2021	INN (Z39)	0.849 ***	0.838 ***
	INN (Z65)	0.783 ***	0.777 ***

Les valeurs de corrélations montrent que le RESAVI est plus intéressant pour estimer l'INN lorsqu'il est basé sur les feuilles exemptes de dégât foliaire. Sa représentation sous forme de graphique est affichée à la Figure 16.

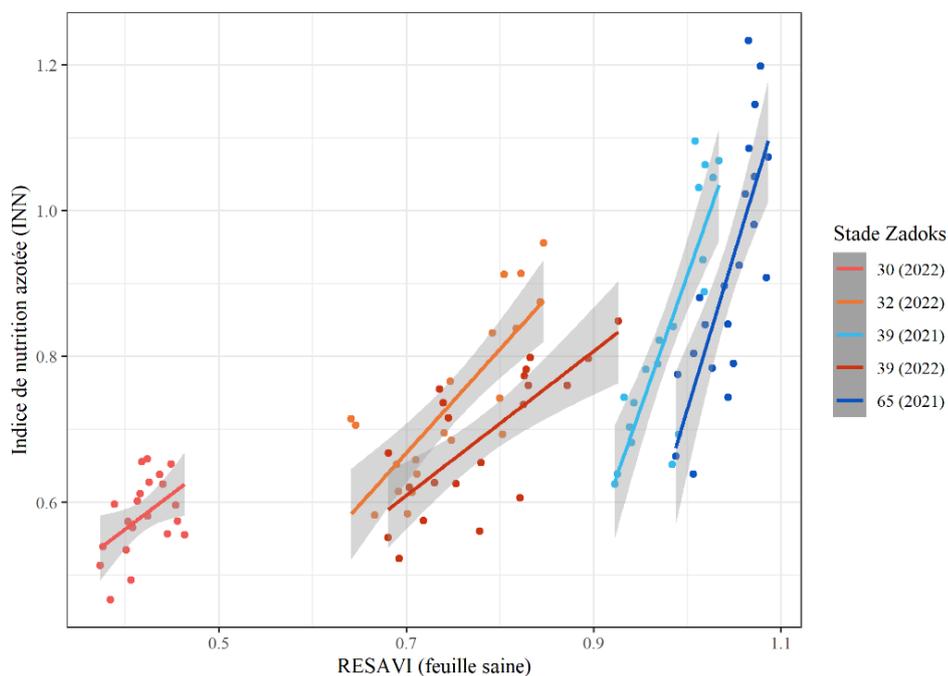


Figure 16 : Graphique exprimant l'INN aux différents stades Zadoks en fonction de RESAVI (feuille saine).

VI. Discussion

1. Rendements agronomiques

Les rendements agronomiques de 2021 ont répondu de manière positive aux applications fongiques. En supposant l'absence d'interaction entre la fertilisation et les applications fongiques pour la saison 2022, la réponse des poids des épis aux apports de fongicides est identique à celle de 2021. Concernant la fertilisation, les résultats sont moins logiques. Ceux de l'année 2022 sont difficilement interprétables en raison de la faible récolte des données agronomiques. Cependant, pour la saison 2021, les rendements semblent répondre négativement aux apports de fertilisants. En effet, les moyennes les plus élevées sont celles pour lesquelles il y a eu peu d'apports azotés. De plus, une sur-fertilisation diminue significativement les rendements selon le Tableau 11. La raison à cela s'explique par le phénomène de verse. En effet, le mois de juillet 2021 a été accompagné par des précipitations importantes, entraînant la verse de nombreux plants de blé (Figure 5) (Nysten et al., 2022). De plus, l'augmentation des apports azotés réduit la résistance des tiges et l'ancrage du système racinaire ce qui accentue le phénomène (Berry et al., 2004). Lorsque les années sont moins sujettes à des précipitations estivales, les rendements répondent plus positivement aux apports de fertilisants (Blanchard et al., 2020 ; Blanchard et al., 2021). Les rendements réels ont donc pu être faussés par la chute des épis au sol.

Les conclusions en lien avec les rendements de 2022 pourraient sembler incertaines en raison de la faible valeur de corrélation obtenue pour le poids des épis au Tableau 9. Cependant, les épis qui ont été récoltés à maturité en 2021 ont été battus après leur pesée. Cela a permis d'obtenir une variable identique au rendement mais dont l'unité de surface est plus petite. L'avantage de cette variable réside dans le fait qu'elle n'a pas été influencée par la verse. Par conséquent, elle pourrait refléter la quantité réelle de grains produits. L'utilisation de la variable « poids sec des épis (Z89) » est donc supposée pertinente pour prédire le rendement réel étant donné sa corrélation élevée avec le poids des grains (Annexe 11).

2. Indice de nutrition azotée

Des valeurs d'INN supérieures à 1 signifient que la biomasse est en excès d'azote. Cette situation est arrivée en 2021. Elle démontre bien que des apports totaux de 260 kgN.ha-1 sont considérés comme excessifs pour la culture du blé d'hiver. À l'inverse, pour cette même quantité d'apports en 2022, la biomasse a été en situation de déficience en azote. Les reliquats azotés peuvent en partie l'expliquer. Du semis jusqu'à l'émission de la dernière feuille, la quantité d'azote présente dans les différents horizons du sol va influencer le développement du blé (Livre Blanc Céréales, 2017a). Malgré que le précédent ait été identique aux deux années, les reliquats azotés de 2021 étaient deux à quatre fois supérieurs à ceux de 2022 selon la profondeur (Annexe 1 et 2). De plus, suite aux faibles précipitations de mars à mi-mai 2022, l'azote apporté sous forme solide n'a pas pu s'incorporer efficacement dans le sol aux stades Zadoks clés (Figure 5) (Agromet, 2022). Cette période de sécheresse a pu traduire les faibles valeurs d'INN de 2022, la diminution observée entre le stade Z32 et Z39 et les différences observées entre les deux années au stade Z39.

3. Cotation maladie et AUDPC

Seule la rouille jaune s'est manifestée au cours de la saison 2022. Son impact s'est fortement marqué à partir de mi-mai, en fin d'élongation de la tige (Z39) (Figure 13 et Annexe 9). La première application fongique semble avoir eu peu d'impact avant ce stade. Cela pourrait être confirmé par l'intensité de la maladie qui est restée équivalente, peu importe le traitement, jusqu'à l'épiaison (Z52). Cependant, l'intensité de la maladie s'est différenciée de plus en plus entre les modalités 1F et 3F à partir de ce stade. Jusqu'au stade Z71, la seule différence entre elles fut l'application d'un fongicide début avril pour les plants sous la modalité en trois apports. Ce fongicide combinait deux produits dont les matières actives ont une action persistante et essentiellement préventive (Annexe 4) (CRAAQ, 2022 ; Phytoweb, 2015). Ainsi, leurs applications avant l'apparition importante de la rouille jaune ont permis une lutte

plus efficace plus tard dans la saison. En s'attardant sur les modalités en un et deux apports, les intensités de la maladie, différentes entre l'épiaison et la pleine floraison, sont devenues équivalentes par la suite. Les produits phytopharmaceutiques utilisés ont une action de persistance limitée dans le temps. L'écart de temps entre les deux apports de la modalité 2F ont été suffisamment long pour permettre à la rouille jaune de se développer. De plus, les précipitations ayant augmenté deux semaines après le premier apport, les conditions étaient plus propices au développement du champignon. Il était donc plus pertinent d'intervenir quelques jours avant cette période, comme ce fut le cas pour le traitement en un apport.

La fertilisation a également eu un impact sur l'intensité de la maladie. Dès le début de la floraison, les valeurs moyennes d'intensité de la maladie ont augmenté avec la réduction des apports azotés, du moins pour les fertilisations à 120, 180 et 200 kgN.ha⁻¹. En addition, les deux premières modalités ont été définies comme statistiquement différentes de la troisième. Pourtant, la modalité apportant la plus grande quantité d'azote au blé, soit 260 kgN.ha⁻¹, a engendré une intensité de la maladie à peine plus faible que celle à 120 kgN.ha⁻¹. Cela pourrait s'expliquer par l'effet contrasté de la fertilisation. Le blé d'hiver nécessite des apports azotés suffisants pour permettre le bon fonctionnement de son métabolisme et le renforcement de ses mécanismes de défense (Simón et al., 2020). À contrario, des quantités trop importantes en azote entraînent une augmentation des composés azotés disponibles pour les agents pathogènes et créent un microclimat propice à leur développement (Devadas et al., 2014). Un apport équilibré tel que 200 kgN.ha⁻¹ pourrait être la balance idéale entre ces deux situations.

Toutefois, la différence avec un apport de 180 kgN.ha⁻¹ est très légère. Il semble étonnant que seule une différence de 20 kgN.ha⁻¹ apporté au tallage influence autant le développement de la maladie. Les p-valeurs des analyses de la variance étant proches du seuil, il n'est pas à proscrire qu'une erreur ait pu survenir lors de l'attribution des cotations maladies.

4. Segmentation

La première phase de la segmentation étant l'annotation des images RVB, les résultats qui ont suivi en étaient fortement dépendants. Des soucis d'alignement occasionnels ont rendu cette étape compliquée (Figure 17). Certains soucis de segmentation du sol ont aussi été observés, en considérant du sol comme de la végétation (Figure 18).

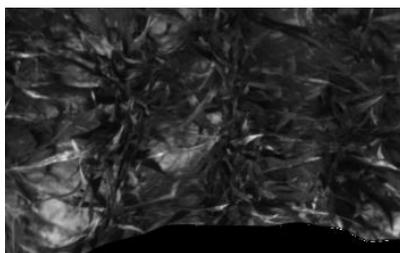


Figure 17 : Erreur d'alignement observée sur une image du canal 680 nm.

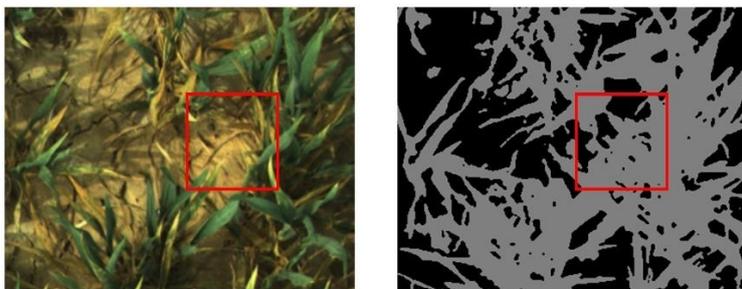


Figure 18 : Erreur de segmentation de la végétation.

Une fois les seuils optimaux définis, les indices de végétation ont montré des scores d'exactitude assez variables. Le NPCI et le PSRI ont été définis comme les plus adaptés, en moyenne, pour la segmentation

des dégâts foliaires. Ce résultat a pu être influencé par la présence majeure de la rouille jaune. En effet, seules trois dates sur les neuf utilisées présentaient d'autres maladies fongiques telles que la rouille brune et la septoriose. Le NPCI et le PSRI utilisent les canaux du 490 nm et du 680 nm. Ceux-ci se rapprochent fortement des canaux à 481 nm et 689 nm qui possèdent une forte corrélation avec la sévérité de la rouille jaune (Zhang et al., 2014). De plus, selon Devadas et al. (2009), le NPCI et le PSRI sont capables de distinguer des plantes saines de celles infectées par la rouille jaune.

Les tests de SNK présentés en Annexe 8 ont montré que, pour chaque date étudiée, le NPCI et le PSRI étaient systématiquement dans le groupe significatif le plus élevé, même en présence d'autres maladies. Lors de la saison 2021, les cotations rouille jaune n'ont pas été plus basses que 7 alors qu'elles ont atteint la valeur de 4 pour la septoriose. Cette dernière provoque des symptômes et un stress hydrique sur les feuilles qui accélèrent leur sénescence (Nicolas, 2005 ; Rivero et al., 2007). Le PSRI ayant été créé pour mesurer le degré de sénescence des plantes, son affinité avec la septoriose semble avoir du sens (Merzlyak et al., 1999). Cette hypothèse peut être soutenue par Yu et al. (2018) qui ont observé que le PSRI était un des IV les mieux corrélés avec les cotations septoriose et les valeurs d'AUDPC correspondantes.

La rouille brune n'a été que trop peu présente pour pouvoir émettre des conclusions. Au vu des études menées sur son identification, le NPCI et le PSRI pourraient se montrer non adaptés. En effet, ces IV ont été définis comme incapables à distinguer une feuille saine d'une feuille présentant les symptômes de la rouille brune (Devadas et al., 2009 ; Ashourloo et al., 2014).

5. Quantification

5.1. Dégâts foliaires

Les proportions de dégâts sur feuille obtenues par imagerie sont significativement corrélées à la méthode de cotation maladie. Pour autant, les valeurs des corrélations montrent que la relation entre elles n'est pas évidente (Tableau 15). La méthode développée par imagerie considère l'intensité de la maladie et sa répartition sur une zone donnée. La méthode de cotation maladie prend en compte ces deux aspects mais en considère un troisième qui est l'étage foliaire affecté. En présence de symptômes sur la dernière feuille, l'attribution d'une cotation peut être sévère malgré que les feuilles inférieures soient saines. En termes de proportions de dégâts, cette situation pourrait être considérée comme équivalente à des dégâts présents sur les feuilles inférieures. De plus, l'objectif premier de la méthode de cotation en champ est de mesurer la capacité d'une plante à résister à une maladie, et non à mesurer une quantité de dégâts présente. Il convient donc de considérer les deux méthodes comme différentes.

Afin de comparer ces deux approches dans une optique d'estimation du rendement, les cotations ont été transformées en une AUDPC. Cela a permis d'intégrer la notion de temps et donc, d'obtenir une mesure d'intensité de la maladie au fil du temps. Cette même transformation a été effectuée pour la méthode par imagerie ce qui a permis de renforcer leurs corrélations. Leurs capacités à estimer le rendement a été mesurée et il en ressort de plus fortes valeurs de corrélation avec l'imagerie, que ce soit avec le NPCI ou le PSRI. Ces deux IV ont obtenus des résultats quasi identiques et le choix de travailler avec le NPCI s'explique naturellement par sa plus haute valeur de corrélation obtenue, que ce soit à l'échelle de la microparcelle ou de la modalité. Cela étant, l'utilisation des caméras multispectrales est donc plus intéressante pour obtenir une estimation de la production en grain du blé d'hiver.

5.2. Stress azoté

Une multitude d'IV ont été testés pour leur capacité à mesurer le stress en azote des plants de blé. Le RESAVI, le NDRE et le MRESAVI se sont avérés être les plus intéressants pour cette tâche (Tableau 17). Le point commun entre ces trois indices est qu'ils utilisent les longueurs d'ondes dans le red-edge (720 nm) et le proche infra-rouge (800 nm). Le proche infra-rouge est considéré comme sensible au contenu en chlorophylle (Zhao et al., 2004). De par le contenu élevé en azote dans les chloroplastes, une

relation importante existe entre les concentrations en azote et en chlorophylle dans les feuilles (Lamb et al., 2002 ; Chunjiang et al., 2007). Cela explique la corrélation existante entre le taux d'azote présent dans les feuilles et la réflectance dans le proche infra-rouge (Shaver et al., 2010). De nombreux IV basés sur les bandes dans le rouge se sont montrés moins efficaces lorsqu'il y avait une forte production de biomasse. L'utilisation de canaux dans le red-edge combinés au proche infra-rouge se sont montrés plus efficaces dans nos régions (Heege et al., 2008).

Le MCARI et le RERDVI utilisent également ces canaux mais leurs corrélations se sont montrées plus faibles en moyenne. Cela est dû aux faibles corrélations au stade Z30. La biomasse ne recouvrant pas complètement le sol, il peut être difficile d'obtenir une estimation correcte du taux d'azote dans les feuilles (Erdle et al., 2011). De plus, la présence de nombreuses feuilles basales entrant en sénescence peuvent venir fausser ces estimations.

L'intérêt d'estimer le stress azoté en isolant les dégâts foliaires a été prouvé par l'étude de corrélation affichée au Tableau 18. Elle montre que peu importe le stade auquel les données ont été acquises, les dégâts foliaires faussent légèrement les prédictions du statut azoté des plantes. Il y a même un niveau de signification différente au stade Z39 lors de la saison 2022. La représentation graphique en Figure 16 montre que pour la méthode d'estimation de l'INN par imagerie, les relations sont différentes à chaque stade. Aucune tendance générale ne se démarque hormis celle d'observer une pente quasi équivalente pour une année donnée.

VII. Conclusions

Au cours de ce travail, une multitude de relations ont été établies entre des variables d'intérêts et la fertilisation et les traitements fongiques. Les rendements du blé d'hiver ont augmenté avec le nombre d'apports fongiques en 2021 et 2022 et ont diminué avec la fertilisation en 2021. Le phénomène de verse a influencé les relations avec la fertilisation ce qui empêche l'approbation de ces conclusions. Dans une optique d'agriculture raisonnée, les protections des cultures en une ou deux interventions semblent être les plus pertinentes. Une tendance à l'augmentation du statut de nutrition azotée a été observée avec les apports de fertilisants. En termes de développement des maladies, l'optimisation de l'efficacité des traitements fongiques doit passer par une réflexion en fonction des conditions météorologiques.

La dissociation entre les stress liés aux maladies fongiques et à la nutrition azotée a été rendue possible via la segmentation des dégâts foliaires. Les caméras multispectrales se sont avérées efficaces à cette fin. L'indice de végétation NPCI défini avec un seuil de 0.139 a permis d'isoler les dégâts avec un score d'exactitude de 0.883. Cet indice a montré une meilleure affinité dans la détermination du rendement comparé à la méthode traditionnelle de cotation maladie. D'autres IV que sont le RESAVI, le NDRE et le MRESAVI ont obtenus des corrélations élevées avec l'INN, avec des valeurs respectives de 0.718, 0.717 et 0.716.

Globalement, les caméras multispectrales ont montré leur capacité dans la discrimination de stress biotiques et abiotiques. Ces caméras ont l'avantage de pouvoir quantifier ces stress avec un risque de confusion bien plus faible qu'avec des capteurs non-imageurs. Les résultats obtenus sont encourageants et n'ont nécessité que peu de ressources.

VIII. Améliorations et perspectives

Le protocole expérimental a été défini dans le but d'étudier quatre traitements fongiques combinés à quatre modalités de fertilisation, soit 16 modalités différentes. L'absence d'une modalité (200_2F) entraîne une complexité dans l'étude statistique. Celle-ci pourrait être grandement simplifiée en la rajoutant. Il n'y aurait plus besoin de décomposer une analyse de la variance en plusieurs. La récolte des données pourraient également être revue. Celle-ci se base sur des prélèvements de biomasse, des mesures de rendement et des captures d'images. Les images sont prises sur les microparcelles sur lesquelles il y a destruction du matériel végétal au cours de la saison. La surface destinée aux prises d'images devient donc de plus en plus restreinte. Il serait judicieux de réaliser ces captures sur les parcelles exemptes de dégradation telles que celles destinées aux mesures du rendement. Les zones capturées seraient alors plus aléatoires.

Toujours au niveau de l'imagerie, la plateforme de phénotypage utilisée montre une bonne aptitude à circuler en champ. Sa structure pourrait toutefois être renforcée afin d'éviter tout tremblement lors du déclenchement des caméras. Un effet de résonance faisait osciller la plateforme. Cela pourrait être une des raisons pour lesquelles des soucis d'alignements ont été observés sur plusieurs dates.

Les conditions météorologiques sont le principal problème pour la récolte des données par caméras. Les conditions d'ensoleillement varient drastiquement dans des conditions nuageuses partielles. Des phénomènes de saturation et de faible éclairage sont apparus dans les images rendant certaines données non-exploitable. Une piste d'amélioration serait l'imagerie à plage dynamique élevée qui a été définie comme efficace pour résoudre ce problème (Lan et al., 2017). Celle-ci consiste en l'utilisation d'un algorithme qui crée une image basée sur plusieurs images identiques mais dont les niveaux d'exposition à la lumière sont différents.

L'impact de la maladie sur les cultures a été mesuré avec la méthode de cotation traditionnelle (Tableau 5). Cette échelle de cotation a été étudiée pour sa capacité à estimer le rendement. Son objectif originel étant la mesure de la résistance d'une variété à une maladie, elle est par définition non adaptée à cette étude. Une autre méthode pourrait s'avérer plus pertinente. C'est le cas de l'échelle modifiée de Cobb qui est destinée à mesurer la proportion de la surface infectée par la maladie (Peterson et al., 1948). Cette méthode permet d'obtenir le même type de donnée que la variable « % dégâts » créée à partir des images multispectrales. À contrario, la méthode développée par imagerie pourrait être améliorée pour s'adapter à l'échelle de cotation utilisée dans ce travail. Comme énoncé à la section 5.1 du chapitre VI, l'étage foliaire n'est pas pris en compte dans l'estimation de la proportion des dégâts foliaires. Développer des cartes de hauteurs précises permettrait d'intégrer cet aspect manquant et de définir des coefficients de gravité selon l'étage foliaire où se trouvent les symptômes. L'intérêt de raisonner dans ce sens est d'être capable d'estimer par imagerie à la fois le rendement et la résistance des plantes face aux maladies.

Ce travail énonce les termes de stress biotiques et abiotiques pour parler des stress liés à la nutrition azotée et aux maladies fongiques. Ces derniers n'englobent pourtant pas tous les stress existants. Des stress hydriques ou d'autres agents pathogènes tels que les ravageurs peuvent engendrer des dégâts non-négligeables aux cultures et similaires à ceux étudiés dans ce document. Leurs études pourraient être entamées afin de développer des méthodes adaptées aux nombreuses situations de terrain.

Bibliographie

- Adams M.L., Philpot W.D. & Norvell W.A., 1999. Yellowness index: An application of spectral second derivatives to estimate chlorosis of leaves in stressed vegetation. *International Journal of Remote Sensing* **20**(18), 3663–3675, DOI:[10.1080/014311699211264](https://doi.org/10.1080/014311699211264).
- Ali M.M., Bachik N.A., Muhadi N., 'Atirah, Tuan Yusof T.N. & Gomes C., 2019. Non-destructive techniques of detecting plant diseases: A review. *Physiological and Molecular Plant Pathology* **108**, 101426, DOI:[10.1016/j.pmpp.2019.101426](https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2019.101426).
- Anamaria R. & Tudor-Mihai U., 2016. Multispectral satellite imagery and airborne laser scanning techniques for the detection of archaeological vegetation marks. In: Opreanu, C.H., Lăzărescu, V.-A. eds. *Landscape Archaeology on the Northern Frontier of the Roman Empire at Porolissum: An Interdisciplinary Research Project*, Corpus Limitis Imperii Romani, Dacia Porolissensis (I): Porolissum. Porolissum Monographs. Mega Publishing House, Cluj-Napoca, 141–150.
- Aranguren M., Castellón A. & Aizpurua A., 2020. Crop Sensor Based Non-destructive Estimation of Nitrogen Nutritional Status, Yield, and Grain Protein Content in Wheat. *Agriculture* **10**(5), 148, DOI:[10.3390/agriculture10050148](https://doi.org/10.3390/agriculture10050148).
- Arvalis, 2012. Les Fiches Accidents. *Arvalis*. <http://www.fiches.arvalis-infos.fr/>, (04/04/2022).
- Ashourloo D., Mobasheri M. & Huete A., 2014. Developing Two Spectral Disease Indices for Detection of Wheat Leaf Rust (*Puccinia triticina*). *Remote Sensing* **6**(6), 4723–4740, DOI:[10.3390/rs6064723](https://doi.org/10.3390/rs6064723).
- Bannon F.J. & Cooke B.M., 1998. Studies on dispersal of *Septoria tritici* pycnidiospores in wheat/clover intercrops. *Plant Pathology* **47**(1), 49–56, DOI:[10.1046/j.1365-3059.1998.00200.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-3059.1998.00200.x).
- Bataille C., Duvivier M., Eylenbosch D., Heens B., Mahieu O., Meza Morales W. & Monfort B., 2015. 6. Lutte intégrée contre les maladies. In: *Livre Blanc « Céréales » - Février 2015*. Gembloux Agro-Bio Tech, Gembloux, 6/1-6/52.
- Bataille C., Duvivier M., Heens B., Mahieu O., Meza Morales W. & Monfort B., 2018. 5. Lutte intégrée contre les maladies. In: Bodson, B., De Proft, M., Watillon, B. eds. *Livre Blanc « Céréales » - Février 2018*. Gembloux Agro-Bio Tech, Gembloux, 86.
- Bausch W.C. & Duke H.R., 1996. Remote Sensing of Plant Nitrogen Status in Corn. *Transactions of the ASAE* **39**(5), 1869–1875, DOI:[10.13031/2013.27665](https://doi.org/10.13031/2013.27665).
- Berry P.M., Sterling M., Spink J.H., Baker C.J., Sylvester-Bradley R., Mooney S.J., Tams A.R. & Ennos A.R., 2004. Understanding and Reducing Lodging in Cereals. In: *Advances in Agronomy*. Elsevier, 217–271.
- Blackburn G.A., 1998. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: A test using senescent tree leaves. *International Journal of Remote Sensing* **19**(4), 657–675, DOI:[10.1080/014311698215919](https://doi.org/10.1080/014311698215919).
- Blackburn G.A., 2006. Hyperspectral remote sensing of plant pigments. *Journal of Experimental Botany* **58**(4), 855–867, DOI:[10.1093/jxb/erl123](https://doi.org/10.1093/jxb/erl123).
- Blanchard R., Meurs R., Vandenberghe C., Pierreux J., Mahieu O., Blondiau L.-M., Collin C., Reuter V., Sinnaeve G., Renneson M., Abras M., Herman J.L., Escarnot E., Crémer S., De Toffoli M., Lambert R., Bodson B. & Dumont B., n.d. La fertilisation azotée. In: *Livre Blanc « Céréales » – Février 2021*.
- Blanchard R., Meurs R., Vandenberghe C., Pierreux J., Mahieu O., Collin C., Reuter V., Sinnaeve G., Herman J.L., Renneson M., Blondiau L.-M., Vilret A., Crémer S., De Toffoli M., Bodson B. & Dumont B., n.d. La fertilisation azotée. In: *Livre Blanc « Céréales » – Février 2020*. Gembloux.
- Bolton M.D., Kolmer J.A. & Garvin D.F., 2008. Wheat leaf rust caused by *Puccinia triticina*. *Molecular Plant Pathology* **9**(5), 563–575, DOI:[10.1111/j.1364-3703.2008.00487.x](https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2008.00487.x).
- Canadell J.G., Monteiro P.M.S., Costa M.H., L. Cotrim da Cunha, Cox P.M. & et al., 2021. Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. In: *IPCC AR6 WGI*. 673–816.
- Cao Q., Miao Y., Wang H., Huang S., Cheng S., Khosla R. & Jiang R., 2013. Non-destructive estimation of rice plant nitrogen status with Crop Circle multispectral active canopy sensor. *Field Crops Research* **154**, 133–144, DOI:[10.1016/j.fcr.2013.08.005](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.08.005).
- Cavender-Bares J., Gamon J.A. & Townsend P.A. (Eds.), 2020. *Remote Sensing of Plant Biodiversity*, Springer International Publishing, Cham.

- Chen W., Wellings C., Chen X., Kang Z. & Liu T., 2014. Wheat stripe (yellow) rust caused by *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*: *Puccinia striiformis*, yellow rust. *Molecular Plant Pathology* **15**(5), 433–446, DOI:[10.1111/mpp.12116](https://doi.org/10.1111/mpp.12116).
- Chen X.M., 2005. Epidemiology and control of stripe rust [*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*] on wheat. *Canadian Journal of Plant Pathology* **27**(3), 314–337, DOI:[10.1080/07060660509507230](https://doi.org/10.1080/07060660509507230).
- Chunjiang Z., Aning J., Wenjiang H., Keli L., Liangyun L. & Jihua W., 2007. Evaluation of variable-rate nitrogen recommendation of winter wheat based on SPAD chlorophyll meter measurement. *New Zealand Journal of Agricultural Research* **50**(5), 735–741, DOI:[10.1080/00288230709510345](https://doi.org/10.1080/00288230709510345).
- Coram T.E., Wang M. & Chen X., 2008. Transcriptome analysis of the wheat–*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* interaction. *Mol Plant Pathol* **9**(2), 157–169, DOI:[10.1111/j.1364-3703.2007.00453.x](https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2007.00453.x).
- CRAAQ, 2022. Matières actives. *sagepesticides*. <https://www.sagepesticides.qc.ca/Recherche/RechercheMatiere>, (05/08/2022).
- CRAW, 2022. Données Pameseb. *Agromet*. <https://agromet.be/fr/control/tower/export/pameseb/data/>, (23/05/2022).
- Cunfer B.M., 1997. Taxonomy and Nomenclature of Septoria and Stagonospora Species on Small Grain Cereals. *Plant Disease* **81**(5), 427–428, DOI:[10.1094/PDIS.1997.81.5.427](https://doi.org/10.1094/PDIS.1997.81.5.427).
- Damm A., Paul-Limoges E., Haghighi E., Simmer C., Morsdorf F., Schneider F.D., van der Tol C., Migliavacca M. & Rascher U., 2018. Remote sensing of plant-water relations: An overview and future perspectives. *Journal of Plant Physiology* **227**, 3–19, DOI:[10.1016/j.jplph.2018.04.012](https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.04.012).
- Dandrifosse S., Bouvry A., Leemans V., Dumont B. & Mercatoris B., 2020. Imaging Wheat Canopy Through Stereo Vision: Overcoming the Challenges of the Laboratory to Field Transition for Morphological Features Extraction. *Front. Plant Sci.* **11**, 96, DOI:[10.3389/fpls.2020.00096](https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00096).
- Dandrifosse S., Carlier A., Dumont B. & Mercatoris B., 2021. Registration and Fusion of Close-Range Multimodal Wheat Images in Field Conditions. *Remote Sensing* **13**(7), 1380, DOI:[10.3390/rs13071380](https://doi.org/10.3390/rs13071380).
- Dandrifosse S., Carlier A., Dumont B. & Mercatoris B., 2022. In-Field Wheat Reflectance: How to Reach the Organ Scale? *Sensors* **22**(9), 3342, DOI:[10.3390/s22093342](https://doi.org/10.3390/s22093342).
- Dandrifosse S., Ennadifi E., Carlier A., Gosselin B., Dumont B. & Mercatoris B., 2022. Deep learning for wheat ear segmentation and ear density measurement: From heading to maturity. *Computers and Electronics in Agriculture* **199**, 107161, DOI:[10.1016/j.compag.2022.107161](https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107161).
- Delcour A., Van Stappen F., Gheysens S., Decruyenaere V., Stilmant D., Burny P., Rabier F., Louppe H. & Goffart J.P., 2014. État des lieux des flux céréaliers en Wallonie selon différentes filières d'utilisation. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement; Gembloux* **18**(2), 181–192.
- Devadas R., Lamb D.W., Simpfendorfer S. & Backhouse D., 2009. Evaluating ten spectral vegetation indices for identifying rust infection in individual wheat leaves. *Precision Agric* **10**(6), 459–470, DOI:[10.1007/s11119-008-9100-2](https://doi.org/10.1007/s11119-008-9100-2).
- Devadas R., Simpfendorfer S., Backhouse D. & Lamb D.W., 2014. Effect of stripe rust on the yield response of wheat to nitrogen. *The Crop Journal* **2**(4), 201–206, DOI:[10.1016/j.cj.2014.05.002](https://doi.org/10.1016/j.cj.2014.05.002).
- Duvivier M., Dedeurwaerder G., Bataille C., De Proft M. & Legrève A., 2016. Real-time PCR quantification and spatio-temporal distribution of airborne inoculum of *Puccinia triticina* in Belgium. *Eur J Plant Pathol* **145**(2), 405–420, DOI:[10.1007/s10658-015-0854-x](https://doi.org/10.1007/s10658-015-0854-x).
- Erdle K., Mistele B. & Schmidhalter U., 2011. Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. *Field Crops Research* **124**(1), 74–84, DOI:[10.1016/j.fcr.2011.06.007](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.06.007).
- European Commission, 2019. The European Green Deal. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions.
- Eyal Z. & International Maize and Wheat Improvement Center (Eds.), 1987. *The Septoria diseases of wheat: concepts and methods of disease management*, CIMMYT, Mexico, D.F, 46.
- Fernandez S., Vidal D., Simon E. & SOLI3-SUGRANES L., 1994. Radiometric characteristics of *Triticum aestivum* cv, Astral under water and nitrogen stress. *International Journal of Remote Sensing* **15**(9), 1867–1884, DOI:[10.1080/01431169408954213](https://doi.org/10.1080/01431169408954213).

- Fones H. & Gurr S., 2015. The impact of *Septoria tritici* Blotch disease on wheat: An EU perspective. *Fungal Genetics and Biology* **79**, 3–7, DOI:[10.1016/j.fgb.2015.04.004](https://doi.org/10.1016/j.fgb.2015.04.004).
- Franke J. & Menz G., 2007. Multi-temporal wheat disease detection by multi-spectral remote sensing. *Precision Agric* **8**(3), 161–172, DOI:[10.1007/s11119-007-9036-y](https://doi.org/10.1007/s11119-007-9036-y).
- Galieni A., D’Ascenzo N., Stagnari F., Pagnani G., Xie Q. & Pisante M., 2021. Past and Future of Plant Stress Detection: An Overview From Remote Sensing to Positron Emission Tomography. *Front. Plant Sci.* **11**, 609155, DOI:[10.3389/fpls.2020.609155](https://doi.org/10.3389/fpls.2020.609155).
- Gamon J.A., Peñuelas J. & Field C.B., 1992. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment* **41**(1), 35–44, DOI:[10.1016/0034-4257\(92\)90059-S](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90059-S).
- Gate P., 1995. *Ecophysiologie du blé*, Technique et documentation-Lavoisier ITCF, Paris.
- Gitelson A.A., Gritz † Y. & Merzlyak M.N., 2003. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology* **160**(3), 271–282, DOI:[10.1078/0176-1617-00887](https://doi.org/10.1078/0176-1617-00887).
- Gold K.M., Townsend P.A., Chlus A., Herrmann I., Couture J.J., Larson E.R. & Gevens A.J., 2020. Hyperspectral Measurements Enable Pre-Symptomatic Detection and Differentiation of Contrasting Physiological Effects of Late Blight and Early Blight in Potato. *Remote Sensing* **12**(2), 286, DOI:[10.3390/rs12020286](https://doi.org/10.3390/rs12020286).
- Gómez-Candón D., Virlet N., Labbé S., Jolivot A. & Regnard J.-L., 2016. Field phenotyping of water stress at tree scale by UAV-sensed imagery: new insights for thermal acquisition and calibration. *Precision Agric* **17**(6), 786–800, DOI:[10.1007/s11119-016-9449-6](https://doi.org/10.1007/s11119-016-9449-6).
- Haboudane D., Miller J.R., Tremblay N., Zarco-Tejada P.J. & Dextraze L., 2002. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment* **81**(2–3), 416–426, DOI:[10.1016/S0034-4257\(02\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00018-4).
- Hansen P.M. & Schjoerring J.K., 2003. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sensing of Environment* **86**(4), 542–553, DOI:[10.1016/S0034-4257\(03\)00131-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00131-7).
- Hawkesford M.J., 2014. Reducing the reliance on nitrogen fertilizer for wheat production. *Journal of Cereal Science* **59**(3), 276–283, DOI:[10.1016/j.jcs.2013.12.001](https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.12.001).
- Hawkesford M.J., Araus J., Park R., Calderini D., Miralles D., Shen T., Zhang J. & Parry M.A.J., 2013. Prospects of doubling global wheat yields. *Food Energy Secur* **2**(1), 34–48, DOI:[10.1002/fes3.15](https://doi.org/10.1002/fes3.15).
- He R., Li H., Qiao X. & Jiang J., 2018. Using wavelet analysis of hyperspectral remote-sensing data to estimate canopy chlorophyll content of winter wheat under stripe rust stress. *International Journal of Remote Sensing* **39**(12), 4059–4076, DOI:[10.1080/01431161.2018.1454620](https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1454620).
- Heege H.J., Reusch S. & Thiessen E., 2008. Prospects and results for optical systems for site-specific on-the-go control of nitrogen-top-dressing in Germany. *Precision Agric* **9**(3), 115–131, DOI:[10.1007/s11119-008-9055-3](https://doi.org/10.1007/s11119-008-9055-3).
- Heisey P.W. & Norton G.W., 2007. Chapter 53 Fertilizers and other farm chemicals. In: *Handbook of Agricultural Economics*. Elsevier, 2741–2777.
- Huang W., Lamb D.W., Niu Z., Zhang Y., Liu L. & Wang J., 2007. Identification of yellow rust in wheat using in-situ spectral reflectance measurements and airborne hyperspectral imaging. *Precision Agric* **8**(4–5), 187–197, DOI:[10.1007/s11119-007-9038-9](https://doi.org/10.1007/s11119-007-9038-9).
- IRM, 2022. Climat de la Belgique : Climat de votre commune. IRM. <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/climat-dans-votre-commune>, (23/05/2022).
- Jeger M.J. & Viljanen-Rollinson S.L.H., 2001. The use of the area under the disease-progress curve (AUDPC) to assess quantitative disease resistance in crop cultivars: *Theor Appl Genet* **102**(1), 32–40, DOI:[10.1007/s001220051615](https://doi.org/10.1007/s001220051615).
- Keon J., Antoniw J., Carzaniga R., Deller S., Ward J.L., Baker J.M., Beale M.H., Hammond-Kosack K. & Rudd J.J., 2007. Transcriptional Adaptation of *Mycosphaerella graminicola* to Programmed Cell Death (PCD) of Its Susceptible Wheat Host. *MPMI* **20**(2), 178–193, DOI:[10.1094/MPMI-20-2-0178](https://doi.org/10.1094/MPMI-20-2-0178).
- Khanal S., Kc K., Fulton J.P., Shearer S. & Ozkan E., 2020. Remote Sensing in Agriculture—Accomplishments, Limitations, and Opportunities. *Remote Sensing* **12**(22), 3783, DOI:[10.3390/rs12223783](https://doi.org/10.3390/rs12223783).

- Kitić G., Tagarakis A., Cselyuszka N., Panić M., Birgermajer S., Sakulski D. & Matović J., 2019. A new low-cost portable multispectral optical device for precise plant status assessment. *Computers and Electronics in Agriculture* **162**, 300–308, DOI:[10.1016/j.compag.2019.04.021](https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.021).
- Lan T., Xue X., Li J., Han C. & Long K., 2017. A High-Dynamic-Range Optical Remote Sensing Imaging Method for Digital TDI CMOS. *Applied Sciences* **7**(10), 1089, DOI:[10.3390/app7101089](https://doi.org/10.3390/app7101089).
- Lemaire G. & Meynard J.M., 1997. Use of the Nitrogen Nutrition Index for the Analysis of Agronomical Data. In: *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 45–55.
- Lemaire G., van Oosterom E., Jeuffroy M.-H., Gastal F. & Massignam A., 2008. Crop species present different qualitative types of response to N deficiency during their vegetative growth. *Field Crops Research* **105**(3), 253–265, DOI:[10.1016/j.fcr.2007.10.009](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.10.009).
- Li F., Miao Y., Hennig S.D., Gnyp M.L., Chen X., Jia L. & Bareth G., 2010. Evaluating hyperspectral vegetation indices for estimating nitrogen concentration of winter wheat at different growth stages. *Precision Agric* **11**(4), 335–357, DOI:[10.1007/s11119-010-9165-6](https://doi.org/10.1007/s11119-010-9165-6).
- Livre Blanc Céréales, 2017a. Fumures du froment. *Livre Blanc Céréales*. <https://www.livre-blanc-cereales.be/thematiques/fumures/froment/>, (07/03/2022).
- Livre Blanc Céréales, 2017b. Rouille brune. *Livre Blanc Céréales*. <https://www.livre-blanc-cereales.be/thematiques/maladies/froment/rouille-brune/>, (17/02/2022).
- Livre Blanc Céréales, 2017c. Rouille jaune. *Livre Blanc Céréales*. <https://www.livre-blanc-cereales.be/thematiques/maladies/froment/rouille-jaune/>, (17/02/2022).
- Livre Blanc Céréales, 2017d. Septoriose. *Livre Blanc Céréales*. <https://www.livre-blanc-cereales.be/thematiques/maladies/froment/septoriose/>, (09/02/2022).
- Malhi G.S., Kaur M. & Kaushik P., 2021. Impact of Climate Change on Agriculture and Its Mitigation Strategies: A Review. *Sustainability* **13**(3), 1318, DOI:[10.3390/su13031318](https://doi.org/10.3390/su13031318).
- Martinelli F., Scalenghe R., Davino S., Panno S., Scuderi G., Ruisi P., Villa P., Stroppiana D., Boschetti M., Goulart L.R., Davis C.E. & Dandekar A.M., 2015. Advanced methods of plant disease detection. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **35**(1), 1–25, DOI:[10.1007/s13593-014-0246-1](https://doi.org/10.1007/s13593-014-0246-1).
- Merzlyak M.N., Gitelson A.A., Chivkunova O.B. & Rakitin V.YU., 1999. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum* **106**(1), 135–141, DOI:[10.1034/j.1399-3054.1999.106119.x](https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1999.106119.x).
- Merzlyak M.N., Gitelson A.A., Chivkunova O.B., Solovchenko A.E. & Pogosyan S.I., 2003. Application of Reflectance Spectroscopy for Analysis of Higher Plant Pigments. *Russian Journal of Plant Physiology* **50**(5), 704–710, DOI:[10.1023/A:1025608728405](https://doi.org/10.1023/A:1025608728405).
- Moshou D., Bravo C., Oberti R., West J., Bodria L., McCartney A. & Ramon H., 2005. Plant disease detection based on data fusion of hyper-spectral and multi-spectral fluorescence imaging using Kohonen maps. *Real-Time Imaging* **11**(2), 75–83, DOI:[10.1016/j.rti.2005.03.003](https://doi.org/10.1016/j.rti.2005.03.003).
- Moshou D., Bravo C., Wahlen S., West J., McCartney A., De Baerdemaeker J. & Ramon H., 2006. Simultaneous identification of plant stresses and diseases in arable crops using proximal optical sensing and self-organising maps. *Precision Agric* **7**(3), 149–164, DOI:[10.1007/s11119-006-9002-0](https://doi.org/10.1007/s11119-006-9002-0).
- Nicolas H., 2005. Use of remote sensing within the optical and thermal spectral ranges in order to detect Septoria tritici on winter wheat. *Precision Agriculture '05* **5**, 81–89, DOI:[10.3920/978-90-8686-549-9](https://doi.org/10.3920/978-90-8686-549-9).
- Nysten A., Van der Verren B., Blanchard R., Vandenberghe C., Legrand J., Stalport A., Mahieu O., Abras M., Heens B., Godden B., Pierreux J., Reuter V., Blondiau L.-M., Collin C., Vilret A., Godin B., Van Remoortel V. & Dumont B., n.d. La fertilisation azotée. In: *Livre Blanc « Céréales » – Février 2022*. Gembloux.
- Ollinger S.V., 2011. Sources of variability in canopy reflectance and the convergent properties of plants. *New Phytologist* **189**(2), 375–394, DOI:[10.1111/j.1469-8137.2010.03536.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03536.x).
- Padmavathi K. & Thangadurai K., 2016. Implementation of RGB and Grayscale Images in Plant Leaves Disease Detection – Comparative Study. *Indian Journal of Science and Technology* **9**(6), DOI:[10.17485/ijst/2016/v9i6/77739](https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i6/77739).
- Peñuelas J., Filella I. & Gamon J.A., 1995. Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance. *New Phytol* **131**(3), 291–296, DOI:[10.1111/j.1469-8137.1995.tb03064.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1995.tb03064.x).

- Peñuelas J., Gamon J.A., Fredeen A.L., Merino J. & Field C.B., 1994. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment* **48**(2), 135–146, DOI:[10.1016/0034-4257\(94\)90136-8](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90136-8).
- Peñuelas J., Isla R., Filella I. & Araus J.L., 1997. Visible and Near-Infrared Reflectance Assessment of Salinity Effects on Barley. *Crop Sci.* **37**(1), 198–202, DOI:[10.2135/cropsci1997.0011183X003700010033x](https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700010033x).
- Peteinatos G., Korsaeht A., Berge T. & Gerhards R., 2016. Using Optical Sensors to Identify Water Deprivation, Nitrogen Shortage, Weed Presence and Fungal Infection in Wheat. *Agriculture* **6**(2), 24, DOI:[10.3390/agriculture6020024](https://doi.org/10.3390/agriculture6020024).
- Peterson R.F., Campbell A.B. & Hannah A.E., 1948. A DIAGRAMMATIC SCALE FOR ESTIMATING RUST INTENSITY ON LEAVES AND STEMS OF CEREALS. *Can. J. Res.* **26c**(5), 496–500, DOI:[10.1139/cjr48c-033](https://doi.org/10.1139/cjr48c-033).
- Phytoweb, 2015. Produits phytopharmaceutiques et Fertilisants. *fytoweb*. <https://fytoweb.be/fr/>, (05/08/2022).
- Poorter H., Fiorani F., Pieruschka R., Wojciechowski T., Putten W.H., Kleyer M., Schurr U. & Postma J., 2016. Pampered inside, pestered outside? Differences and similarities between plants growing in controlled conditions and in the field. *New Phytol* **212**(4), 838–855, DOI:[10.1111/nph.14243](https://doi.org/10.1111/nph.14243).
- Rani L., Thapa K., Kanojia N., Sharma N., Singh S., Grewal A.S., Srivastav A.L. & Kaushal J., 2021. An extensive review on the consequences of chemical pesticides on human health and environment. *Journal of Cleaner Production* **283**, 124657, DOI:[10.1016/j.jclepro.2020.124657](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124657).
- Rasmussen I.S., Dresbøll D.B. & Thorup-Kristensen K., 2015. Winter wheat cultivars and nitrogen (N) fertilization—Effects on root growth, N uptake efficiency and N use efficiency. *European Journal of Agronomy* **68**, 38–49, DOI:[10.1016/j.eja.2015.04.003](https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.04.003).
- Reynolds M., Chapman S., Crespo-Herrera L., Molero G., Mondal S., Pequeno D.N.L., Pinto F., Pinera-Chavez F.J., Poland J., Rivera-Amado C., Saint Pierre C. & Sukumaran S., 2020. Breeder friendly phenotyping. *Plant Science* **295**, 110396, DOI:[10.1016/j.plantsci.2019.110396](https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110396).
- Rivero R.M., Kojima M., Gepstein A., Sakakibara H., Mittler R., Gepstein S. & Blumwald E., 2007. Delayed leaf senescence induces extreme drought tolerance in a flowering plant. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **104**(49), 19631–19636, DOI:[10.1073/pnas.0709453104](https://doi.org/10.1073/pnas.0709453104).
- Roelfs A.P., Saari E.E. & Singh R.P., 1992. *Rust diseases of wheat: Concepts and methods of disease management*, Internat. Maize and Wheat Improvement Center, Mexico, D.F., 81.
- Rosell J.R. & Sanz R., 2012. A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities. *Computers and Electronics in Agriculture* **81**, 124–141, DOI:[10.1016/j.compag.2011.09.007](https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.09.007).
- Rym Ben S., 2010. Effets de la septoriose foliaire sur la sénescence et les flux d'azote pendant le remplissage des grains chez le blé tendre (Agronomie).
- Sahoo R.N., Ray S.S. & Manjunath K.R., 2015. Hyperspectral remote sensing of agriculture. *Current Science* **108**(5), 848–859.
- Sánchez-Vallet A., McDonald M.C., Solomon P.S. & McDonald B.A., 2015. Is Zymoseptoria tritici a hemibiotroph? *Fungal Genetics and Biology* **79**, 29–32, DOI:[10.1016/j.fgb.2015.04.001](https://doi.org/10.1016/j.fgb.2015.04.001).
- Shaver T.M., Khosla R. & Westfall D.G., 2010. Evaluation of Two Ground-Based Active Crop Canopy Sensors in Maize: Growth Stage, Row Spacing, and Sensor Movement Speed. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **74**(6), 2101–2108, DOI:[10.2136/sssaj2009.0421](https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0421).
- Shaw M.W. & Royle D.J., 1989. Airborne inoculum as a major source of Septoria tritici (Mycosphaerella graminicola) infections in winter wheat crops in the UK. *Plant Pathology* **38**(1), 35–43, DOI:[10.1111/j.1365-3059.1989.tb01425.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1989.tb01425.x).
- Simón M.R., Fleitas M.C., Castro A.C. & Schierenbeck M., 2020. How Foliar Fungal Diseases Affect Nitrogen Dynamics, Milling, and End-Use Quality of Wheat. *Front. Plant Sci.* **11**, 569401, DOI:[10.3389/fpls.2020.569401](https://doi.org/10.3389/fpls.2020.569401).
- Sims D.A. & Gamon J.A., 2002. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment* **81**(2–3), 337–354, DOI:[10.1016/S0034-4257\(02\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X).

- SPW, SPF Finances & IGN, 2021. WalOnMap : Toute la wallonie à la carte. *WalOnMap*. <https://geoportail.wallonie.be/walonmap#BBOX=173915.7408538578,178737.78174793962,136361.43477449613,138187.06342575344>, (23/05/2022).
- Statbel, 2020a. Chiffres clés de l'agriculture 2020. <https://statbel.fgov.be/>, (04/03/2022).
- Statbel, 2020b. Estimation définitive de la production des cultures agricoles - 2020. <https://statbel.fgov.be/>, (04/03/2022).
- Stocker T. (Ed.), 2014. *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, New York, 1535.
- Taiz L., Zeiger E., Møller I.M. & Murphy A.S. (Eds.), 2015. *Plant physiology and development*, Sinauer Associates, Inc., Publishers, Sunderland, Massachusetts, 761.
- Tartachnyk I.I., Rademacher I. & Kühbauch W., 2006. Distinguishing nitrogen deficiency and fungal infection of winter wheat by laser-induced fluorescence. *Precision Agric* **7**(4), 281–293, DOI:[10.1007/s11119-006-9008-7](https://doi.org/10.1007/s11119-006-9008-7).
- Thenkabail P.S., Smith R.B. & De Pauw E., 2000. Hyperspectral Vegetation Indices and Their Relationships with Agricultural Crop Characteristics. *Remote Sensing of Environment* **71**(2), 158–182, DOI:[10.1016/S0034-4257\(99\)00067-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00067-X).
- Thomas S., Behmann J., Steier A., Kraska T., Muller O., Rascher U. & Mahlein A.-K., 2018. Quantitative assessment of disease severity and rating of barley cultivars based on hyperspectral imaging in a non-invasive, automated phenotyping platform. *Plant Methods* **14**(1), 45, DOI:[10.1186/s13007-018-0313-8](https://doi.org/10.1186/s13007-018-0313-8).
- Tucker C.J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* **8**(2), 127–150, DOI:[10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0).
- Tucker C.J., Elgin J.H., McMurtrey J.E. & Fan C.J., 1979. Monitoring corn and soybean crop development with hand-held radiometer spectral data. *Remote Sensing of Environment* **8**(3), 237–248, DOI:[10.1016/0034-4257\(79\)90004-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90004-X).
- Walter A., Liebisch F. & Hund A., 2015. Plant phenotyping: from bean weighing to image analysis. *Plant Methods* **11**(1), 14, DOI:[10.1186/s13007-015-0056-8](https://doi.org/10.1186/s13007-015-0056-8).
- Wang H., Qian X., Zhang L., Xu S., Li H., Xia X., Dai L., Xu L., Yu J. & Liu X., 2018. A Method of High Throughput Monitoring Crop Physiology Using Chlorophyll Fluorescence and Multispectral Imaging. *Front. Plant Sci.* **9**, 407, DOI:[10.3389/fpls.2018.00407](https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00407).
- Weiss M., Jacob F. & Duveiller G., 2020. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sensing of Environment* **236**, 111402, DOI:[10.1016/j.rse.2019.111402](https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402).
- Xue J. & Su B., 2017. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors* **2017**, 1–17, DOI:[10.1155/2017/1353691](https://doi.org/10.1155/2017/1353691).
- Yu K., Anderegg J., Mikaberidze A., Karisto P., Mascher F., McDonald B.A., Walter A. & Hund A., 2018. Hyperspectral Canopy Sensing of Wheat Septoria Tritici Blotch Disease. *Front. Plant Sci.* **9**, 1195, DOI:[10.3389/fpls.2018.01195](https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01195).
- Zadoks J.C., Chang T.T. & Konzak C.F., 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res* **14**(6), 415–421, DOI:[10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x).
- Zermas D., Nelson H.J., Stanitsas P., Morellas V., Mulla D.J. & Papanikolopoulos N., 2021. A Methodology for the Detection of Nitrogen Deficiency in Corn Fields Using High-Resolution RGB Imagery. *IEEE Trans. Automat. Sci. Eng.* **18**(4), 1879–1891, DOI:[10.1109/TASE.2020.3022868](https://doi.org/10.1109/TASE.2020.3022868).
- Zhang J., Pu R., Huang W., Yuan L., Luo J. & Wang J., 2012. Using in-situ hyperspectral data for detecting and discriminating yellow rust disease from nutrient stresses. *Field Crops Research* **134**, 165–174, DOI:[10.1016/j.fcr.2012.05.011](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.05.011).
- Zhang J., Yuan L., Pu R., Loraamm R.W., Yang G. & Wang J., 2014. Comparison between wavelet spectral features and conventional spectral features in detecting yellow rust for winter wheat. *Computers and Electronics in Agriculture* **100**, 79–87, DOI:[10.1016/j.compag.2013.11.001](https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.11.001).
- Zhao C., Zhou Q., Wang J. & Huang W., 2004. Spectral Indices Redefined in Detecting Nitrogen Availability for Wheat Canopy. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **35**(5–6), 853–864, DOI:[10.1081/CSS-120030362](https://doi.org/10.1081/CSS-120030362).

- Zheng Q., Huang W., Cui X., Shi Y. & Liu L., 2018. New Spectral Index for Detecting Wheat Yellow Rust Using Sentinel-2 Multispectral Imagery. *Sensors* **18**(3), 868, DOI:[10.3390/s18030868](https://doi.org/10.3390/s18030868).
- Zhou X., Huang W., Kong W., Ye H., Dong Y. & Casa R., 2017. Assessment of leaf carotenoids content with a new carotenoid index: Development and validation on experimental and model data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **57**, 24–35, DOI:[10.1016/j.jag.2016.12.005](https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.12.005).
- Zhou Y., Lao C., Yang Y., Zhang Z., Chen H., Chen Y., Chen J., Ning J. & Yang N., 2021. Diagnosis of winter-wheat water stress based on UAV-borne multispectral image texture and vegetation indices. *Agricultural Water Management* **256**, 107076, DOI:[10.1016/j.agwat.2021.107076](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107076).
- Živčák M., Olšovská K., Slamka P., Galambošová J., Rataj V., Shao H.B. & Brestič M., 2015. Application of chlorophyll fluorescence performance indices to assess the wheat photosynthetic functions influenced by nitrogen deficiency. *Plant Soil and Environment* **60**(5), 210–215.

Annexes

Annexe 1 : Bulletin d'analyse de l'azote dans le profil de terre réalisé le 1 mars 2021.

Horizon	pH_KCl	Carbone organique [g/kg de terre sèche]	Humus [% de terre sèche]	Azote total [g/100g de terre sèche]	C/N	Matière sèche [%]	Azote minéral [kg N-NO3/l]
0-30 cm	6,2	10	2	0,11	9	80	12
30-60 cm						81	15
60-90 cm						81	29
Total							56
Nature du précédent	Pomme de terre						

Annexe 2 : Bulletin d'analyse de l'azote dans le profil de terre réalisé le début mars 2022.

Horizon	pH_KCl	Carbone organique [g/kg de terre sèche]	Humus [% de terre sèche]	Azote total [g/100g de terre sèche]	C/N	Matière sèche [%]	Azote minéral [kg N-NO3/l]
0-30 cm							2.36
30-60 cm							6.39
60-90 cm							14.58
Total							23.33
Nature du précédent	Pomme de terre						

Annexe 3 : Opérations culturales de l'essai 2021.

Date d'intervention	Opération culturale	Produit phytopharmaceutique
27-octo.	Semis (300 gr.m ²)	
10-mars	Fertilisation au stade Zadoks 22-25	
24-mars	Désherbage	SIGMA MAXX 0.9 l.ha ⁻¹ + BIATHLON DUO 70 g.ha ⁻¹
16-avri.	Fertilisation au stade Zadoks 32	
20-avri.	Régulateur	CYCOCEL 75 l.ha ⁻¹
11-mai	Application fongicide au stade Zadoks 32	KESTREL 1.25 l.ha ⁻¹ + HERMOVIT 3 kg.ha ⁻¹
27-mai	Fertilisation au stade Zadoks 39	
28-mai	Application fongicide au stade Zadoks 39	LIBRAX 1.5 l.ha ⁻¹
15-juin	Application fongicide au stade Zadoks 55	LIBRAX 1.5 l.ha ⁻¹
15-juin	Application fongicide au stade Zadoks 65	PROSARO 1 l.ha ⁻¹

Annexe 4 : Opérations culturales de l'essai 2022.

Date d'intervention	Opération culturale	Produit phytopharmaceutique
28-octo.	Semis (300 gr.m ⁻²)	
17-mars	Fertilisation au stade Zadoks 22-25	
24-mars	Désherbage	VEGETOP 1 l.ha ⁻¹ + BIATHLON DUO 70 g.ha ⁻¹ + SIGMA STAR 0.33 kg.ha ⁻¹
14-avri.	Régulateur	CYCOCEL 75 l.ha ⁻¹
19-avri.	Désherbage	AXIAL 1.2 l.ha ⁻¹
21-avri.	Fertilisation au stade Zadoks 32	
04-mai	Application fongicide au stade Zadoks 32	KESTREL 1.25 l.ha ⁻¹ + HERMOVIT 3 kg.ha ⁻¹
16-mai	Fertilisation au stade Zadoks 39	
17-mai	Application fongicide au stade Zadoks 39	LIBRAX 1.5 l.ha ⁻¹
30-mai	Application fongicide au stade Zadoks 55	LIBRAX 1.5 l.ha ⁻¹
16-juin	Application fongicide au stade Zadoks 65	PROSARO 1 l.ha ⁻¹

Annexe 5 : P-valeurs obtenues pour les deux AOV2 des données de rendement 2021.

	AOV2		
	Fertilisation*Fongicide	Fertilisation	Fongicide
Sans 200 kgN.ha-1	0.184	6.23e-06 ***	1.92e-13 ***
Sans 2F	0.204	0.00758 **	2.63e-12 ***

Annexe 6 : P-valeurs obtenues pour l' AOV1 des INN à différents stades Zadoks en 2021 et 2022.

	AOV1			
	INN (Z30)	INN (Z32)	INN (Z39)	INN (Z65)
2022	0.340	0.003 **	5.92e-4 ***	/
2021	/	/	2.37e-4 ***	5.39e-4 ***

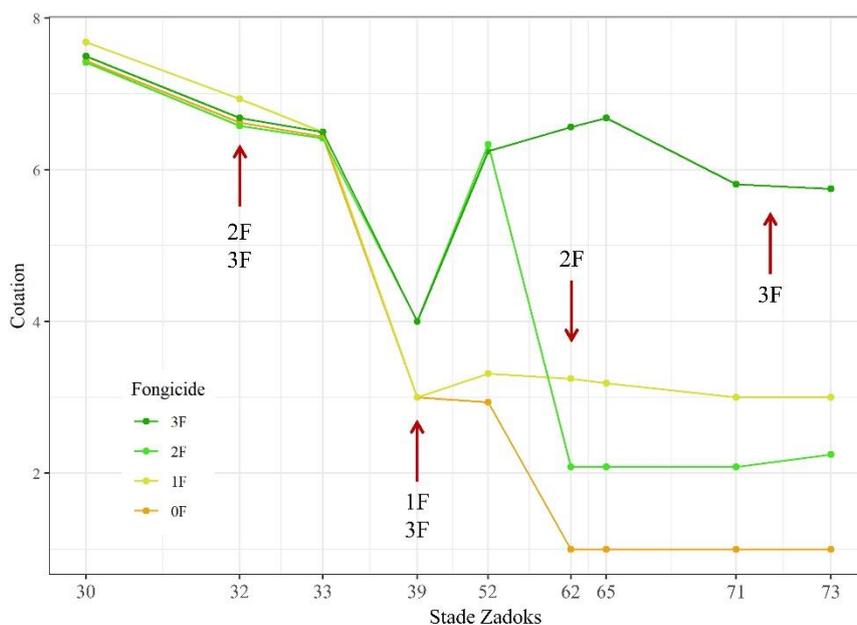
Annexe 7 : P-valeurs obtenues pour les deux AOV2 des AUDPC aux différents stades Zadoks en 2022.

		AOV2		
		Fertilisation*Fongicide	Fertilisation	Fongicide
AUDPC sans 200 kgN.ha ⁻¹	Z31	0.485	0.537	0.209
	Z32	0.424	0.346	0.260
	Z33	0.708	0.253	0.421
	Z39	0.832	0.298	0.831
	Z52	0.938	0.409	0.00461 **
	Z62	0.996	0.593	4.06e-08 ***
	Z65	0.999	0.658	5.09e-10 ***
	Z71	0.998	0.835	6.32e-14 ***
	Z73	0.998	0.881	2.28e-14 ***
AUDPC sans 2F	Z31	0.451	0.420	0.277
	Z32	0.327	0.464	0.381
	Z33	0.359	0.428	0.641
	Z39	0.359	0.385	0.891
	Z52	0.394	0.263	0.00202 **
	Z62	0.435	0.0778	6.84e-11 ***
	Z65	0.433	0.0373 *	1.38e-13 ***
	Z71	0.363	0.0103 *	<2e-16 ***
	Z73	0.346	0.0198 *	<2e-16 ***

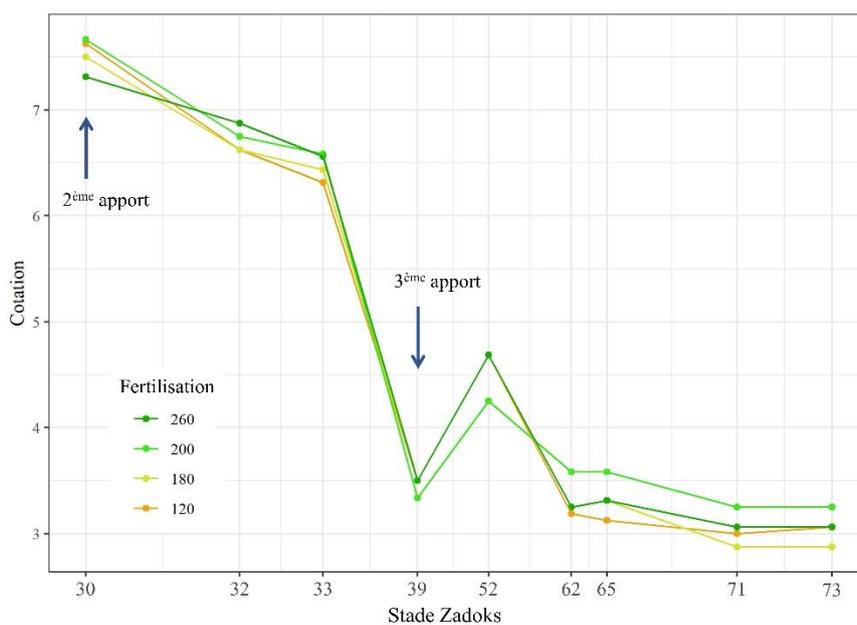
Annexe 8 : Test de SNK pour chaque date sur les IV avec leur seuil optimal.

IV	Seuil optimal	Groupe								
		16-06-21	25-06-21	09-07-21	04-19-22	02-05-22	09-05-22	17-05-22	23-05-22	30-05-22
NPCI	0.139	a	a	a	a	a	a	ab	a	a
PSRI	0.033	a	a	a	a	a	b	a	a	a
NRI	0.067	ab	a	b	ab	bc	c	ab	a	b
PSSRa	5.778	bc	a	bc	ab	bc	e	abc	b	b
NDVI2	0.711	bcd	a	bc	ab	b	e	abc	b	b
NDVI1	0.761	bcd	a	cd	ab	b	de	abc	b	b
RERDVI	2.667	bcd	a	c	cd	bc	e	abc	bc	cd
MCARI	33.333	bcd	a	c	cd	bc	e	abc	bc	cd
REDVI	19.444	bcd	a	cd	bc	b	e	bcd	b	de
PRI	-0.361	bcd	a	f	e	bc	c	cde	d	c
RESAVI	0.494	bcd	a	cd	e	bc	e	abc	d	de
MRESAVI	0.500	bcd	a	cd	e	bc	e	abc	d	de
NDRE	0.333	bcd	a	cd	e	bc	e	abc	d	de
SIPI	0.726	cde	a	de	cd	cd	e	abc	d	de
SR17	3.944	bcd	a	ef	de	bcd	e	cde	e	de
TCARI/OSAVI	28.889	e	a	de	cd	d	d	de	e	e
TCARI	30.000	de	a	ef	e	e	de	e	e	e

Annexe 9 : Graphique exprimant les cotations moyennes attribuées aux modalités « Fongicide » aux différents stades Zadoks.



Annexe 10 : Graphique exprimant les cotations moyennes attribuées aux modalités « Fertilisation » aux différents stades Zadoks.



Annexe 11 : Étude de corrélation entre le rendement, le poids sec des épis (Z89) et le poids des grains provenant de ces épis (Saison 2021).

	Poids des grains	Poids sec des épis (Z89)
Rendement	-0.624 **	0.592 **
Poids sec des épis (Z89)		0.943 ***