

Caractérisation du stress hydrique sur froment d'hiver par imagerie de proximité

Auteur : Lepage, Gauthier

Promoteur(s) : Mercatoris, Benoît

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/15337>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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

CARACTÉRISATION DU STRESS HYDRIQUE SUR FROMENT D'HIVER PAR IMAGERIE THERMIQUE DE PROXIMITÉ

LEPAGE GAUTHIER

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

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021-2022

PROMOTEUR : MERCATORIS B.

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

Le présent document n'engage que son auteur

CARACTÉRISATION DU STRESS HYDRIQUE SUR FROMENT D'HIVER PAR IMAGERIE THERMIQUE DE PROXIMITÉ

LEPAGE GAUTHIER

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

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021-2022

PROMOTEUR : MERCATORIS B.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon promoteur, Benoit Mercatoris, pour l'opportunité qui m'a été offerte concernant ce travail de fin d'études. Je tiens également à remercier William Falesse et l'entreprise Redebel de m'avoir fait confiance et de m'avoir permis de réaliser des mesures sur une parcelle expérimentale de qualité.

Je remercie aussi tous les employés, doctorants et techniciens travaillant quotidiennement au GR pour leur cordialité et leur bonne humeur.

Je tiens également à adresser un grand merci à Sébastien Dandrifosse et Alexis Carlier pour leur accompagnement et leur pédagogie tout au long de ce projet. Ils m'ont permis de réaliser un travail de fin d'études qui m'est propre et dont je peux être fier. Dans une autre mesure, je les remercie pour la bonne ambiance de travail instaurée qui m'a permis de prendre du plaisir durant ces quelques mois de cohabitation. Je fais notamment référence au tournoi de tennis de table organisé par leurs soins qui a égayé l'ambiance du génie rural.

Je remercie mes parents ainsi que tous les membres de mon entourage pour leur soutien mental et leurs encouragements. Je dis merci à mes deux frères pour leurs conseils précieux pour réaliser et écrire un travail de fin d'études. Je salue tous mes amis qui m'ont soutenu et qui ont été à mes côtés jusqu'au bout de cette épreuve.

Pour finir, je tiens à saluer tous mes collègues étudiants du génie rural qui ont traversé cette épreuve à mes côtés. Ces derniers sont Jérôme Balthazar, Martin de Worm, Jérôme Heens, Hugo Massart ainsi que Cyrille Paquet. Je tiens à porter une attention particulière à Jérôme Heens pour son soutien et l'entraide dont il a fait preuve à mon égard. Je les remercie tous pour le temps passé ensemble lors de ces derniers mois.

Le réchauffement climatique mène à une hausse des températures et à des sécheresses de plus en plus récurrentes. Ce phénomène induit une augmentation du stress hydrique subi par les cultures. Ceci peut induire une diminution de rendement chez certaines céréales dont le froment d'hiver. Afin de se diriger vers une utilisation raisonnée des ressources en eau pour pallier à ce stress, des méthodes ont été développées pour permettre de le quantifier. L'usage de l'imagerie thermique permet de mesurer la variation de la température de la canopée subie lors d'un tel évènement. Il faut cependant normaliser cette température vis-à-vis des conditions environnementales variables en grande culture. Un système composé d'une référence sèche et humide a été imaginé et adapté pour une structure de phénotypage avec une vue zénithale sur le froment. La mesure automatique de la température des deux références dans l'image à l'aide d'un algorithme Python a permis de calculer l'indice de stress hydrique des cultures (CWSI). Des démarches exploratoires ont été menées afin de comprendre la réponse mesurée par la caméra dans des conditions environnementales extérieures. Finalement, le système a été testé dans des conditions de stress hydrique afin de déterminer des différences physiologiques et morphologiques entre plusieurs applications de biostimulants. La quantification du stress hydrique mesuré n'a pas pu être vérifiée, cela étant dû au manque d'une modalité non stressée dans la parcelle expérimentale. Presqu'aucune différence significative de stress hydrique n'a été décelée entre les différentes applications. Des tendances ont pu cependant être observées entre les différentes modalités expérimentales. Cette recherche a permis de définir des démarches et des améliorations qui permettront à un futur système de référence d'être plus adapté et mieux évalué.

Global warming is leading to higher temperatures and more recurrent droughts. This phenomenon induces increased water stress for crops. This can lead to a decrease in yields for certain cereals, including winter wheat. In order to move towards a rational use of water resources to alleviate this stress, methods have been developed to quantify it. The use of thermal imagery makes it possible to measure the variation in canopy temperature undergone during such an event. However, it is necessary to normalise this temperature with respect to the variable environmental conditions in fields. A system consisting of a dry and wet reference was designed and adapted for a phenotyping structure with a zenithal view on the wheat. The automatic measurement of the temperature of the two references in the image using a Python algorithm was used to calculate the crop water stress index (CWSI). Exploratory steps were taken to understand the response measured by the camera under outdoor environmental conditions. Finally, the system was tested under water stress conditions to determine physiological and morphological differences between several biostimulant applications. The quantification of the measured water stress could not be verified due to the lack of an unstressed modality in the experimental plot. Almost no significant difference in water stress was detected between the different applications. However, trends could be observed between the different experimental modalities. This research has allowed the definition of approaches and improvements that will allow a future reference system to be more adapted and better evaluated.

Table des matières

A.	Introduction	1
1.	Mise en contexte.....	1
2.	Rappels théoriques.....	3
2.1.	L'imagerie thermique	3
2.2.	Le stress hydrique.....	7
2.3.	Les biostimulants.....	7
3.	État de l'art	8
3.1.	Domaines d'application.....	8
3.2.	Applications agricoles	8
3.3.	Quantification du stress hydrique	9
4.	Objectifs.....	13
B.	Matériels et méthodes.....	14
1.	Système d'acquisition.....	14
1.1.	Le système multi-capteur.....	14
1.2.	La structure	16
1.3.	Système de centralisation des capteurs.....	17
1.4.	Conditions d'utilisation	17
2.	Création de la référence.....	18
2.1.	Système de référence	18
2.2.	Le support.....	18
2.3.	Le tissu de référence	19
3.	Acquisition de données.....	21
3.1.	Séries temporelles.....	21
3.2.	Redebel.....	22
4.	Traitement des images.....	24
4.1.	Prétraitement.....	24
4.2.	Détection des références.....	25
4.3.	Validation de la détection des références	27
4.4.	Calcul des indices	28
C.	Résultats et discussions	29
1.	Analyse des séries temporelles	29
1.1.	La canopée.....	29
1.2.	Les systèmes de référence	32
2.	Analyse de l'algorithme de détection	37
2.1.	Taux de détection.....	37

2.2.	Validation de la détection	38
3.	Expérimentation à Redebel.....	41
3.1.	Différences significatives de stress.....	41
3.2.	Tendances observées	43
D.	Conclusions et perspectives.....	49
1.	Conclusions	49
2.	Perspectives	49
2.1.	Expérimentation.....	49
2.2.	Système de référence et détection.....	50
2.3.	Mesure de l'émissivité.....	52
E.	Annexes	53
F.	Bibliographie	57

Table des figures

Figure 1 : Images thermiques en nuances de gris (gauche) et en fausses couleurs (droite).	3
Figure 2 : Spectre électromagnétique et zone exploitée par l'imagerie thermique.	4
Figure 3 : Facteur de transmission de l'air en fonction de la longueur d'onde (Leemans, 2008).	4
Figure 4: Traitement du rayonnement infrarouge en image thermique par la caméra.	6
Figure 5 : Système de référence organique de Iseki & Olaleye. (2020).	11
Figure 6 : Système de référence établi par Shoa et al. (2021) (à gauche) et Maes et al. (2016) (à droite)..	12
Figure 7 : Agencement du système multi-capteur et du spectromètre équipé de son correcteur de cosinus.	14
Figure 8 : Caméra Optris PI640.....	15
Figure 9 : Caméra GO-5000-USB et son objectif LM16HC.....	15
Figure 10 : Réseau multispectral Micro-MCA de caméras.	16
Figure 11 : AvaSpec-ULS204.	16
Figure 12 : Système d'acquisition.....	17
Figure 13 : Schéma (Solidworks 2021) des supports de référence.....	19
Figure 14 : Représentation des matériaux de référence. Comparaison des matériaux bruts dans leur état sec et humide. La forme finale en demi-sphère est celle utilisée et étudiée lors des expérimentations.	19
Figure 15 : Différents coloris du matériau A sur le support A (MA-SA).....	20
Figure 16 : Schéma expérimental de la parcelle de Redebel.	22
Figure 17 : Prétraitement et extraction des traits physiologiques et morphologiques du froment.	24
Figure 18 : Schéma simplifié de la détection et de la mesure de la température des références.	27
Figure 19 : Interface de détection manuelle.	28
Figure 20 : Évolution de la température et du rayonnement solaire incident au cours d'une journée sur le site du Centenaire le 12/05 (a) et le 25/05 (b) et à Lonzée le 29/06 (c).....	29
Figure 21 : Evolution de la température de la canopée ensoleillée et ombragée au Centenaire le 28/04 (a), le 25/05 (b), le 31/05 (c) et à Lonzée le 29/06 (d).	30
Figure 22 : Evolution de la température des organes de la canopée au Centenaire le 25/05 (a) et à Lonzée le 29/06 (b).....	31
Figure 23 : Évolution des proportions des différents éléments dans l'image en fonction du rayonnement solaire au Centenaire le 25/05 (a) et à Lonzée le 29/06 (b).....	32
Figure 24 : Évolution de la température des références et de la canopée (a), de leur écart-type (Ectp) (b), des différences de température entre les références et la canopée (c) et de l'indice de stress hydrique des cultures (d) pour le système MA-SA-C1 le 28/04 au Centenaire.	33

Figure 25 : Évolution de la température des références et de la canopée (a), de leur écart-type (Ectp) (b), des différences de température entre les références et la canopée (c) et de l'indice de stress hydrique des cultures (d) pour les systèmes MA-SA-C1 et MA-SB-C1 le 19/05 au Centenaire.	34
Figure 26 : Évolution de la température des références et de la canopée (a), de leur écart-type (Ectp) (b), des différences de température entre les références et la canopée (c) et de l'indice de stress hydrique des cultures (d) pour le système MC-SA au Centenaire le 25/05.	35
Figure 27 : Évolution de la température des références et de la canopée (a), de leur écart-type (b), des différences de température entre les références et la canopée (c) et de l'indice de stress hydrique des cultures (d) pour le système MA-SA-C2 à Lonzée le 29/06.	36
Figure 28 : Différents types d'erreur de détection rencontrés.	38
Figure 29 : Comparaison de la position en Y de RH (gauche) et RS (droite) entre la méthode automatique et manuelle. Détection du système MA-SA-C1 lors de la journée du 28/04/2022.	39
Figure 30 : Comparaison de la variance mesurée sur RH (gauche) et RS (droite) entre la méthode automatique et manuelle. Détection du système MA-SA-C1 lors de la journée du 28/04/2022.	40
Figure 31 : Température de la canopée en fonction du traitement (a) et en fonction de la micro-parcelle étudiée et du rayonnement solaire incident (b). T0 représente le témoin sans application de biostimulant.	42
Figure 32 : Température de la canopée en fonction du traitement (a) et de la micro-parcelle étudiée (b). Densité d'épis fonction du traitement (c) et en fonction de la micro-parcelle étudiée (d). T0 représente le témoin sans application de biostimulant.	42
Figure 33 : Comparaison entre les stades 30 et 33 de la variation du CWSI (a), du NDVI (b), du ratio de feuilles (c) et de vert (d) dans l'image entre les différents traitements, T0 étant le témoin.	44
Figure 34 : Comparaison entre les stades 65 et 72 de la variation du CWSI (a), du NDVI (b), du ratio de feuilles (c) et de vert (d) dans l'image et de la densité d'épis (e) entre les différents traitements, T0 étant le témoin.	45
Figure 35 : Comparaison entre les stades 73-75 et 79 de la variation du CWSI (a), du NDVI (b), du ratio de feuilles (c) et de vert (d) dans l'image et de la densité d'épis (e) entre les différents traitements, T0 étant le témoin.	47
Figure 36 : Variation du CWSI lors des 6 sessions d'acquisition pour chaque traitement, T0 étant le témoin.	48
Figure 37 : Variation du ratio de vert lors des 6 sessions d'acquisition pour chaque traitement, T0 étant le témoin.	53
Figure 38 : Variation du ratio de feuilles lors des 6 sessions d'acquisition pour chaque traitement, T0 étant le témoin.	53

Figure 39 : Variation de la hauteur lors des 6 sessions d'acquisition pour chaque traitement, T0 étant le témoin.	54
Figure 40 : Variation du NDVI lors des 6 sessions d'acquisition pour chaque traitement, T0 étant le témoin.	54
Figure 41 : Variation de la densité d'épis lors des 6 sessions d'acquisition pour chaque traitement, T0 étant le témoin.....	55
Figure 42 : Température de la canopée et rayonnement solaire incident en fonction de la micro-parcelle étudiée à Redebel aux stades BBCH 30 (a), 33 (b), 65 (c), 72 (d), 73-75 (e), 79 (f).	56

Table des tableaux

Tableau 1 : Informations générales d'une Optris PI 640.....	15
Tableau 2 : Informations générales d'une GO-5000-USB.....	15
Tableau 3 : Informations générales du réseau multispectral de caméras.....	16
Tableau 4 : Modalités des séries temporelles réalisées.	21
Tableau 5 : Description des sessions d'acquisition sur la parcelle expérimentale de Redebel.	23
Tableau 6 : Indices utilisés dans la comparaison des applications de biostimulant.	28
Tableau 7 : Catégories des erreurs de détection de la référence sèche.....	37
Tableau 8 : Résultats de validation de la méthode automatique pour RH concernant la position du centre du cercle détecté sur l'axe horizontal (X) et vertical (Y) et pour la température mesurée.....	39
Tableau 9 : Résultats de validation de la méthode automatique pour RS concernant la position du centre du cercle détecté sur l'axe horizontal (X) et vertical (Y) et pour la température mesurée.....	39
Tableau 10 : Résultats du test de Tukey pour différentes variables lors des sessions d'acquisition. Une différence significative entre les moyennes est indiquée par une couleur verte tandis qu'une égalité est représentée par une couleur rouge. Un seuil de significativité α de 0.15 a été utilisé.....	41

Table des abréviations

CWSI : **C**rop **W**ater **S**tress **I**ndex = Indice de stress hydrique des cultures

IG : Indice de conductance stomatique

NDVI : **N**ormalized **D**ifference **V**egetation **I**ndex = Indice de végétation par différence normalisée

RH : Référence humide

RS : Référence sèche

$T_{\text{canopée}} / T_c$: Température de la canopée

T_{humide} / T_h : Température de la référence humide

$T_{\text{sèche}} / T_s$: Température de la référence sèche

RMSE : Erreur quadratique moyenne

MAE : Erreur absolue moyenne

R^2 : Coefficient de détermination

Ectp : Écart-type

Exemple système de référence :

MA-SA-C1 : Matériau A de coloris 1 sur le support A

MA-SB-C2 : Matériau B de coloris sur le support A

MC-SB : Matériau C sur le support B

A. Introduction

1. Mise en contexte

Les événements de forte chaleur et de sécheresse n'ont cessé de se multiplier ces dernières années. En Belgique, le mercure s'affole de plus en plus fréquemment jusqu'à parfois atteindre la température exceptionnelle de 40 degrés. Les précipitations se font, quant à elles, plus rares mais redoublent dans leur intensité comme observé lors des violentes inondations qui ont touché le pays lors de l'été 2021. Sur ces trois dernières décennies, le record de l'année la plus chaude a été battu à maintes reprises sur un laps de temps de quelques années. Dans le top 10 des années les plus chaudes rencontrées à Uccle, sept d'entre elles sont situées dans la décennie 2010-2020 (IRM, 2020). Le rapport du GIEC 2022 a avancé que l'augmentation de la température mondiale, causée par le réchauffement climatique, dépassera les 1,5°C, voire 2°C au cours de ce 21^e siècle. Cette augmentation est accompagnée d'un lot important de conséquences planétaires qui impactent déjà différents secteurs d'activité dont l'agriculture. Par exemple, la durée et l'occurrence des événements de sécheresse et de déficit en précipitations ont augmenté dans plusieurs régions du globe. Ceci implique des changements dans les bilans hydriques, la teneur en eau de surface et les indices de précipitations et d'évaporation atmosphérique (Caretta et al., 2022; Pörtner et al., 2022). La physiologie ainsi que la morphologie des plantes domestiquées par l'homme s'en trouvent modifiées dans ces nouvelles conditions environnementales (Allahverdiyev et al., 2015; H.G. Jones, 2013). Selon leur état de développement, les dégâts subis par les cultures peuvent être plus ou moins intenses, voire irrémédiables. Le froment, deuxième céréale la plus consommée au monde (Statista, 2022), est situé en première ligne face à ces nouveaux changements. Bien que la hausse de la concentration en CO₂, liée au réchauffement climatique, pourrait s'avérer bénéfique à son développement (Broberg et al., 2019; Wilcox & Makowski, 2014), les fortes températures, couplées à un déficit hydrique, sont capables de provoquer chez lui une baisse de biomasse et de rendement (Debaeke & Bertrand, 2008; Saleem, 2003). L'union européenne produit, à elle seule, près de 130 millions de tonnes de froment sur son territoire sans compter les autres céréales (Eurostat, 2022). Dans un contexte de déséquilibre socio-économique, tel que la guerre en Ukraine, cette perte potentielle de rendement peut peser davantage sur le prix de vente du blé. Cette augmentation se répercute directement sur le prix de certains aliments indispensables ainsi que sur le portefeuille des citoyens. L'UE se doit aujourd'hui d'être capable d'en assurer la production de façon stable et continue. Des solutions doivent être trouvées pour pallier à une production insuffisante mais également aux pertes engendrées par les différents types de stress.

Une solution à un stress hydrique serait un apport d'eau par arrosage et irrigation. L'eau est une ressource indispensable pour le bon développement des cultures; mais durant les périodes de sécheresse, son usage est limité et doit être partagé entre tous ses usages anthropiques. Près de 70% de l'eau douce disponible est déjà utilisée par le secteur agricole (Hanasaki et al., 2018; Müller Schmied et al., 2021). Avec l'augmentation des périodes de sécheresse, ce pourcentage pourrait encore croître dans les années à venir. L'utilisation de cette ressource doit être révisée et optimisée par les agriculteurs et les autres acteurs du milieu. Dans les milieux arides et semi-arides, l'eau est déjà plus rare et les conditions climatiques plus difficiles. Plusieurs alternatives ont été déjà étudiées et testées en conditions réelles. Ces dernières pourraient se généraliser dans tous les pays faisant face à ces nouvelles vagues de sécheresse. L'usage de génotypes, plus tolérants aux stress abiotiques, a été mis en avant dans la littérature (Haque et al., 2021; Mwachenzi et al., 2016; Pokharel et al., 2018; Sabella et al., 2020). L'utilisation de systèmes d'irrigation adaptés ont été imaginés afin de réduire les besoins en eau des exploitations agricoles tout en améliorant leurs rendements (Abioye et al., 2020; Ma et al., 2016; Ojeda & Saurin, 2014). Les dernières méthodes développées cherchent à déterminer l'état de stress des cultures pour ensuite leur fournir l'eau nécessaire à leur bon développement. Des méthodes visuelles ne permettent pas de déterminer efficacement la présence d'une anomalie morphologique et encore moins physiologique dans une plante. Différents capteurs tels que des thermomètres infrarouges, des caméras couleurs, multispectrales, hyperspectrales et thermiques ont déjà été utilisés et ont fait leurs preuves dans le cadre de l'étude et de l'évaluation des besoins hydriques des cultures (Leinonen & Jones, 2004; Panigada et al., 2014; Stoll & Jones, 2007). Ils permettent de fournir un diagnostic de la plante avec une meilleure exactitude et précision.

La méthode choisie et développée ici a été l'imagerie thermique de proximité. En première partie, un état de l'art de l'imagerie thermique sera réalisé, détaillant son fonctionnement et ses différentes applications dans un contexte de stress hydrique. Une caméra thermique a été intégrée dans un système de phénotypage afin de pouvoir suivre la température d'une culture de froment. Une méthode permettant de déterminer l'état de stress hydrique a ensuite été imaginée et testée en conditions réelles pour comparer l'effet de différents biostimulants sur une culture en état de stress artificiel. Elle sera finalement critiquée et des perspectives d'amélioration seront présentées.

2. Rappels théoriques

2.1. L'imagerie thermique

L'imagerie thermique est une technique employée afin de mesurer la température des objets présents dans une image. L'acquisition est réalisée par l'intermédiaire d'une caméra thermique. Cette dernière permet de mesurer et de convertir en image visible, le rayonnement thermique émis par un corps (Bodnar, 2009). L'image, aussi appelée thermogramme, possède une certaine taille et résolution. Chacun de ses pixels renseigne une valeur de température souvent représentée sur 8 bits, en 256 profondeurs de gris allant du noir au blanc. Une représentation en fausse couleur facilite la visualisation des variations de température. La plus commune est l'utilisation d'une couleur froide (bleue) pour des basses températures et d'une couleur chaude (rouge) pour des températures élevées. Une échelle accompagne cette image et renseigne la température en fonction des différences de coloris (**Figure 1**). L'utilisation de cette méthode par rapport à un thermomètre classique fournit plusieurs avantages. Cette mesure se fait à distance, c'est-à-dire qu'elle ne détériore pas la température intrinsèque du ou des objets étudiés (Ishimwe et al., 2014). Ceci permet également de réaliser des acquisitions dans des conditions de haute température tout en protégeant les capteurs du matériel. De plus, la réponse de la caméra est presque instantanée et sauvegardée sous un format d'image.

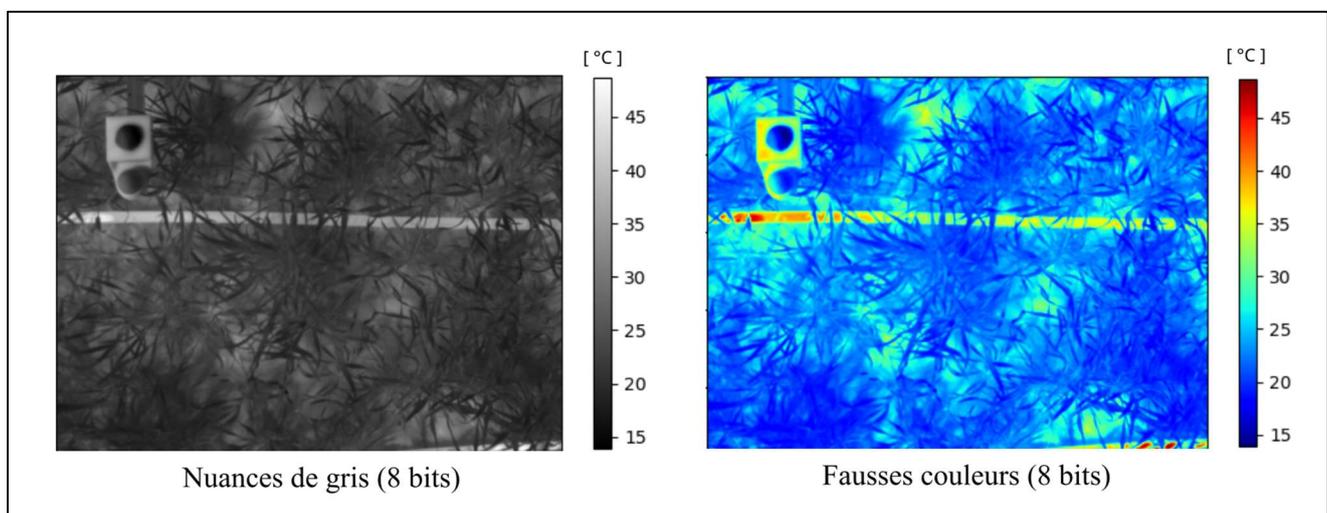


Figure 1 : Images thermiques en nuances de gris (gauche) et en fausses couleurs (droite).

Dans le spectre électromagnétique, l'imagerie thermique peut exploiter les longueurs allant de 0.1 μm dans l'ultra-violet jusqu'à 35 μm dans l'infrarouge lointain (**Figure 2**). Selon les applications et les capteurs utilisés, des gammes de longueur d'onde différentes sont exploitées. La bande privilégiée se situe entre 3 et 15 μm , d'où l'appellation d'imagerie thermique infrarouge (Leemans, 2008). Cette dernière repose sur le fait que tout objet dont la température est supérieure à 0°K ou -273,15°C, émet des rayonnements électromagnétiques dans cette partie du domaine spectral (H. Jones, 2004). Au-delà de 15 μm , les signaux ne sont plus suffisamment énergétiques que pour être efficacement mesurés par la majorité des capteurs actuels. La zone située entre 3 et 5 μm est peu utilisée en environnement non contrôlé dû à la réflexion solaire qui empêche une bonne interprétation du signal. Le domaine le plus étudié en application agricole est restreint entre 7 et 14 μm dans l'infrarouge lointain car le signal y est moins parasité par l'absorption de l'atmosphère (**Figure 3**) (Fuchs, 1990; Ishimwe et al., 2014; Leemans, 2008). Il s'agit aussi du domaine où les objets ayant une haute émissivité (0.94-0.98), comme les plantes par exemple (Fuchs, 1990), émettent la majorité de leur signal (Nanda et al., 2018).

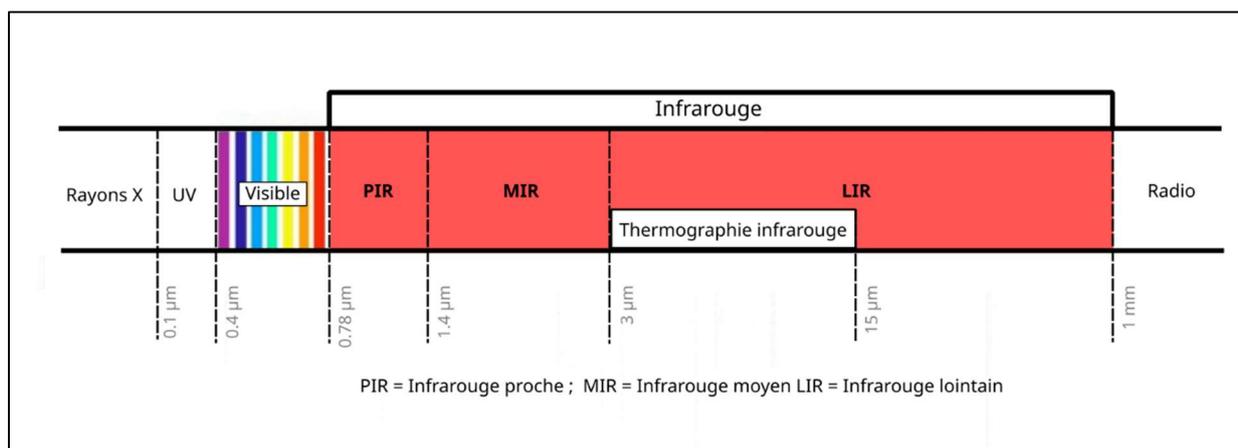


Figure 2 : Spectre électromagnétique et zone exploitée par l'imagerie thermique.

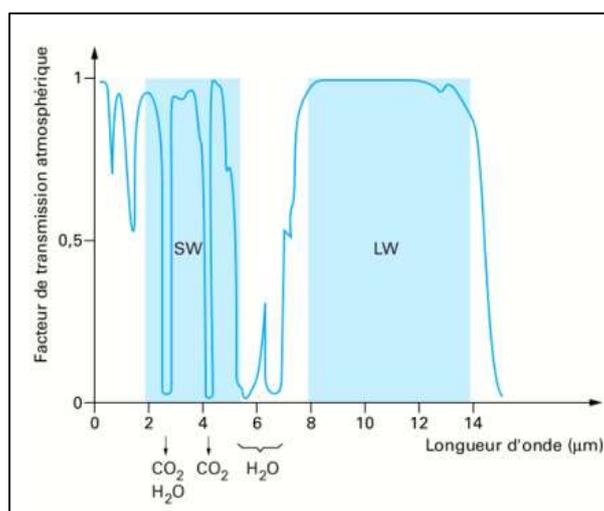


Figure 3 : Facteur de transmission de l'air en fonction de la longueur d'onde (Leemans, 2008).

Plusieurs grandes équations physiques théoriques sont à la base du principe de l'imagerie thermique. La première est la loi de la radiation par Planck. Elle décrit les émissions radiatives d'un corps noir à une certaine longueur d'onde et température. Un corps noir est un corps imaginaire capable d'absorber l'intégralité des émissions qu'il reçoit. Ce dernier émet également le maximum d'énergie à chaque longueur d'onde. Le duo Stefan-Boltzmann a, par après, modifié cette équation pour l'appliquer sur l'ensemble du domaine spectral. L'énergie totale émise par un corps noir, appelée exitance, peut ainsi être déterminée. La loi de Stefan-Boltzmann relie ainsi, via sa constante, l'exitance d'un corps noir à sa température (**Eq. 1**).

$$M_b = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \cdot d\lambda = \sigma \cdot T^4 \quad (1)$$

Où :

- M_b = Exitance du corps noir ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
- c = Vitesse de la lumière : $3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- h = Constante de Planck : $6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$
- k = Constante de Boltzmann : $1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$
- T = Température absolue du corps noir (K)
- λ = Longueur d'onde (m)
- σ = Constante de Stefan-Boltzmann : $5.67032 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

Les corps réels ne sont cependant pas des corps noirs. La température mesurée à partir de cette énergie ne renseigne pas la vraie température de l'objet. Pour chaque corps réel ou corps gris, un facteur (nommé l'émissivité) le relie à l'exitance totale d'un corps noir et permet d'obtenir sa vraie température. Il définit la capacité d'un corps à émettre des rayonnements infrarouges et s'étend de 0 à 1, 1 correspondant à la valeur pour un corps noir. En suivant ces principes, les émissions d'un corps sont d'autant plus importantes que son émissivité est haute et que sa température est importante (**Eq. 2**).

$$M = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2)$$

Où :

- M = Exitance du corps ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
- ε = Facteur d'émissivité du corps
- σ = Constante de Stefan-Boltzmann : $5.67032 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$
- T = Température de brillance (K)

Deux autres facteurs sont à prendre en compte lors du calcul de la température d'un objet. Le facteur de réflectivité (ρ) détermine la partie du rayonnement infrarouge émis par les corps à proximité et réfléchi par l'objet d'étude. Un facteur de transmissivité (τ) représente, quant à lui, la partie de rayonnement infrarouge qui traverse l'objet étudié. La transmissivité joue une part minime dans la mesure réalisée et peut être négligée. Le totale des 3 facteurs est toujours égal à 1, τ étant proche de 0 pour un corps solide (**Eq. 3**).

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1 \quad (3)$$

Où :

- ε = Facteur d'émissivité
- ρ = Facteur de réflectivité
- τ = Facteur transmissivité

Dans le cas d'une mesure par caméra, le signal reçu par les capteurs n'est pas uniquement celui émis par les objets. La caméra mesure ses propres radiations ainsi qu'une partie du rayonnement ambiant qui est réfléchi par la surface de l'objet. Il y a également les émissions dues à l'absorption et à la réémission par l'atmosphère ambiante. Tous ces signaux sont affectés par un facteur de transmissivité lorsqu'ils traversent l'atmosphère. Ce dernier est considéré comme négligeable en imagerie de proximité. La caméra est capable de mesurer sa température interne afin d'effectuer une correction sur la température des objets étudiés. Elle ne dispose cependant pas de la température des objets alentours dont le rayonnement est réfléchi sur la surface de l'objet. Si le facteur d'émissivité est différent de 1, la caméra ne mesurera pas la vraie température des objets.

Plusieurs étapes sont effectuées par la caméra afin de délivrer une image thermique (**Figure 4**). Le signal infrarouge entre par l'ouverture et est focalisé par une lentille sur une matrice focale plane (FPA) composée de capteurs. Pour une application extérieure et pour une gamme de longueur d'onde entre 8 et 14 μ m, les microbolomètres, qui sont des capteurs thermiques non refroidis, sont privilégiés. Suite à leur échauffement, une variation dans la résistance du circuit est produite. Un signal analogique sous la forme d'une différence de potentiel est amplifié, et un convertisseur le transforme en signal numérique. Ce dernier est traduit par le système en information 8 bits attribuée au pixel correspondant au sein de l'image. Pour finir, une transformation est appliquée pour obtenir la valeur de température à partir de la valeur numérique du pixel. La variation de température dans l'intégralité de l'image est ainsi répartie sur 256 valeurs de pixels. La valeur 0 représente la température la plus froide et 255 la plus chaude.

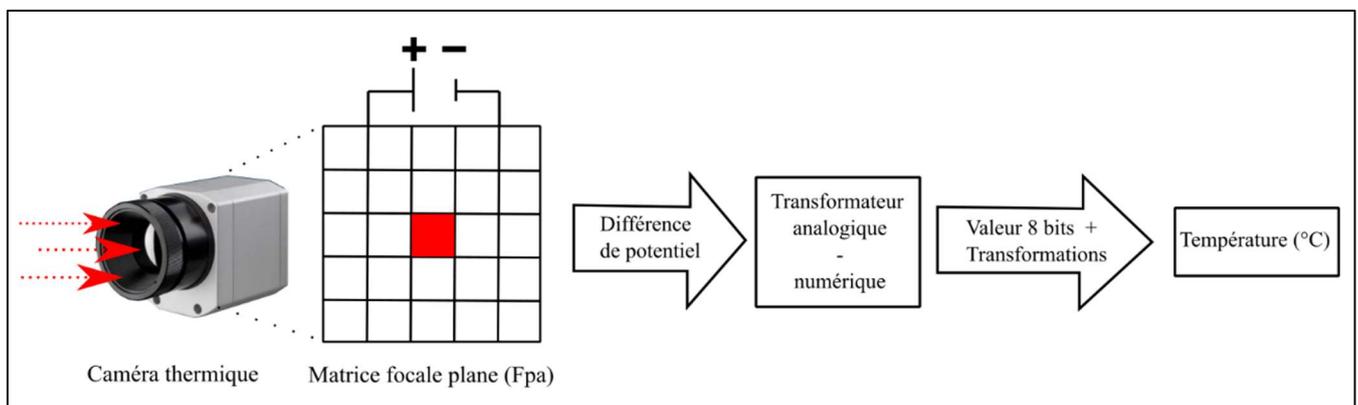


Figure 4: Traitement du rayonnement infrarouge en image thermique par la caméra.

2.2. Le stress hydrique

Une plante est dite en état de stress hydrique lorsque cette dernière transpire davantage d'eau qu'elle n'en récupère. Pour limiter cette perte, la plante ferme ses stomates par turgescence. Ceci implique la notion de conductance stomatique qui diminue dans ce cas (Djekoun & Planchon, 1992; Gonzalez-Dugo et al., 2012). Ce phénomène peut avoir des conséquences importantes pour la plante en cas de durée prolongée (Simonneau et al. 2014). La réduction des échanges gazeux avec l'extérieur mène alors à une diminution de la photosynthèse et de la croissance de la plante (Fahad et al., 2017; H. G. Jones, 2013). Dans des cas plus extrêmes, des embolies peuvent se former dans le xylème des feuilles et provoquer leur dessiccation (Johnson et al., 2018). Dans ces conditions, la fermeture des stomates cause une hausse de la température des feuilles (Martin, 2014). Ce phénomène est expliqué par la diminution de la transpiration qui a pour conséquence de limiter la dispersion de chaleur sous forme d'énergie latente. La plante ne pouvant réguler sa température, ses tissus s'échauffent et peuvent s'en retrouver endommagés (H. G. Jones, 2013). C'est cet aspect de la physiologie de la plante qui est utilisé pour évaluer le taux de stress par imagerie thermique. La température a été mise en lien à plusieurs reprises avec la conductance stomatique pour déterminer des indicateurs capables de quantifier le stress hydrique subi (Cohen et al., 2005). Les effets d'un stress hydrique sur une grande culture peuvent affecter le rendement final de l'agriculteur pour certains génotypes de plantes (Debaeke & Bertrand, 2008; Gardner et al., 1981; Saleem, 2003).

2.3. Les biostimulants

Plusieurs définitions d'un biostimulant existent dans la littérature. Selon du Jardin (2015), un biostimulant est « une substance ou un microorganisme appliqué à la plante dans le but d'améliorer l'efficacité de la nutrition, la tolérance aux stress abiotiques, la qualité de la culture, indépendamment des nutriments qu'il contient. Par extension, les biostimulants désignent aussi les formulations commerciales contenant des mélanges de substances et/ ou microorganismes. La commission européenne identifie quant à elle les biostimulants comme des « fertilisants qui stimulent le processus de nutrition des végétaux indépendamment des éléments nutritifs qu'ils contiennent, dans le seul but d'améliorer une ou plusieurs caractéristiques suivantes des végétaux ou de leur rhizosphère : l'efficacité de l'utilisation des éléments nutritifs, la tolérance aux stress abiotiques, les caractéristiques qualitatives et la disponibilité des éléments nutritifs confinés dans le sol et la rhizosphère ». En termes de stress hydrique, plusieurs éléments ont mis en évidence des effets positifs suite à une application de biostimulants (Yakhin et al., 2017). Certaines substances humiques et extraits d'algues sont capables d'améliorer la structure du sol (stabilité des agrégats) et d'ainsi augmenter la disponibilité en eau pour les plantes (Halpern et al., 2015). D'autres biostimulants protègent les propriétés physiologiques des végétaux en augmentant leur résilience (Francesca et al., 2020; Silletti et al., 2021) ou leur récupération face à un stress hydrique (do Rosário Rosa et al., 2021).

3. État de l'art

3.1. Domaines d'application

L'imagerie thermique n'a pas été utilisée uniquement dans le milieu agricole. Elle a déjà fait ses preuves en médecine où elle permet d'évaluer rapidement la température d'un patient ou d'une inflammation sur une échelle ciblée du corps humain ou animal (Fauquet, 2020). Elle est également utilisée en électronique pour trouver des courts-circuits ou encore en bâtiment pour évaluer les déperditions de chaleur (Datcu, 2002) et la résistance des matériaux (Boccardi et al., 2015; Bodnar, 2009).

3.2. Applications agricoles

En agriculture, différentes applications ont déjà été étudiées (Ishimwe et al., 2014; Vadivambal & Jayas, 2011). Ces dernières se basent sur la température intrinsèque de certaines parties de la plante, ainsi que sur la variation de cette même température. L'imagerie thermique peut être utilisée pour repérer des maladies fongiques (Chelladurai et al., 2010; Francesconi et al., 2021; Han & Cointault, 2013; Stoll et al., 2008), ou encore des infestations par des ravageurs (Manickavasagan et al., 2008). Il est possible de réaliser de la détection d'objets tels que des fruits en vue de mettre en place un système de récolte automatique (Bulanon et al., 2008). Cet outil est aussi capable de déceler de potentielles dégradations sur des fruits tels que des pommes ou des citrons (Baranowski et al., 2012; Varith et al., 2003). Lorsque cette technique est couplée à d'autres types de caméras, des rendements peuvent être estimés. C'est ce que Stajnko et al. (2004) a tenté d'accomplir dans le cas de la croissance de pommes. D'autres études se sont quant à elles penchées sur le comptage du nombre d'épis pour du froment (Cointault et al., 2008; Fernandez-Gallego et al., 2019). Dandrifosse et al. (2022) a été plus loin en estimant la densité d'épis par m². Pour finir, l'imagerie thermique a, dans différents contextes, été utilisée dans le but d'évaluer le niveau de stress hydrique chez les plantes. Cette application est étudiée afin de mettre en place une irrigation dite de précision (Bellvert et al., 2016; Clawson & Blad, 1982; Meron et al., 2010; Zhou et al., 2021). Ceci permettrait, à terme, de déboucher sur une meilleure utilisation de l'eau et de diminuer les dégâts de ce type de stress sur les cultures.

3.3. Quantification du stress hydrique

3.3.1. Expérimentations

Plusieurs articles et thèses ont essayé de quantifier le niveau de stress hydrique d'une culture. Ils diffèrent entre eux sur plusieurs points. La majorité des expérimentations utilisent désormais des caméras thermiques, mais dans certains cas, ce sont des thermomètres infrarouges qui ont été employés (Andrews et al., 1992; Apolo-Apolo et al., 2020; Saiz-Rubio et al., 2021). Certaines expérimentations ont été réalisées en serre dans un environnement contrôlé (Iseki & Olaleye, 2020; H. G. Jones, 1999; Khorsandi et al., 2018) ou en extérieur sous des conditions variables. La réponse physiologique de nombreuses grandes cultures telles que le froment (Jackson et al., 1977; Zia et al., 2012), la pomme de terre (Kotchi, 2004) ou le maïs (Khorsandi et al., 2020) a été étudiée. Il en va de même pour les arbres de vergers telles que les vignes (Baluja et al., 2012; García-Tejero et al., 2016; Gutiérrez et al., 2021; Sepúlveda-Reyes et al., 2016) oliviers (Shoa et al., 2021), amandiers (García-Tejero, Rubio, et al., 2018; Gonzalez-Dugo et al., 2012) ou autres arbres fruitiers (Andrews et al., 1992; Lima et al., 2016). Plusieurs voies ont été explorées afin d'acquérir des images thermiques. Selon l'échelle, ce sont des plateformes mobiles (Saiz-Rubio et al., 2021) ou des drones qui ont été employés (Baluja et al., 2012; Das, Chapman, et al., 2021; Das, Christopher, et al., 2021; Sepúlveda-Reyes et al., 2016).

3.3.2. Indicateurs

La température de canopée de la culture (T_c) est l'indicateur principal utilisé pour déterminer la présence d'un stress hydrique. En conditions expérimentales, ce dernier est très variable et dû aux changements chroniques des variables environnementales. Les premiers à avoir essayé de prendre en compte ces variations était Idso et al. (1977) et Jackson et al. (1977) avec la différence entre T_c et la température de l'air (dépression de la température de canopée : CTD). Le CWSI ou indice de stress hydrique des cultures (Eq. 4), a été introduit par après pour également prendre en compte la variation de rayonnement net, d'humidité relative ou encore de vitesse du vent (Idso et al., 1981; Jackson et al., 1981, 1988; H. G. Jones, 1999; Leinonen & Jones, 2004). Pour cet indice, deux limites déterminent les états extrêmes pouvant être atteints par la plante en conditions réelles. La température sèche (T_{sec} = limite supérieure) représente un état de stress maximum tandis que la température humide (T_{humide} = limite inférieure) simule une plante en absence de stress hydrique. Ces deux limites vont évoluer avec la température de la canopée et permettre une normalisation de la mesure du stress par rapport aux variations environnementales. Le CWSI ne renseigne ainsi que le statut hydrique des plantes étudiées. L'indice de conductance stomatique ou IG (Eq. 5), a été mis en évidence par H. G. Jones (1999) afin de relier la température de la canopée à sa conductance stomatique. Ce sont les deux indices les plus utilisés dont il existe plusieurs variantes selon la méthode de

calcul utilisée. Deux méthodes principales sont employées afin d'obtenir T_{sec} et T_{humide} . Les approches théoriques et empiriques nécessitent de mesurer plusieurs variables pouvant intervenir sur T_c afin de les approximer. Le procédé par le système de référence consiste à mesurer ces températures sur un élément dans l'image.

$$CWSI = \frac{T_c - T_{humid}}{T_{sec} - T_{humide}} \quad (4)$$

$$IG = \frac{T_{sec} - T_c}{T_c - T_{humide}} \quad (5)$$

Où :

T_c	=	Température de la canopée (°C)
T_{humide}	=	Température humide (°C)
T_{sec}	=	Température sèche (°C)

3.3.3. Approche analytique et empirique

L'approche analytique permet de définir les limites sèches et humides par l'intermédiaire de variables environnementales et du bilan d'énergie établi par Penman-Monteith. Des variantes existent par rapport aux équations établies par Jackson et al. (1981) selon les conditions expérimentales (Andrews et al., 1992; Kar & Kumar, 2010; Leinonen et al., 2006). Cette méthode nécessite, en plus de la température de la canopée, les données de température de l'air (°C), d'humidité relative (%), de rayonnement net (W/m^2) et de vitesse du vent (m/s). Bien qu'ayant déjà fait ses preuves dans plusieurs expérimentations, cette méthode réalise des approximations qui peuvent différer de la réalité. Elle nécessite une grande quantité de données qui doivent être prises avec une fréquence courte dans le cas de l'imagerie pour se rapprocher du moment de l'acquisition. Les erreurs commises proviennent généralement d'une mesure incorrecte des variables environnementales (Jackson et al., 1981; Maes & Steppe, 2012; Prashar & Jones, 2014).

L'approche empirique est semblable à la méthode analytique mais utilise uniquement la température de l'air (°C) et le déficit de pression de vapeur (kPa) calculé à partir de l'humidité relative (%) (Idso et al., 1981). A partir de ces deux variables et de constantes définies selon l'état de développement de la culture, les limites T_{sec} et T_{humide} peuvent être obtenues (Prashar & Jones, 2014). Il a été démontré que ces constantes varient avec la vitesse du vent et ne sont utilisables que dans des conditions stables (Gardner et al., 1992). Cette approche commet également des erreurs dans le cas d'une canopée ouverte (Moran, 2004).

3.3.4. Systèmes de référence

La méthode du système de référence consiste à mesurer directement la température d'un objet qui imite une culture en stress hydrique nul ou maximum. Elle permet de s'affranchir complètement de l'usage des données environnementales (point 2.2.3). Pour obtenir ces températures, la première démarche mise en place a été la récolte de données sur des cultures sous conditions hydriques différentes (Bajwa & Vories, 2007; Clawson et al., 1989; Elsayed et al., 2017; Idso et al., 1981; H. Jones et al., 2002; H. G. Jones, 1999). Ce procédé est complexe à mettre en place mais est encore utilisé avec les drones qui bénéficient d'une vue d'ensemble de toutes les cultures. Avec l'émergence des caméras, un système d'une ou plusieurs références humides et sèches placées directement dans l'image, s'est ensuite démarqué. Selon la méthode d'acquisition et les conditions expérimentales, des prototypes différents ont été mis en place.

Pour l'imagerie de proximité, la plus commune est l'utilisation de matériaux organiques. Une feuille vaporisée d'eau fait office de référence humide tandis qu'une feuille enrobée de vaseline stoppe la transpiration pour représenter la référence sèche (Costa et al., 2013; Leinonen & Jones, 2004; Stoll & Jones, 2007). Ce procédé est directement appliqué sur les feuilles en culture (Padhi et al., 2012) ou sur les mêmes feuilles qui sont introduites dans l'image à chaque acquisition (**Figure 5**). Ce procédé présente des difficultés à conserver une feuille humide lors de l'expérimentation et tue les feuilles dites « sèches ». Une application de détergent avait été testée par Stoll & Jones (2007) afin de conserver la feuille humide plus longtemps.

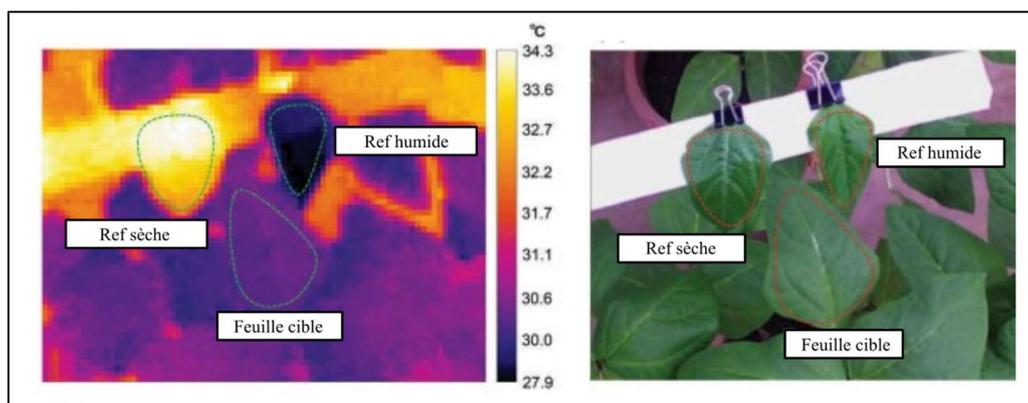


Figure 5 : Système de référence organique de Iseki & Olaleye. (2020).

Pour s'affranchir de ces références biologiques, des références dites « artificielles » ont été développées. Un des premiers articles est celui de H. G. Jones (1999) qui a testé différents matériaux alternatifs tels que du papier filtre teinté de vert ou de l'Opsite (compresse stérile). Cette démarche a aussi été reprise par Poirier-Pocovi et al. (2020) qui ont testé des papiers de teintes de verts différentes afin de simuler au mieux les propriétés des feuilles. La difficulté récurrente avec ces matériaux était de pouvoir les conserver à un

certain taux d'humidité lors de l'expérimentation. Plusieurs dispositifs utilisant des matériaux verts spongieux ont également vu le jour. Parmi ceux-ci, certains sont munis d'un réservoir où trempe le matériau utilisé (**Figure 6**). La forme la plus commune dans ces systèmes est une surface plane (Khorsandi et al., 2018; Pradawet et al., 2021; Shoa et al., 2021). Maes et al. (2016) ont opté pour la forme d'une feuille qu'ils ont répliquée plusieurs fois pour imiter les effets d'ombre et d'ensoleillement présents selon leurs angles d'exposition (**Figure 6**). H. G. Jones et al. (2018) avaient déjà essayé de prendre en compte cet effet avec l'utilisation d'une demi-sphère. Cette méthode a servi à Apolo-Apolo et al. (2020) pour créer leur propre référence humide. Il s'agit d'une demi-sphère en cellulose de couleur verte au milieu d'un réservoir d'eau. Un dernier système plus particulier a été employé par Pou et al. (2014), Zhou et al. (2021) ou encore Gutiérrez et al. (2021). Il s'agit d'un boîtier contenant une tige de coton noir et une réglette de platine. Le morceau de coton noir, relié à un réservoir d'eau, fait office de référence humide tandis qu'une réglette de platine représente la référence sèche.

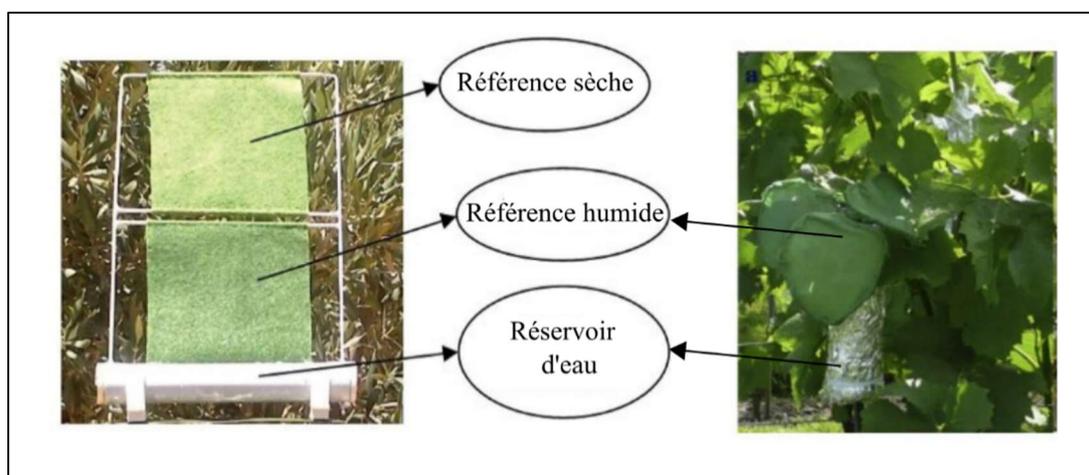


Figure 6 : Système de référence établi par Shoa et al. (2021) (à gauche) et Maes et al. (2016) (à droite).

En grande culture, avec l'utilisation des drones, la référence nécessite des surfaces plus importantes. Des WARS (« wet artificial reference system ») ou larges références artificielles humides ont été mises en place dans plusieurs articles. Ceci consiste à garder un linge humide en le faisant flotter sur du polystyrène dans une caisse remplie d'eau (Cohen et al., 2005; Meron et al., 2010). Le polystyrène a été privilégié comme référence humide dû à sa faible émissivité. En tant que composé noir, des bâches en plastique ont parfois été choisies pour représenter la référence sèche (Labbé et al., 2012; Prashar & Jones, 2014). Dans certaines expérimentations, seule une référence humide était mise en place. La référence sèche était estimée à partir de la température de l'air additionnée d'un certain nombre de degrés Celsius. (Cohen et al., 2005; García-Tejero, Ortega-Arévalo, et al., 2018; García-Tejero, Rubio, et al., 2018; Meron et al., 2010). Ces valeurs sont définies pour certaines cultures et conditions environnementales mais ne sont pas extrapolables à toutes les conditions.

4. Objectifs

Assez peu d'études se sont tournées vers le froment pour évaluer l'état de stress hydrique (Zia et al. 2012, Elsayed et al. 2017). Dans ces dernières, seuls des drones ont été utilisés pour réaliser des acquisitions de données. En ce qui concerne les systèmes de référence, aucun n'a été adapté et testé avec de l'imagerie de proximité en vue zénithale. Une nouvelle approche expérimentale sera mise en place et contiendra plusieurs objectifs. Un système adapté aux conditions expérimentales sera imaginé et étudié. Ce dernier comprendra une référence sèche ainsi qu'une référence humide. Ces références devront être intégrées dans le processus automatique de traitement de données et leur température sera extraite de façon automatique à l'aide d'un algorithme. Cette détection sera également évaluée. Ce système de référence ainsi que d'autres potentiels prototypes seront testés en conditions de terrain. Pour finir, une application du système retenu sera réalisée dans des conditions de stress hydrique sur la parcelle expérimentale de la société Redebel. Il s'agit d'une entreprise réalisant des recherches sur des biocides et des produits phytopharmaceutiques tels que des biostimulants. Le stress hydrique sera quantifié à l'aide de différents indices calculés sur base de la température de la canopée et de la température des deux références. Le but de cette expérimentation sera de définir si le système mis en place est capable de déterminer une différence de stress entre plusieurs applications de biostimulants.

B. Matériels et méthodes

1. Système d'acquisition

1.1. Le système multi-capteur

Des caméras ont été fixées sur un montant afin de conserver la même position les unes par rapport aux autres. Ce montant a été installé sur un porte-à-faux offrant une vue zénithale de la culture étudiée. Trois types de caméra différents renseignant des informations complémentaires ont été utilisés (**Figure 7**).

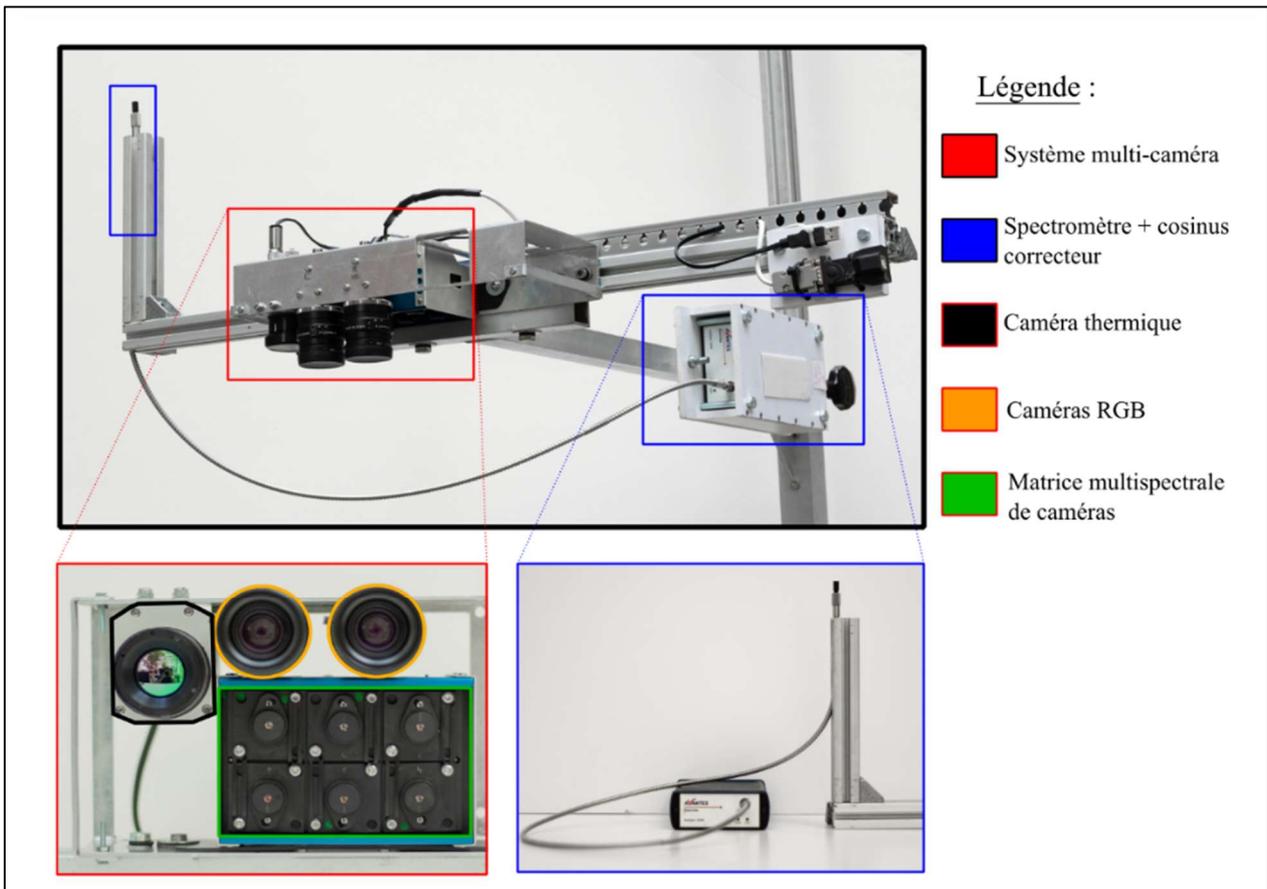


Figure 7 : Agencement du système multi-capteur et du spectromètre équipé de son correcteur de cosinus.

1.1.1. La caméra thermique

La caméra thermique, outil principal de l'étude, est une Optris PI 640 munie d'une lentille standard de 33° (Optris GmbH, Berlin, Allemagne) (**Figure 8**). Elle est équipée d'une matrice focale plane non-refroidie de 640×480 pixels. Le domaine spectral exploité était situé entre 7,5 et 13 μm , soit dans l'infrarouge lointain (3-15 μm). Les mesures ont été réalisées à température ambiante et ont respecté les conditions d'utilisation (**Tableau 1**). L'image de sortie renseignait une profondeur de couleur de 8 bits en 256 niveaux de gris (i.e. le blanc correspond à une valeur de 255 et le noir à 0). L'émissivité était conservée à une valeur de 1.

Tableau 1 : Informations générales d'une Optris PI 640

Informations Optris PI 640	
Domaine spectral	7,5 - 13 [μm]
Plage de température	-20 - 100 [$^{\circ}\text{C}$]
Optiques	33 $^{\circ}$ ×25 $^{\circ}$
Distance focale	18.7 [mm]
Sensibilité thermique	75 [mK]
Exactitude	+/-2 [$^{\circ}\text{C}$] ou 2 [%]
Température ambiante	0 - 50 [$^{\circ}\text{C}$]
Humidité relative	20 - 80 [%]



Figure 8 : Caméra Optris PI640

1.1.2. Les caméras couleurs

Deux caméras couleurs GO-5000-USB (JAI A/S, Copenhagen, Danemark) dotées d'un capteur 2560 × 2048 CMOS et d'un objectif LM16HC (Kowa GmbH, Düsseldorf, Allemagne) ont été employées (**Figure 9**). Des images dotées de 8 bits de profondeur de couleur de type RVB pouvaient en être tirées. Celles-ci étaient constituées de trois canaux de 256 nuances de rouge, de vert ou de bleu. Ces caméras ont été intégrées dans un système de vision stéréoscopique avec lequel la hauteur du froment a pu être déterminée (Dandrifosse et al. 2020). Les informations relatives aux caméras sont répertoriées dans le **Tableau 2**.

Tableau 2 : Informations générales d'une GO-5000-USB.

Informations GO-5000-USB	
Optiques	44,3 $^{\circ}$ ×33,6 $^{\circ}$
Distance focale	16 [mm]
Ouverture	f/4.0
Température ambiante	-5 - 45 [$^{\circ}\text{C}$]
Humidité relative	20 - 80 [%]



Figure 9 : Caméra GO-5000-USB et son objectif LM16HC.

1.1.3. La matrice multispectrale de caméras

Un réseau multispectral Micro-MCA de caméras (Tetracam Inc., Gainesville, FL, Etats-Unis) a été utilisé (**Figure 10**). Ce système regroupait 6 caméras monochromes équipées d'un capteur CMOS avec 1280 x 1024 pixels. Les filtres optiques ont été centrés à 490, 550, 680, 720, 800 et 900 nm. Une bande de 10 nm de large était mesurée autour de ces valeurs à l'exception de la dernière où une bande de 20 nm était sondée. Les informations relatives au réseau sont répertoriées dans le **Tableau 3**.

Tableau 3 : Informations générales du réseau multispectral de caméras.

Réseau multispectral Micro-MCA de caméras	
Optiques	38,26°×30,97°
Distance focale	9.6[mm]
Ouverture	f/3.2
Température ambiante	0 - 40 [C°]
Humidité relative	> 85 [%]



Figure 10 : Réseau multispectral Micro-MCA de caméras.

1.1.4. Le spectromètre

Le dernier instrument était un spectromètre AvaSpec-ULS2048 (**Figure 11**) équipé d'un correcteur de cosinus (Avantes, Apeldoorn, Pays-Bas). Une fibre optique y était reliée et captait avec une angle de vue de 180° le rayonnement solaire incident à l'aide du correcteur. Le spectromètre traduisait le signal reçu en un spectre étalé de 300 à 950 nm. L'information sous le spectre est intégrée pour obtenir le rayonnement solaire incident (W/m²). Son rapport signal/bruit est de 200 :1.



Figure 11 : AvaSpec-ULS204.

1.2. La structure

Une structure en profilé Bosch a été utilisée pour maintenir les caméras en position lors des acquisitions. Cette armature était composée de deux parties. La première était une table pour stabiliser le système. La deuxième était un échafaud emboîtable sur un des bords de la partie « table ». La hauteur du froment évoluant au cours de la saison, il en allait de même pour la distance caméras/objets étudiés. Cet échafaud a permis d'adapter la hauteur des caméras par rapport à la hauteur de la canopée. La hauteur maximale atteignable par les caméras était de 2,2 m depuis le sol. Une distance caméras/froment d'1,5 m a été conservée pour chaque session d'acquisition. Il s'agit d'un compromis entre les limitations de la taille du système, et d'une hauteur adaptée à la réalisation du processus d'alignement des images (point 4.1.1.). Trois tendeurs attachés au porte-à-faux ont amélioré la stabilité et ont permis de travailler dans des conditions venteuses. Un bras construit en profilé Bosch plaçait les références au niveau de la canopée. Celui-ci était fixé au niveau du pied de la table avec lequel sa hauteur était adaptée. Les références étaient emboîtables sur des protubérances en profilé Bosch présentes le long du bras.

1.3. Système de centralisation des capteurs

Un boîtier centralisait l'alimentation ainsi que la prise de mesure des différentes caméras. Il était alimenté par l'intermédiaire d'une batterie 12 volts et d'une batterie 20 volts. Il était relié à un PC de terrain ayant une interface de contrôle en Python. Un visuel du point de vue de la caméra thermique, des caméras couleurs ainsi que le spectre du rayonnement solaire incident y étaient disponibles.

1.4. Conditions d'utilisation

Ce système a été construit pour réaliser des opérations de phénotypage et extraire différents marqueurs physiologiques et morphologiques sur des cultures de froment d'hiver (**Figure 12**). Afin d'être utilisé dans de bonnes conditions et d'éviter d'endommager le matériel, certaines conditions d'utilisation ont dû être respectées. Les caméras n'étant pas étanches à l'eau, un événement pluvieux empêchait leur utilisation. Des conditions trop venteuses étaient à proscrire, la stabilité des caméras pouvant difficilement être assurée. Le mouvement des végétaux perturbait également la récolte des données par les capteurs. Pour que la structure n'introduise aucune ombre dans la zone étudiée, l'échafaud devait toujours être tourné vers le soleil.

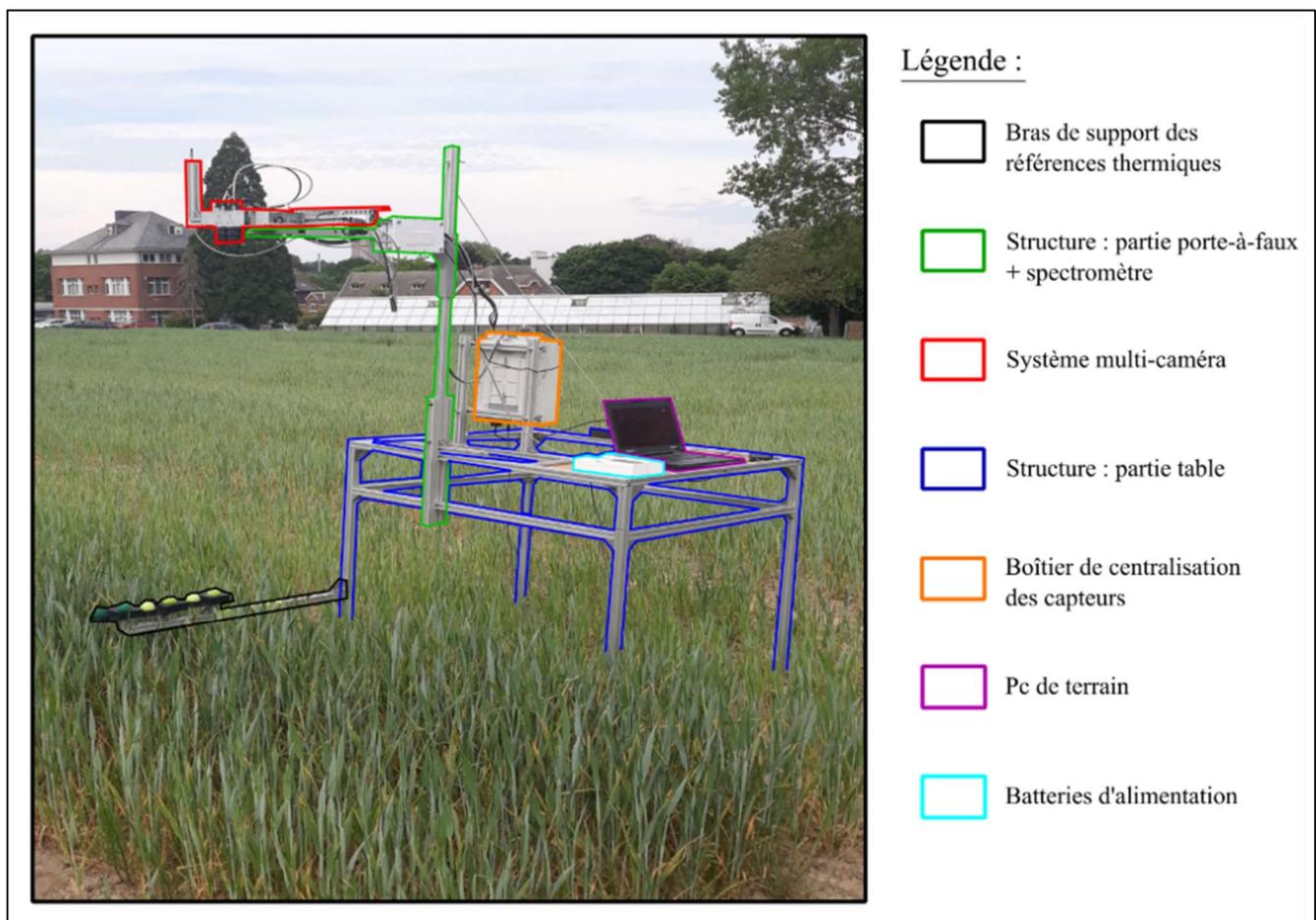


Figure 12 : Système d'acquisition.

2. Création de la référence

2.1. Système de référence

Pour quantifier le stress hydrique, une température humide et une température sèche ont dû être mesurées. Dans ce but, un système artificiel avec une référence sèche (RS) et une référence humide (RH) a été sélectionné. Un matériau non végétal devait à la fois être maintenu humide et sec tout au long des expérimentations. Le design du système de référence a été inspiré de plusieurs études. Le prototype devant conserver le matériau humide, l'implantation d'un réservoir dans un support a été réalisée (Apolo-Apolo et al., 2020; Maes et al., 2016; Shoa et al., 2020, 2021). En suivant l'exemple de H. G. Jones et al. (2018) et Apolo-Apolo et al. (2020), une forme de demi-sphère a été utilisée afin de mimer l'effet d'ombrage présent dans la canopée. De nombreux articles mentionnaient l'usage d'un tissu de couleur verte capable de conduire et contenir de l'eau (Apolo-Apolo et al., 2020; Khorsandi et al., 2018; Maes et al., 2016; Pradawet et al., 2022; Shoa et al., 2020, 2021). Un système de référence, en 2 parties, adapté aux conditions expérimentales a été imaginé.

2.2. Le support

Le support, composé de deux parties, a été créé à l'aide d'une imprimante 3D et du logiciel « SOLIDWORKS 2021 ». La première partie était un bac de 9 cm conçu pour accueillir de l'eau avec, en son centre, une base cylindrique pour maintenir un tissu hors de l'eau. Un couvercle lui a été ajouté pour le rendre hermétique et permettre une recharge en eau. La seconde partie était composée du support cylindrique qui soutenait la référence sèche. Cette dernière n'était pas accolée au réservoir afin de protéger le tissu sec de toute fuite d'eau potentielle. Deux modèles différents ont été testés (**Figure 13**). Le modèle A possédait une demi-sphère surplombant les parties cylindriques. Le matériau spongieux reposait sur cette demi-sphère de 2 cm de rayon pour garder sa forme. Le modèle B ne disposait que de la partie cylindrique comme soutien. Le matériau maintenait sa forme hémisphérique uniquement grâce aux tensions internes résiduelles après séchage. Le matériau utilisé était de l'acide polylactique (PLA) de couleur noire. C'est un polymère biodégradable issu de matières végétales telles que de l'amidon de maïs. Il peut se dégrader dans des conditions de forte humidité ou d'ensoleillement intense. Pour pallier à ces désagréments, un remplissage à 100% de la structure imprimée a été réalisé. Le support était ainsi plus résistant et présentait une étanchéité améliorée.

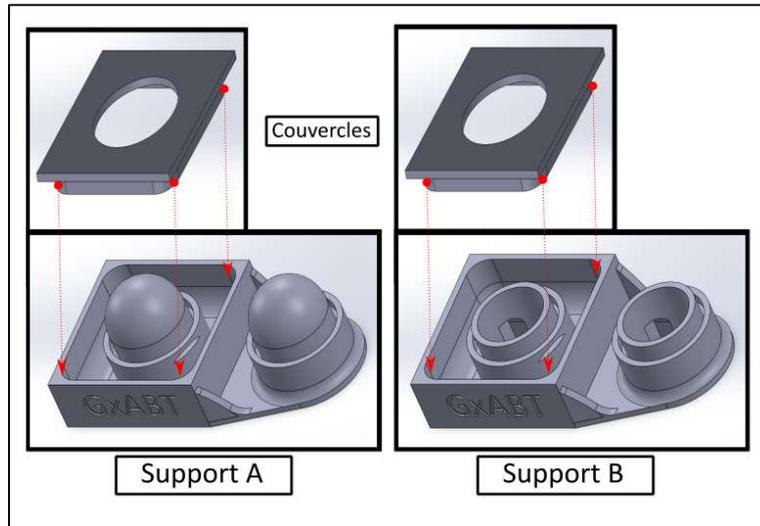


Figure 13 : Schéma (Solidworks 2021) des supports de référence.

2.3. Le tissu de référence

Le tissu de référence choisi doit répondre à plusieurs caractéristiques clés :

- Il doit rester humide de façon homogène tout au long de l'expérimentation.
- Il doit être suffisamment modelable pour réaliser une demi-sphère et conserver cette forme au cours de l'expérimentation
- Il doit être durable afin d'utiliser le même morceau de tissu lors de plusieurs mois d'échantillonnage
- Le même tissu doit être utilisé pour la référence sèche ainsi que la référence humide.

Des tissus spongieux issus de la grande distribution ont été testés et comparés dans la **Figure 14**.

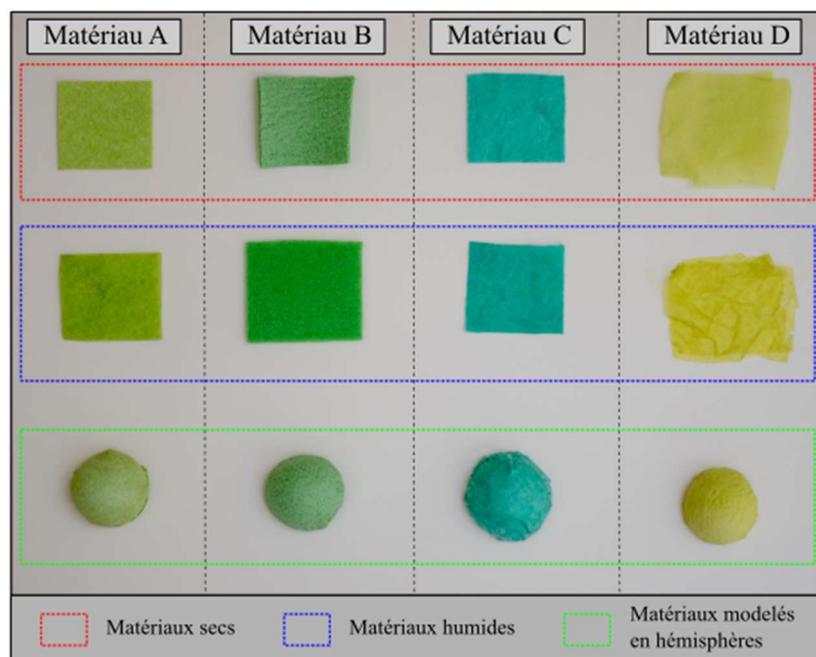


Figure 14 : Représentation des matériaux de référence. Comparaison des matériaux bruts dans leur état sec et humide. La forme finale en demi-sphère est celle utilisée et étudiée lors des expérimentations.

- Le matériau A (Spongidou soft ,Vileda, Brico) : Il s’agissait d’un tissu compostable constitué de 70% de cellulose et de 30% de coton. Il répondait à toutes les exigences citées précédemment. Son coloris variait peu entre sa forme humide et sèche mais était différent de celui du froment.
- Le matériau B (Carrés Vaisselle, Multy, Action) : Ce matériau biodégradable était composé à 100% de viscose. Le viscose est une matière chimique artificielle, obtenue à partir de cellulose de végétaux comme le coton ou le bambou. Comparé aux autres matériaux, il stockait l’eau avec le plus d’efficacité. Ses désavantages étaient sa forte rétraction après séchage, ainsi que sa grande épaisseur qui le rendait plus difficilement modelable. Le matériau ne pouvait pas être désépaissi sans détérioration. Une différence de coloris plus importante entre son état humide et sec a été notée.
- Le matériau C (Multiquattro, Vileda, Action) : Il était composé de 50% de viscose et de 50% d’un polymère synthétique, le polyester. Il présentait le coloris le plus proche de celui des feuilles de froment avant sénescence. Son désavantage était sa difficulté à être sculpté en une demi-sphère.
- Le matériau D est issu d’une serviette en papier (Action) composée à 100% de cellulose. La méthode décrite par Apolo-Apolo et al. (2020) a été suivie afin de le modeler en hémisphère. Ce matériau était moins durable que les autres et avait tendance à s’effiloche une fois humide. Le coloris utilisé présentait une couleur trop claire comparé au froment.

Pour former un hémisphère, un carré de tissu était comprimé entre deux autres hémisphères. Une fois sec, le tissu conservait sa forme même après réhumidification. Le matériau excédent était découpé pour la RS tandis qu’il était utilisé comme une mèche pour absorber l’eau du réservoir dans le cas de la RH. Le matériau répondant le mieux aux exigences était le matériau A. Pour pallier à son coloris trop clair, plusieurs prototypes colorés ont été testés (**Figure 15**).

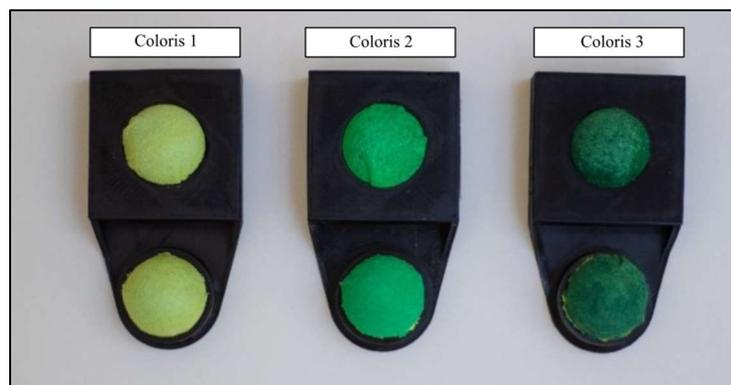


Figure 15 : Différents coloris du matériau A sur le support A (MA-SA).

Pour faciliter l’appellation des différents systèmes de référence, une nouvelle dénomination a été instaurée. Chaque système a été nommé « M + lettre du matériau – S + lettre du support. Le matériau B sur le support A a été nommé le système MB-SA. Pour le dispositif MA-SA, le numéro du coloris a été ajouté (ex : MA-SA-C1).

3. Acquisition de données

3.1. Séries temporelles

Dans le but de comprendre la réponse de la caméra thermique aux changements environnementaux, des séries temporelles d'une culture de froment et du système de référence ont été réalisées. Les paramètres d'influence principaux étaient la vitesse du vent, la température ambiante, l'humidité relative et le rayonnement solaire incident. Des images du système de référence ont été prises à l'aide du système d'acquisition à intervalle régulier. Une série de 3 images a été prise à des fréquences variables. Ces séries temporelles différaient les unes des autres selon plusieurs paramètres (**Tableau 4**) :

- 1) Le lieu d'acquisition : Deux localisations ont été utilisées. Il s'agit de la parcelle du Centenaire à Gembloux en Belgique (50° 56' 31''N et 4° 69' 86'' E). La deuxième est une parcelle de froment située à Lonzée en Belgique (50° 55' 15''N et 4° 74' 62''E). Sa particularité était la présence d'une station ICOS en son milieu. Cette station mesurait de nombreuses variables environnementales dont les paramètres d'influence.
- 2) La durée, la période et la fréquence : Plusieurs périodes de la journée ont été testées entre les différentes séries temporelles. Leur durée varie selon les conditions environnementales. Deux fréquences de prise de mesures ont été étudiées : 15 et 5 min.
- 3) Les matériaux de référence : Tous les matériaux de référence présentés précédemment ont été suivis lors d'une série temporelle. Afin de garder un point de comparaison lors de chaque série, le matériau A sur le support A apparaît dans chacune d'elles.

Tableau 4 : Modalités des séries temporelles réalisées.

DATE	PARCELLE	DUREE	FREQUENCE	MATERIAUX
12/05/2022	Centenaire	9h00-17h00	3 images /15 min	MA-SB-C1
19/05/2022	Centenaire	10h30-12h40	3 images /5 min	MA-SA-C1 MA-SB-C1 MA-SA-C3
25/05/2022	Centenaire	9h00-11h30	3 images /5 min	MA-SA-C1 MA-SB-C1 MA-SA-C3
31/05/2022	Centenaire	12h00-14h30	3 images /5 min	MA-SA-C1 MA-SC MA-SD
29/06/2022	Lonzée (ICOS)	10h30-14h00	3 images /5 min	MA-SA-C1 MA-SB-C1 MA-SA-C2 MA-SA-C3 MA-SB-C3

3.2. Redebel

Une application du système étudié a été mise en place en adéquation avec une recherche menée au sein de l'entreprise Redebel. Cette société a pour objectif d'aider d'autres entreprises à développer, tester et obtenir l'enregistrement de leurs produits phytopharmaceutiques et de leurs biocides. Un de leurs projets actuels était la mise en place de techniques et de protocoles d'étude de l'efficacité de produits biostimulants en conditions contrôlées et en champ. Lors de cette étude, des cultures de froment ont été placées en état de stress hydrique artificiel. C'est-à-dire que les plantations ont volontairement été soumises à des conditions déficitaires en eau. Un plan expérimental a été établi par Redebel dans le cadre de leurs recherches pour l'année 2021-2022 (**Figure 16**). La parcelle est située à Saint-Amand en Belgique (50° 51' 65''N, 4° 50' 62''). Tous les blocs ont été placés sous un même régime hydrique. Cette étude était menée sous des conditions rigoureuses, soit 25% d'irrigation. Ce pourcentage a été calculé par rapport à l'année ayant enregistré le plus de précipitations sur les 10 années précédentes. La parcelle était agencée en 4 blocs expérimentaux : A, B, C et D. Chaque bloc contenait 5 micro-parcelles randomisées d'une surface de 6,25 m². Ces dernières correspondaient à 4 applications de biostimulant différentes ainsi qu'à un témoin non traité.

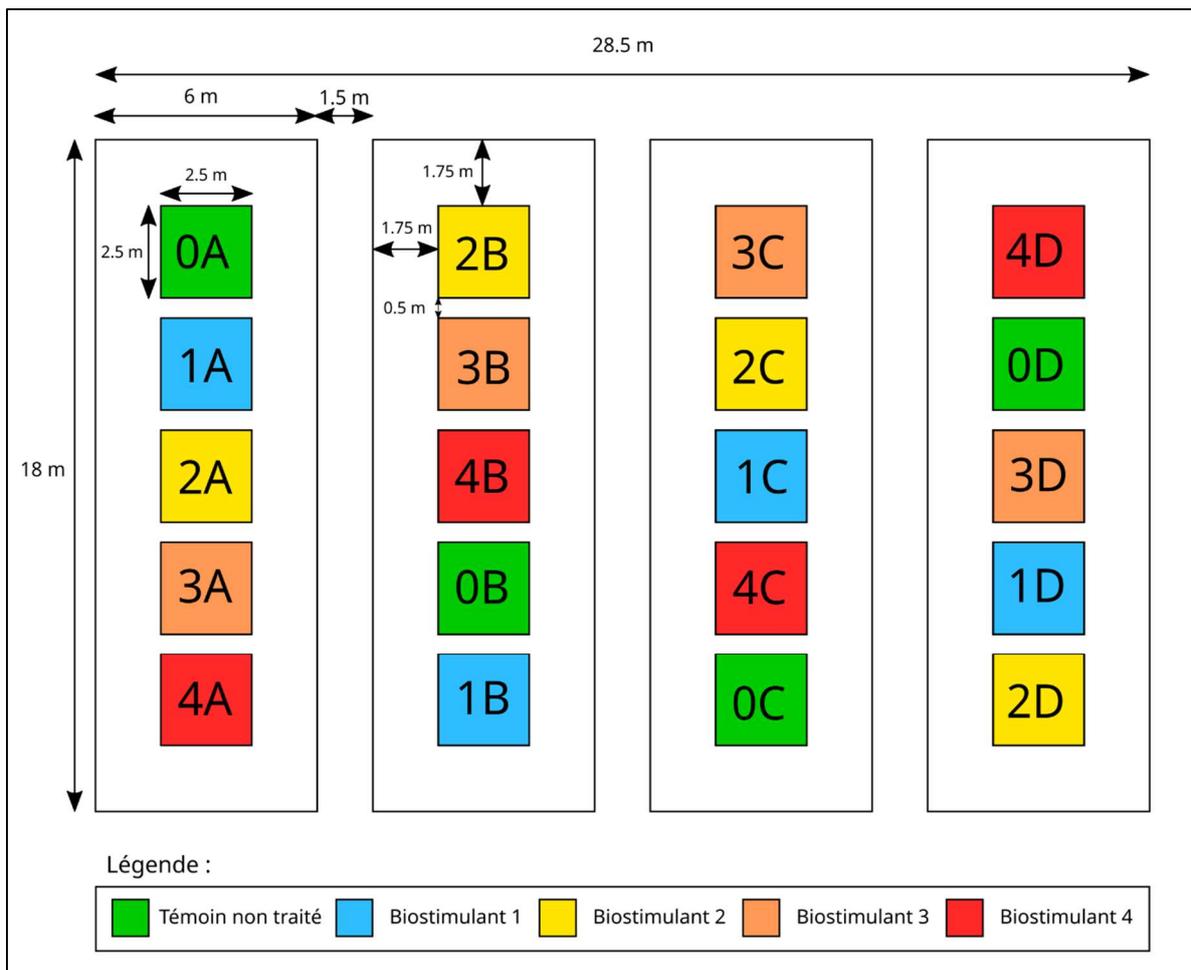


Figure 16 : Schéma expérimental de la parcelle de Redebel.

Des lignes d'arrosage ont fourni la même quantité d'eau (25%) à l'ensemble des micro-parcelles. Des serres amovibles, déposées sur des rails, empêchaient un apport d'eau supplémentaire en cas de précipitations. Celles-ci étaient mises de côté en conditions non pluvieuses afin de disposer de conditions similaires à une grande culture. Au niveau du sol, une bordure de 1,75 m protégeait les micro-parcelles d'un potentiel ruissellement lors de grandes précipitations et diminuait l'infiltration horizontale de l'eau dans le sol. Cette installation a permis de conserver la culture en état de stress hydrique tout au long de l'étude.

La variété KWS Smart a été sélectionnée pour cette expérimentation. Elle présente une tolérance aux maladies qui impactent les feuilles et/ou les épis. En plus des applications de biostimulant, des traitements azotés, des herbicides et des fongicides lui ont été appliqués. Des régulateurs de croissance lui ont été appliqués pour diminuer le risque de verse. Dans ces conditions, la culture est principalement conditionnée par le stress hydrique qui a été imposé. Les applications de biostimulant n'ont pas été réalisées le même nombre de fois et au même moment.

Lors de la récolte des données, le système d'acquisition a été déplacé entre les différentes micro-parcelles. Pour prendre en compte d'un effet de bord ainsi que de l'hétérogénéité du sol, trois images sont prises dans chacune d'elles. La période post zénith-solaire où les températures étaient les plus élevées a été ciblée. Pour éviter un effet de bord, le système était accolé aux micro-parcelles. Les références ainsi que l'eau qui leur a été fournie ont été acclimatées aux conditions environnementales durant 15 min avant acquisition. Plusieurs campagnes de mesure ont été menées à différents stades de développement (**Tableau 5**).

Tableau 5 : Description des sessions d'acquisition sur la parcelle expérimentale de Redebel.

DATES D'EXPÉRIMENTATION	STADE DE DÉVELOPPEMENT (BBCH)	CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES	PÉRIODE D'ACQUISITION
28 AVRIL 2022	30 : Montaison	Ensoleillé	13h30-15h00
11 MAI 2022	32 : Montaison	Ensoleillé avec phases nuageuses	13h30-14h40
1 JUIN 2022	65 : Floraison	Ensoleillé avec phases nuageuses	13h30-15h00
15 JUIN 2022	72 : Développement graine : stade aqueux	Ensoleillé avec phases nuageuses	14h30-16h00
22 JUIN 2022	73-75 : Développement graine : stade laiteux	Ensoleillé avec phases nuageuses faibles	14h00-16h30
6 JUILLET 2022	79 : Développement graine : fin stade laiteux	Ensoleillé avec phases nuageuses faibles	11h00-13h00

4. Traitement des images

4.1. Prétraitement

Le prétraitement des images a regroupé l'ensemble des procédures menant à l'extraction des marqueurs physiologiques et morphologiques du froment dans les images (**Figure 17**).

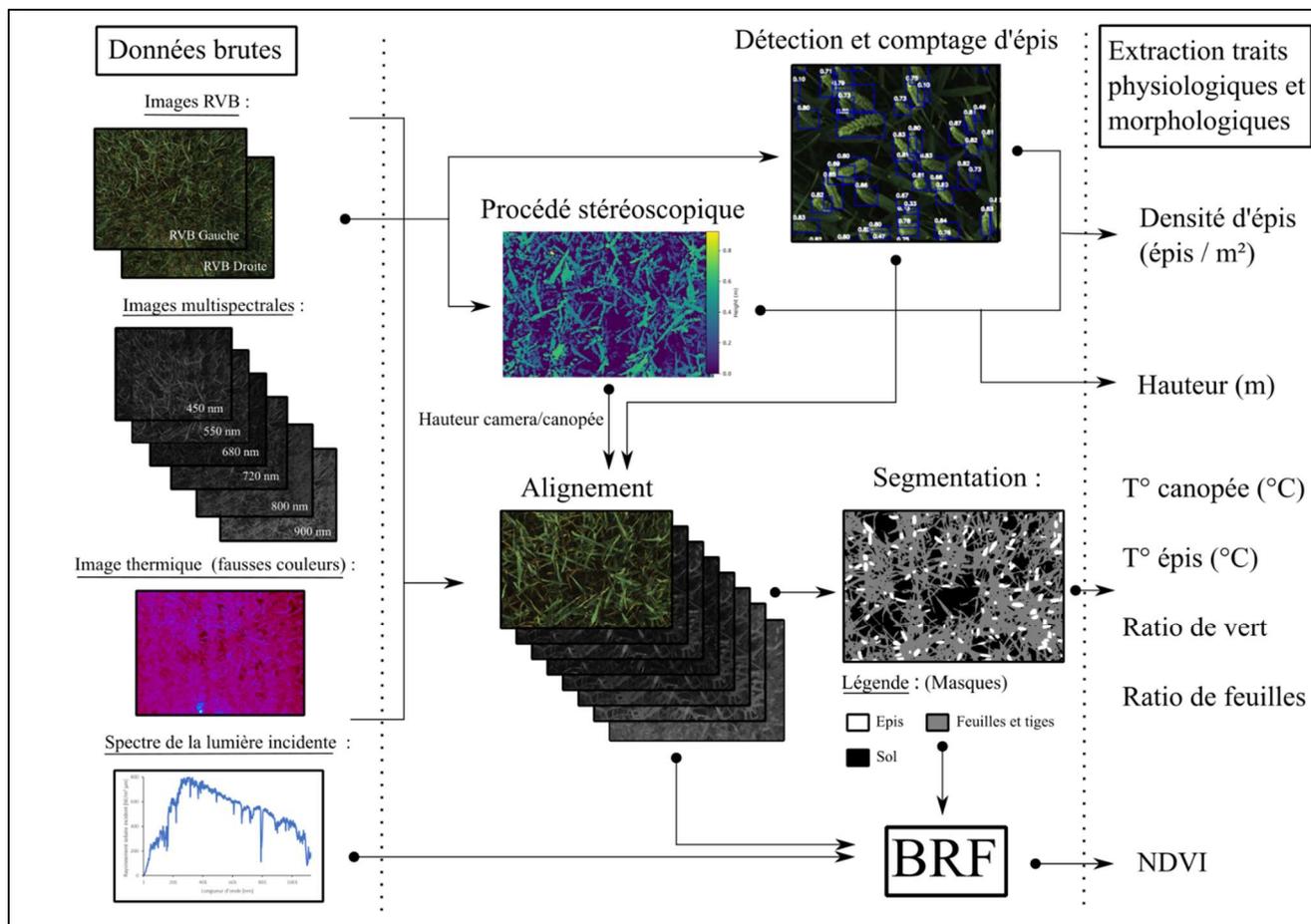


Figure 17 : Prétraitement et extraction des traits physiologiques et morphologiques du froment.

4.1.1. Alignement des images

Les caméras ne disposant pas de la même position et du même angle de vue, un objet n'était pas situé de façon identique dans chaque image. La combinaison entre le délai d'acquisition des données par chaque capteur et des conditions venteuses intensifiait ce décalage. Une procédure d'alignement a dû être appliquée afin de synchroniser les informations issues des différentes caméras. Un algorithme utilisant la méthode de Dandrifosse et al. (2021) se charge de recouper et d'aligner les images les unes sur les autres. Cette même méthode utilise également le procédé stéréoscopique utilisant deux caméras RVB décrit par Dandrifosse et al. (2020).

4.1.2. Segmentation des organes du froment

L'objectif de la segmentation est la dissociation des objets étudiés de l'arrière-plan de l'image. Pour segmenter les feuilles, tiges et épis du sol, des masques ont été réalisés. Ceux-ci ont permis l'extraction de pixels spécifiques afin de les étudier séparément. Toutes les images ayant été alignées, un même masque peut leur être appliqué. Le masque de la canopée a été réalisé par un seuillage sur l'image multispectrale à 800 nm (Dandrifosse, Carlier, et al., 2022). Pour le masque des épis, une méthode utilisant un modèle YOLOv5 et DeepMAC a été appliquée (Dandrifosse, Ennadifi, et al., 2022).

4.1.3. Extraction des traits morphologiques et physiologiques

Des traits pouvant être affectés par la présence d'un stress hydrique, ont été extraits des images. Les masques de la canopée et des épis ont été apposés sur l'image thermique afin d'en obtenir les températures moyennes. La température de la partie éclairée et ombragée de la canopée a été obtenue à l'aide d'un seuillage par la méthode d'Otsu et d'un filtre médian 3×3 sur le masque des feuilles. Le ratio de vert a été suivi à partir de la canopée de l'image RGB alignée. Le procédé stéréoscopique de Dandrifosse et al. (2020) a permis d'obtenir la hauteur moyenne du froment présent dans l'image. Ce même procédé a été couplé à la méthode de détection et de comptage d'épis (Dandrifosse, Ennadifi, et al., 2022) dans le but d'obtenir la densité d'épis par m^2 . Un facteur de réflexion bidirectionnel (BRF) a été calculé pour les 6 images multispectrales segmentées sur base du rayonnement solaire incident et de leur valeur d'exposition (Dandrifosse, Carlier, et al., 2022). L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) a été calculé à partir de ces facteurs de réflexion (point 4.4.)

4.2. Détection des références

Pour calculer les indices de stress hydrique, l'information thermique des références a été déterminée (**Figure 18**). Celles-ci n'occupaient pas la même position dans chaque image, cela étant dû à l'inclinaison du système et au mouvement des caméras avec le vent. Les références ont ainsi été extraites des images de façon automatique à l'aide d'un algorithme de détection de cercle. L'algorithme a été réalisé avec le langage de programmation Python 3.7. avec l'environnement de développement Spyder 4.1.4. de la distribution logicielle Anaconda 1.9.12 (64 bits). L'alignement a coupé une partie de l'image thermique dans laquelle la température de la canopée était étudiée. Afin de ne pas impacter les procédures appliquées aux images alignées, les références ont été placées dans la partie non alignée de l'image. La détection et la mesure des références n'ont été réalisées que sur base des données thermiques. L'image thermique enregistrée par le système était en fausse couleur et a dû être retransformée en nuances de gris. Pour améliorer la qualité de la détection, l'image thermique a été prétraitée. Un filtre gaussien médian 3×3 a été employé afin de réduire

le bruit présent dans l'image. Une égalisation de l'histogramme a aussi été utilisée afin d'augmenter les contrastes et améliorer la détection. Un découpage manuel de l'image a été réalisé autour de la référence pour diminuer la quantité d'informations à traiter. Pour détecter les cercles, la fonction « HoughCircles » de la librairie Opencv 4.4.0 a été utilisée. Cette fonction a été construite à partir de la méthode du gradient de Hough. Elle est réalisée en deux étapes. La première avait pour objectif de détecter les contours et de trouver des centres potentiels. La seconde consistait à déterminer le rayon idéal pour chaque centre détecté. Cette fonction a nécessité des images 8 bits à un seul canal en nuances de gris semblables aux images thermiques. Elle présentait plusieurs paramètres dont certains nécessitaient d'être optimisés. Ils sont au nombre de 5 :

- MinDist : Paramètre représentant la distance minimale en pixel entre deux cercles détectés dans l'image.
- MinRadius et MaxRadius : Paramètres définissant le rayon minimal et maximal des cercles recherchés.
- Paramètres 1 et 2 de la méthode du gradient de Hough :
Le paramètre 1 désignant le seuil supérieur de la détection des contours de Canny.
Le paramètre 2 désignant le seuil pour la détection du centre des cercles.

Les trois premiers paramètres ont été définis manuellement en laissant une certaine marge de manœuvre pour l'algorithme. Les deux derniers ont permis d'optimiser la détection. Deux objectifs sont recherchés. Il faut qu'exactement deux cercles aient été détectés et extraits de l'image. Ces deux cercles devaient également être alignés selon l'axe du support et ne pas être trop distants l'un de l'autre. Un mauvais alignement indiquerait que l'un des cercles a mal été positionné au sein de l'image. Ces trois conditions ont été intégrées dans des boucles d'itération. Tant que celles-ci ne sont pas remplies, l'algorithme a incrémenté d'une unité le paramètre 1 jusqu'à une valeur de 254. Une fois cette valeur dépassée, il le réinitialisait et incrémentait d'une unité le deuxième paramètre. Une fois deux cercles détectés, un masque était appliqué sur l'image thermique à partir de leurs coordonnées. Les données de température furent stockées dans une variable. La température moyenne la plus basse a été affectée à la référence humide tandis que la référence sèche a été représentée par la température moyenne maximale de la variable. Dans le cas d'une série temporelle du Centenaire et de Loncée, le système bougeait très peu et la position des références était stable dans l'ensemble des images. Pour éviter un rajout de variabilité causé par la détection automatique, la position des références a été définie manuellement dans l'algorithme.

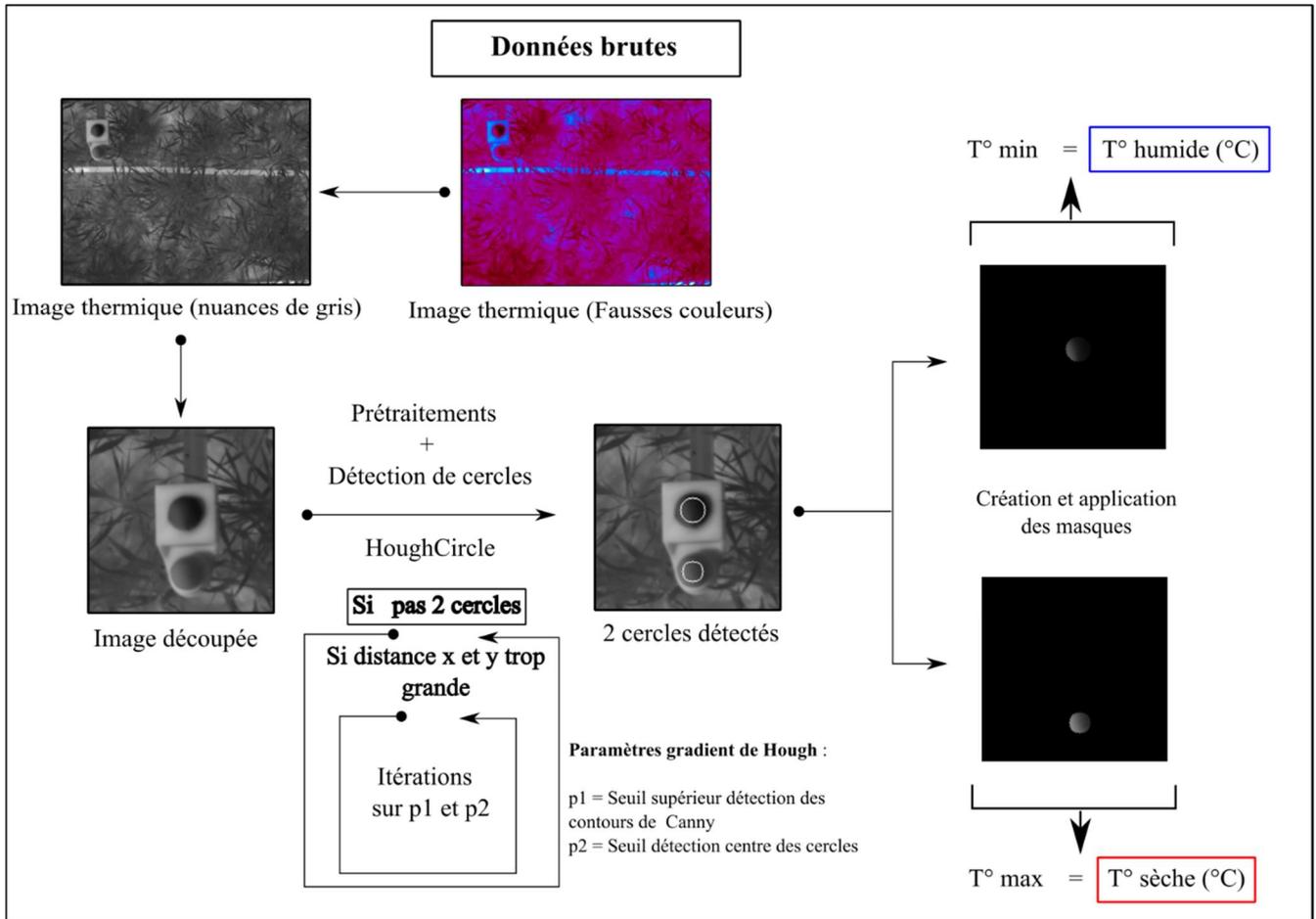


Figure 18 : Schéma simplifié de la détection et de la mesure de la température des références.

4.3. Validation de la détection des références

La qualité de la détection automatique a été déduite suite à une comparaison avec une détection dite « manuelle ». Cette détection nécessitait de rentrer les variables de position à la main dans les variables d'un algorithme. Cette opération pouvait mener à des erreurs de manipulations de la part de l'opérateur. Afin de diminuer ces erreurs, une interface interactive (**Figure 19**) a été créée à partir de la librairie Tkinter (0.1.0) de Python. Le but premier de cette interface était de placer un cercle sur la position de chaque référence dans les images étudiées. Les informations de température et de position étaient ensuite sauvegardées pour comparaison. Un bouton permettait pour chaque référence d'interagir avec l'image et d'y placer un cercle. Le rayon du cercle pouvait être adapté en modifiant la valeur dans la case prévue à cet effet. Un dernier bouton gérait la sauvegarde des données ainsi que le passage d'une image à l'autre. Les informations enregistrées comprennent pour chaque référence, leur position en x et y ainsi que la moyenne, la variance et l'écart-type de leur température. Le coefficient de détermination (R^2), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur absolue moyenne (MAE) ont été utilisés pour évaluer la qualité de la détection automatique.

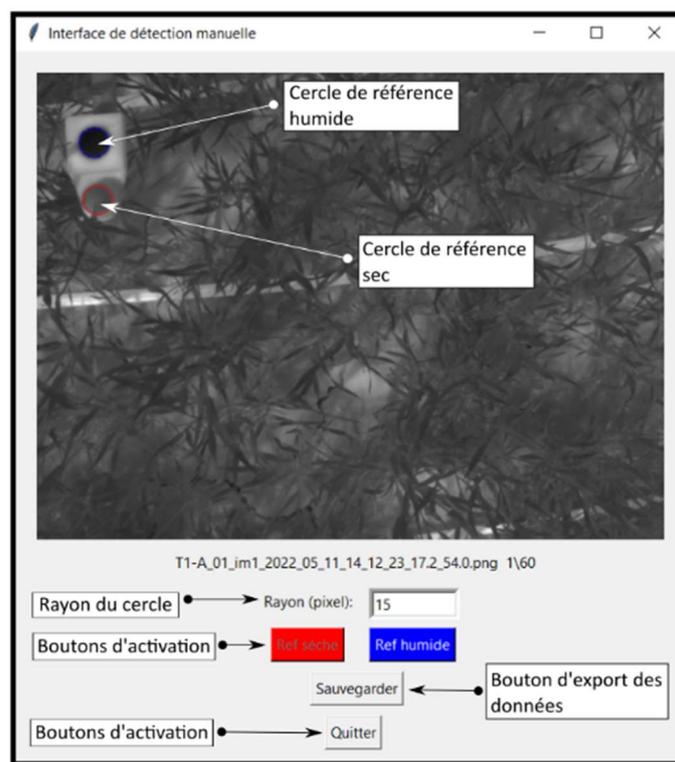


Figure 19 : Interface de détection manuelle.

4.4. Calcul des indices

Plusieurs indices ont été calculés à partir des marqueurs morphologiques et physiologiques et de la température des références obtenus (**Tableau 6**). Pour déterminer la présence d'une différence significative entre les applications de biostimulants, un test de Tukey a été réalisé. Les valeurs des différents indices et marqueurs ont été moyennées à l'échelle de la micro-parcelle. Un seuil de significativité α de 0.15 a été utilisé.

Tableau 6 : Indices utilisés dans la comparaison des applications de biostimulant.

INDICES	FORMULES
CWSI : INDICE DE STRESS HYDRIQUE DES CULTURES	$\frac{T^{\circ}\text{canopée} - T^{\circ}\text{humide}}{T^{\circ}\text{sèche} - T^{\circ}\text{humide}}$
IG : INDICE DE CONDUCTANCE STOMATIQUE	$\frac{T^{\circ}\text{sèche} - T^{\circ}\text{canopée}}{T^{\circ}\text{sèche} - T^{\circ}\text{humide}}$
NDVI : INDICE DE VÉGÉTATION PAR DIFFÉRENCE NORMALISÉE	$\frac{BRF\ 800 - BRF\ 680}{BRF\ 800 + BRF\ 680}$

C. Résultats et discussions

1. Analyse des séries temporelles

1.1. La canopée

La température de canopée a montré beaucoup une grande variabilité lors des séries temporelles. Au cours d'une journée de collecte, la température a graduellement augmenté pour atteindre une valeur de stabilité. Celle-ci était située entre 20 et 25°C dans le cas de la journée du 12 mai (**Figure 20 a**). Par moments, des variations pouvant dépasser 5°C, sur une période de 15 minutes, ont été constatées. Ces variations subites de la température de la canopée concordait avec les fluctuations de rayonnement solaire incident sur la surface de la culture. La raison principale d'une chute brusque de ce rayonnement était l'apparition d'une phase nuageuse devant le soleil. Ces comportements ont été aperçus sur l'ensemble des séries réalisées. Une fréquence plus petite d'acquisition (5 min) a permis d'observer les variations graduelles du rayonnement solaire et de la température de canopée (**Figure 20 b et c**). Sur la série temporelle de Lonzée (**Figure 20 c**), un rayonnement solaire intense de 300 à 350 W/m² a fait monter la température de la canopée aux alentours des 35°C. Les phases nuageuses provoquaient, dans ce cas, des baisses de température dépassant les 5°C sur une période courte de 5 minutes.

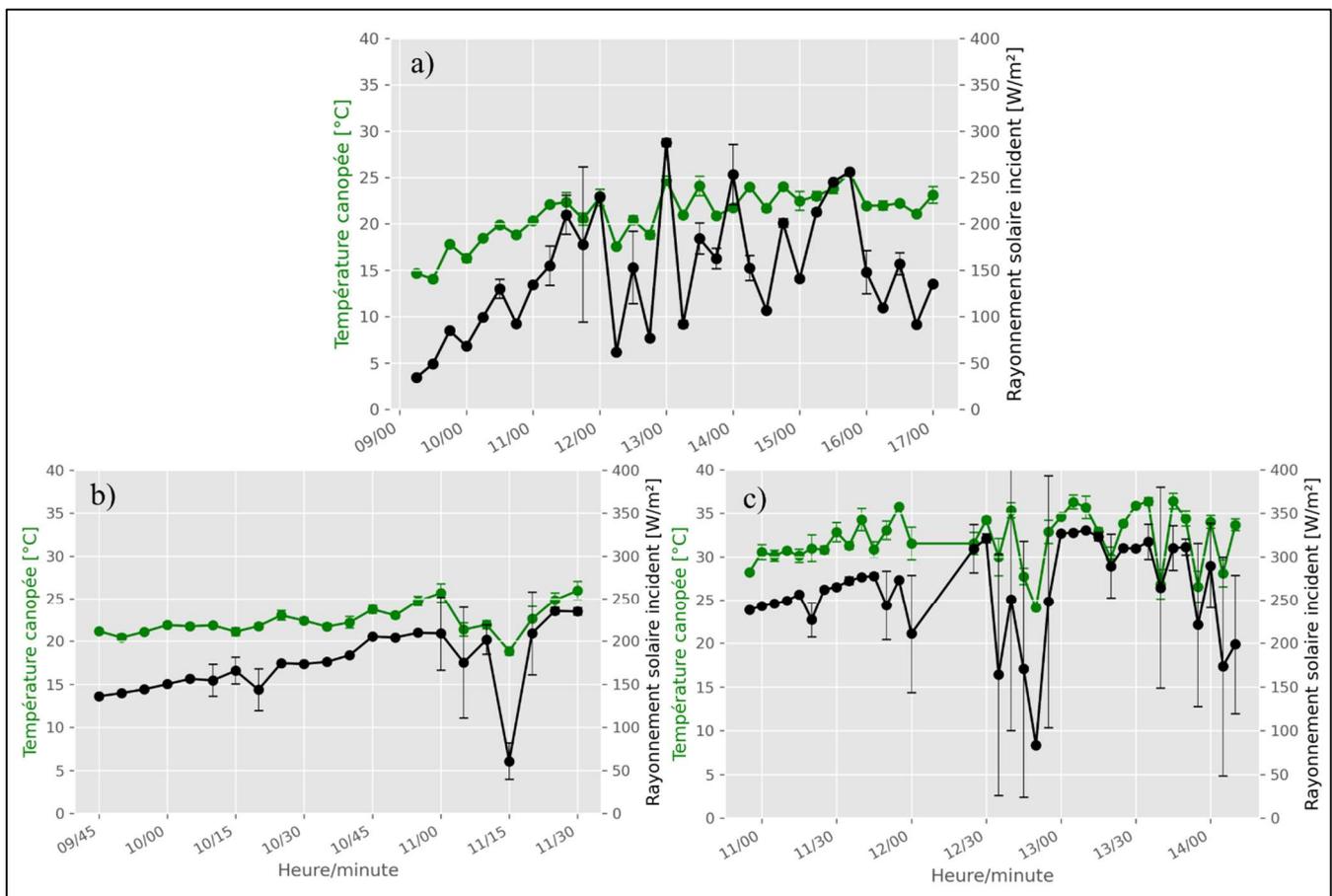


Figure 20 : Évolution de la température et du rayonnement solaire incident au cours d'une journée sur le site du Centenaire le 12/05 (a) et le 25/05 (b) et à Lonzée le 29/06 (c).

La température de canopée a pu être séparée en sa partie ensoleillée et ombragée (**Figure 21**). La première série n'a pas montré de différences entre ces deux températures (**a**). Le froment était encore à un stade précoce avec une hauteur de 30 cm. La canopée était ouverte et de réels effets d'ombre n'étaient pas présents au niveau des feuilles. Après épiaison, la température de canopée a été représentée par une moyenne entre la température au soleil et celle à l'ombre dans des conditions de luminosité importante. En effet, lors des phases nuageuses induisant une chute du rayonnement et de la température, la luminosité n'était plus suffisamment intense pour que l'algorithme puisse faire une différence entre la partie ensoleillée et ombragée de la canopée (**b et d**). Cette moyenne permet de disposer d'une température de canopée homogène. Cette dernière devint alors la seule température utilisable pour calculer l'indice de stress hydrique. Pour une canopée ouverte avec davantage de sol visible (**c**), des effets d'ombre étaient présents dans les images. Malgré un couvert développé, l'algorithme n'était plus capable de distinguer les deux. Il lui arrivait même de prendre en compte le sol dans la partie ombragée des feuilles. Ceci explique sa température à l'ombre plus élevée qu'au soleil. Cette séparation de la canopée ne peut donc être utilisée que sur une canopée suffisamment développée dans des conditions d'ensoleillement.

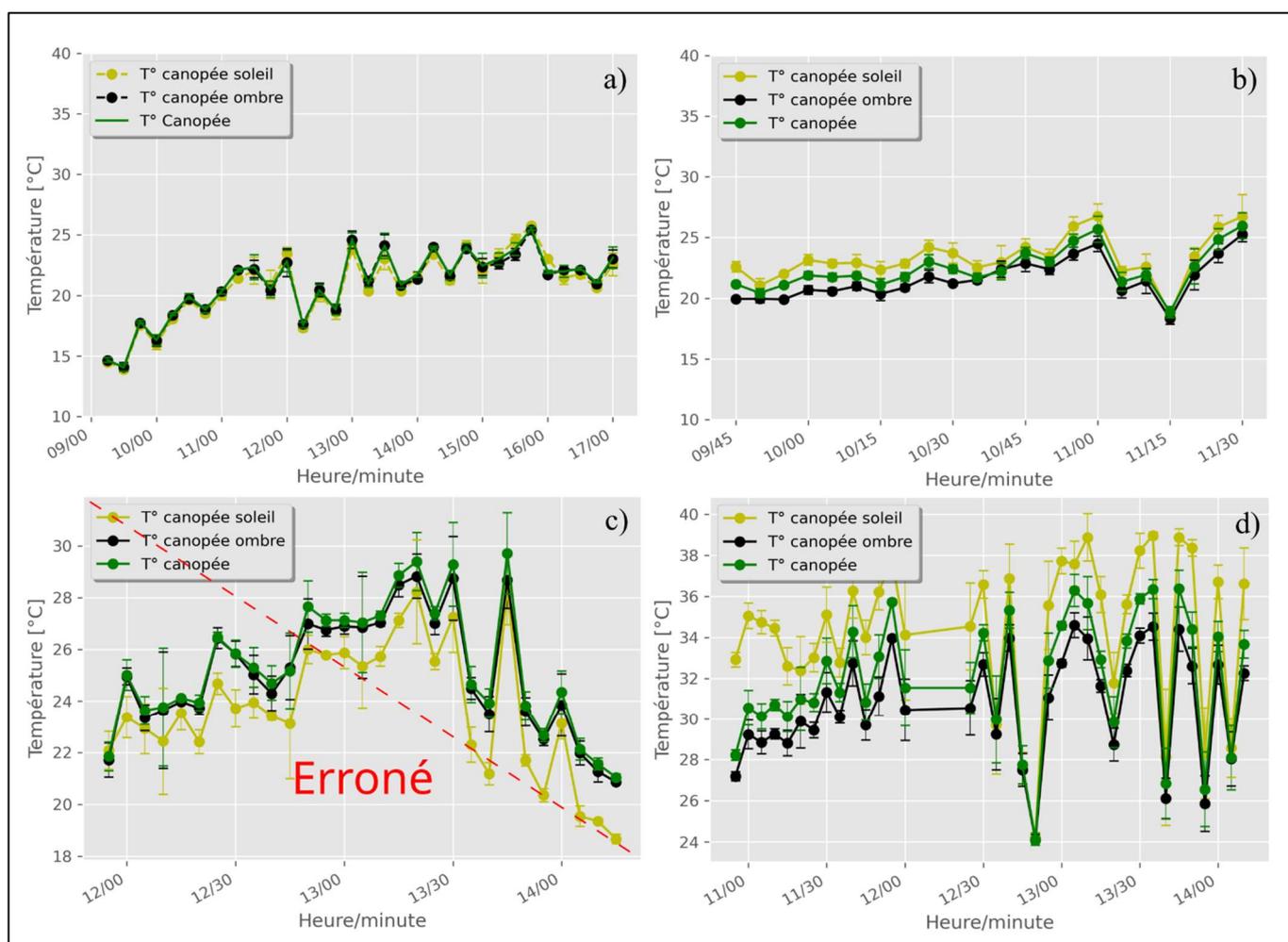


Figure 21 : Evolution de la température de la canopée ensoleillée et ombragée au Centenaire le 28/04 (a), le 25/05 (b), le 31/05 (c) et à Lonze le 29/06 (d).

Après épiaison, la température des épis peut être mesurée une fois le masque de ces derniers obtenu. La température des épis est plus élevée comparée à la température de la canopée (**Figure 22**). Les épis n'ayant pas le même pouvoir transpiratoire que les feuilles, ils ne peuvent pas réguler leur température. La température des plantes regroupe la température des feuilles et des épis. Cette dernière est semblable à la température des feuilles lorsque les épis sont encore en développement (**a**). Une différence plus importante de 2,5°C est présente en fin de saison lorsque les épis sont développés et davantage présents dans l'image (**b**). Il faut cependant prendre en compte que la différence de température était alors de 10°C. Ceci montre tout de même l'importance de devoir détecter avec exactitude les épis, une fois le froment bien développé. Dans le cas contraire, une erreur peut survenir lors de la mesure de la température de canopée qui est utilisée pour le calcul du CWSI. Cette séparation n'est réalisable que dans le cas de l'utilisation d'un système de proximité et de l'imagerie thermique.

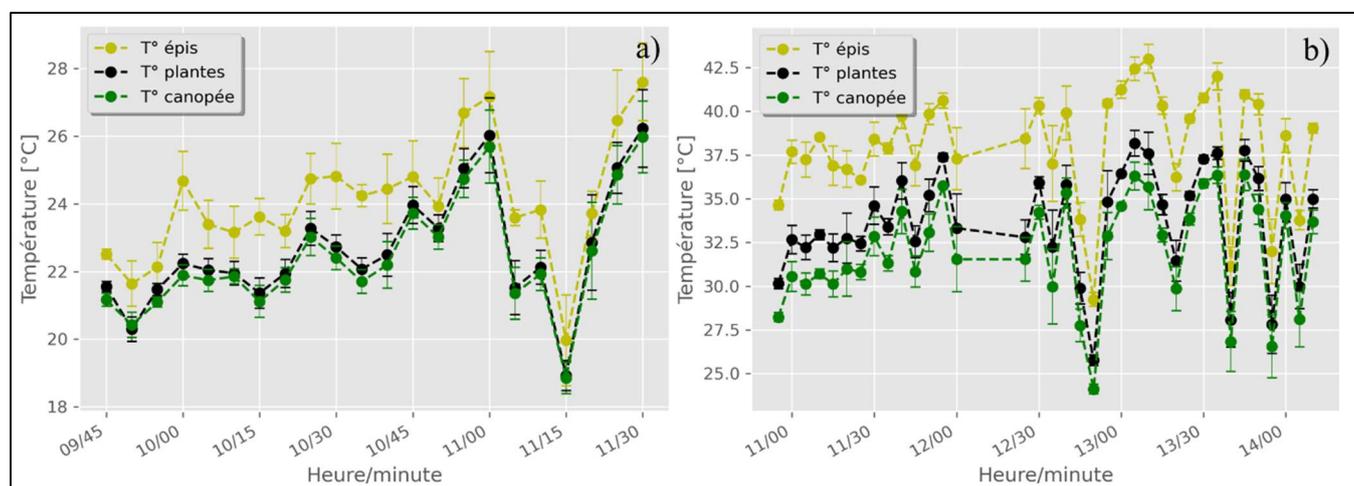


Figure 22 : Evolution de la température des organes de la canopée au Centenaire le 25/05 (a) et à Lonzée le 29/06 (b).

Les différents ratios de feuilles, d'épis et de sol sont tirés à partir des proportions que le masque de chaque objet occupe dans l'image alignée (**Figure 23**). Lors de la série temporelle du 25/05 au Centenaire, la densité de la canopée était plus faible car elle n'avait pas encore atteint l'épiaison (**a**). La proportion de sol et de feuilles était plus ou moins identique. Les diminutions de rayonnement solaire ont réduit la proportion de feuilles détectées. Ceci est dû aux effets d'ombrage qui vont rendre invisibles certaines feuilles et les assimiler au sol. Le vent, faible ce jour-là, a joué un rôle mineur dans la variation des différents ratios. A Lonzée (**b**), la série temporelle a été réalisée en fin de saison avec un froment totalement développé. La canopée était fermée et les effets du vent y étaient négligeables. Malgré des variations importantes du rayonnement solaire incident, le ratio de feuilles est resté stable. Une canopée fermée permet une mesure plus stable de la température des feuilles et donc de canopée.

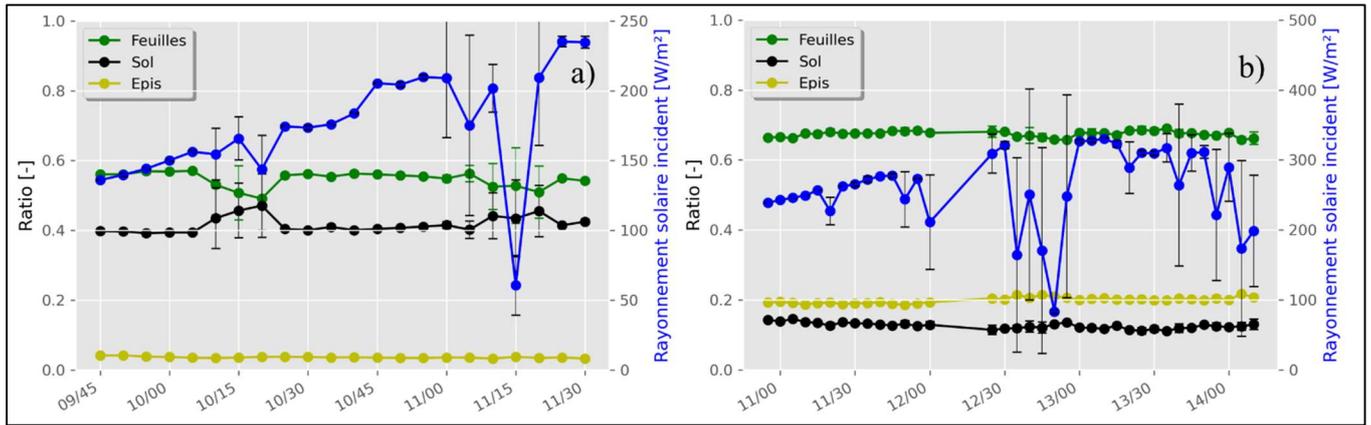


Figure 23 : Évolution des proportions des différents éléments dans l'image en fonction du rayonnement solaire au Centenaire le 25/05 (a) et à Lonzé le 29/06 (b)

1.2. Les systèmes de référence

Plusieurs systèmes de référence ont été testés afin de déterminer quel genre de support ou de matériau représente et normalise le mieux la canopée du froment d'hiver. Les références présentaient toutes le même comportement que la canopée vis-à-vis des changements environnementaux. Les différences principales étaient situées dans l'amplitude des variations et la température moyenne mesurée.

Le système MA-SA-C1 est le premier à avoir été étudié en conditions réelles (**Figure 24**). Les deux références ont montré le même comportement que la canopée en réaction aux changements environnementaux (**a**). La référence humide a conservé une température (T_h) plus stable avec des variations de $2,5^\circ\text{C}$. Cette dernière régulait sa température avec davantage d'efficacité par évaporation de l'eau à sa surface. Ceci imite le principe de transpiration des plantes pour réguler leur température mais dans une mesure plus importante. La référence sèche affichait des températures supérieures à la canopée à partir de la période post-zénithale du soleil. Des variations plus importantes de sa température étaient observées lors d'une augmentation du rayonnement solaire. La température de la référence sèche (T_s) était, par instants, trop similaire à la température de canopée (T_c), ce qui a donné un CWSI supérieur à 1 et, par conséquent, erroné (**d**). Le CWSI présentait des diminutions au moment où le rayonnement solaire a augmenté. Dans ces moments, T_s a présenté une augmentation subite, ce qui a creusé l'écart entre T_s et T_h . Leur différence représente le dénominateur du CWSI. Lorsqu'il augmente, la valeur du CWSI diminue. L'écart-type des températures mesurées sur les demi-sphères était différent de celui affiché par la canopée (**b**). La référence sèche s'en rapprochait lors des moments d'ensoleillement. Ceci peut indiquer que la demi-sphère n'est pas adaptée pour représenter les effets d'ombre de la canopée à ce stade de développement. Il faut cependant inclure le fait que la canopée présentait des variabilités dans le ratio de feuilles détectées. Ceci a pu jouer sur l'écart-type de la mesure, vu que des feuilles à l'ombre n'étaient pas prises en compte dans la moyenne lors du calcul de température. Pour que le CWSI soit correctement normalisé, il doit présenter une valeur constante, peu importe les modifications de température de l'air ou de rayonnement solaire. Il faut pour cela que le rapport des différences de T_c par rapport aux deux références soit positif et constant (**c**). Dans le cas présent, T_s est trop similaire à T_c , ce qui nuit à la cohérence du CWSI.

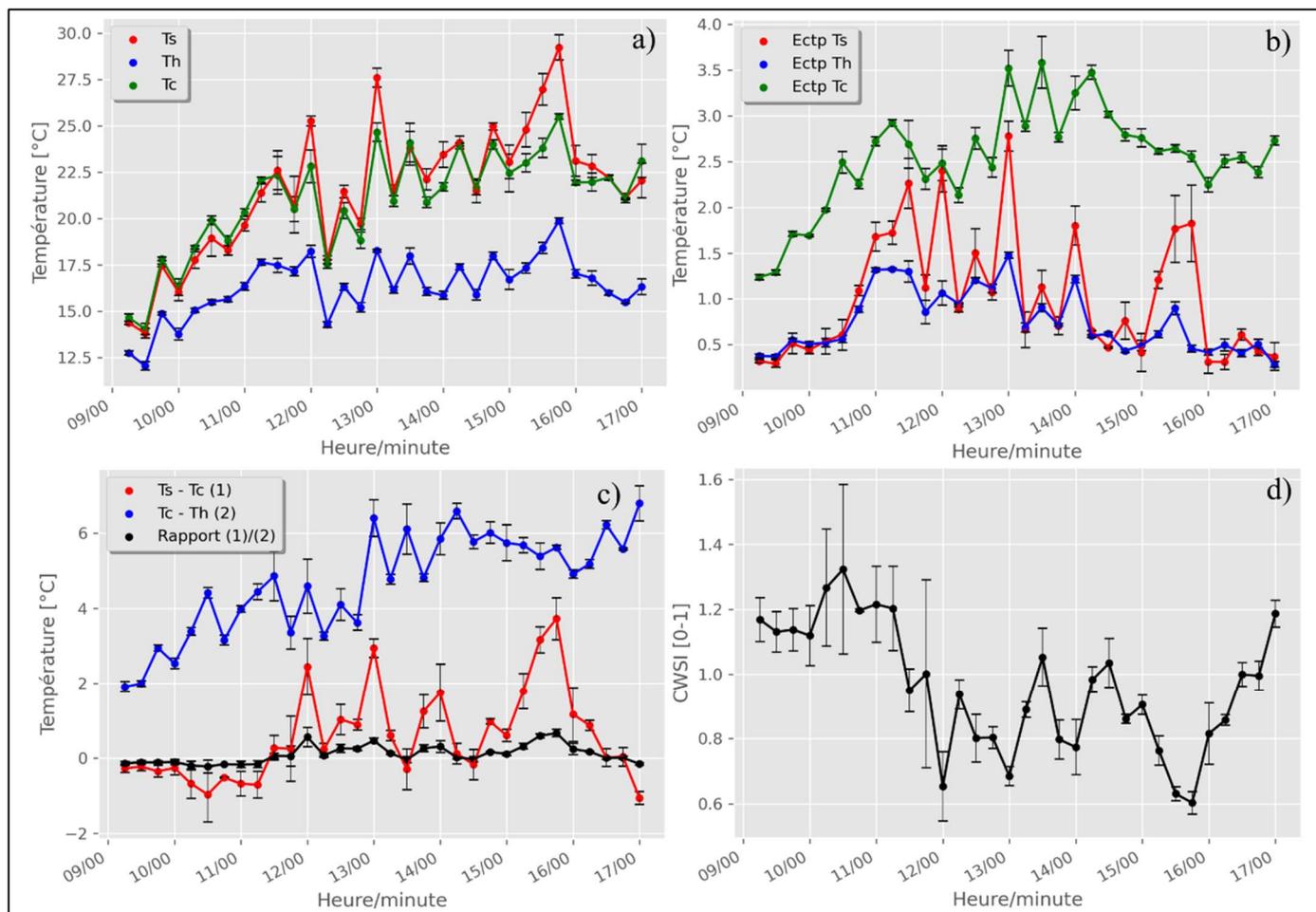


Figure 24 : Évolution de la température des références et de la canopée (a), de leur écart-type (Ectp) (b), des différences de température entre les références et la canopée (c) et de l'indice de stress hydrique des cultures (d) pour le système MA-SA-C1 le 28/04 au Centenaire.

L'effet de la présence d'une demi-sphère de maintien en plastique sur le support a été comparé sur les températures mesurées entre les systèmes MA-SA-C1 et MA-SB-C1 (**Figure 25**). Les supports A et B se comportaient de façon similaire bien qu'il y avait une différence relative de température entre les deux (a). Le premier était plus chaud pour les deux références, comparé au second. Cette différence de température était plus importante pour la référence humide et a augmenté lors de la phase d'ensoleillement entre 11h30 et 12h15. Le support A a augmenté l'écart-type de température à la surface des références (b). L'absence de demi-sphères en plastique permet un meilleur échange de chaleur avec l'air, ce qui induit une meilleure régulation et homogénéité de la température à leur surface pour le support B. L'amélioration de l'évaporation de l'eau permet à la référence humide de mieux réguler sa température, ce qui la diminue. Dans le cas de cette série temporelle, le support A qui était pourvu des demi-sphères en plastique a amélioré le calcul du CWSI, car il a remonté Ts au dessus de Tc (d). Le CWSI était dès lors inférieur à 1 sur la majorité de la durée de la série temporelle. Ce matériau était cependant trop clair et ne représentait pas correctement la canopée. Ce dernier ne stockait pas assez la chaleur et affichait un Ts trop faible. Avec une couleur plus foncée, la température des références sera plus haute. Dans le cas où elle serait trop sombre, la température humide serait alors trop proche de la température de la canopée. Le support B se révélerait être bénéfique dans ce cas pour réadapter la température mesurée.

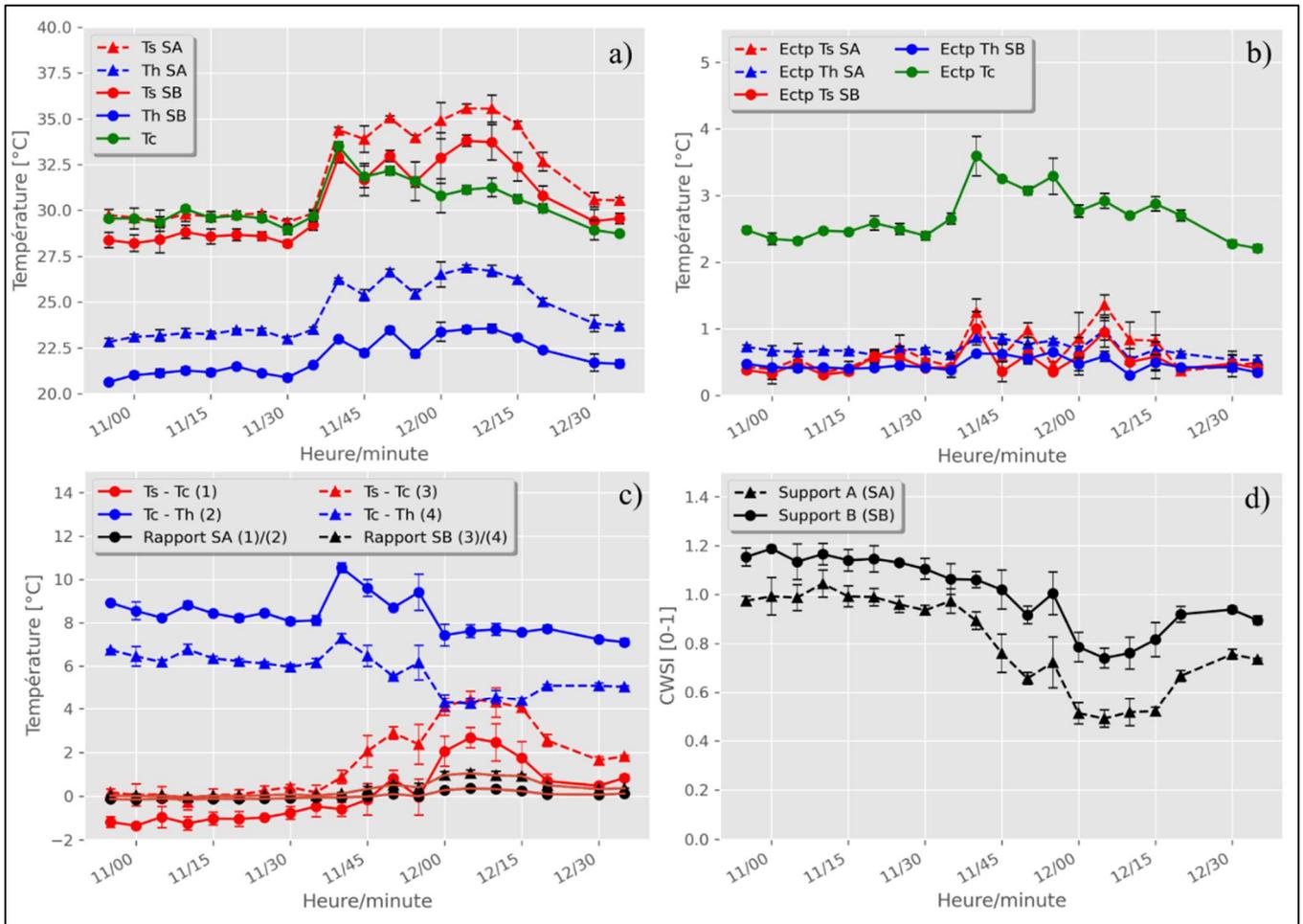


Figure 25 : Évolution de la température des références et de la canopée (a), de leur écart-type (Ectp) (b), des différences de température entre les références et la canopée (c) et de l'indice de stress hydrique des cultures (d) pour les systèmes MA-SA-C1 et MA-SB-C1 le 19/05 au Centenaire.

La plupart des références testées étaient trop claires et leur Ts était trop proche de la température de la canopée. Suivant ce constat, des références plus sombres ont été testées dans les expérimentations postérieures. Le système MC-SA, de couleur vert foncé a présenté de meilleurs résultats (**Figure 26**). Tc était conservé entre Ts et Th, même lors de la variation du rayonnement solaire (**a**). L'écart-type des références était situé autour de celui de la canopée (**b**). La référence humide pouvant réguler sa température par évaporation, sa température était plus homogène avec un écart-type plus faible. A l'opposé, la référence sèche n'ayant aucune régulation, hormis par échange de chaleur avec l'air, présentait un écart-type plus élevé. En terme de CWSI, une valeur stable située autour de 0.5 a été obtenue (**d**). La variation située entre 10h15 et 10h30 coïncide avec une baisse du ratio de feuilles dans l'image. Cette variation est due principalement à une erreur de la détection des feuilles de la canopée lors d'un passage nuageux et non du système de référence. Les différences de température entre les références et la canopée appuient encore cette stabilité (**c**). Ces dernières s'entrecroisaient, ce qui veut dire que la température de canopée conserve la même différence de température avec les deux. C'est lors d'un passage nuageux important et d'une diminution importante du rayonnement reçu, que le CWSI est devenu le plus instable. Ceci signifie que des

conditions nuageuses homogènes ou un ciel dégagé constitue probablement les meilleures conditions pour mesurer le stress hydrique. Ces résultats sont critiquables concernant le fait qu'ils ne sont étalés que sur deux heures et que la période post-zénithale où les températures sont les plus importantes, n'a pas été suivie.

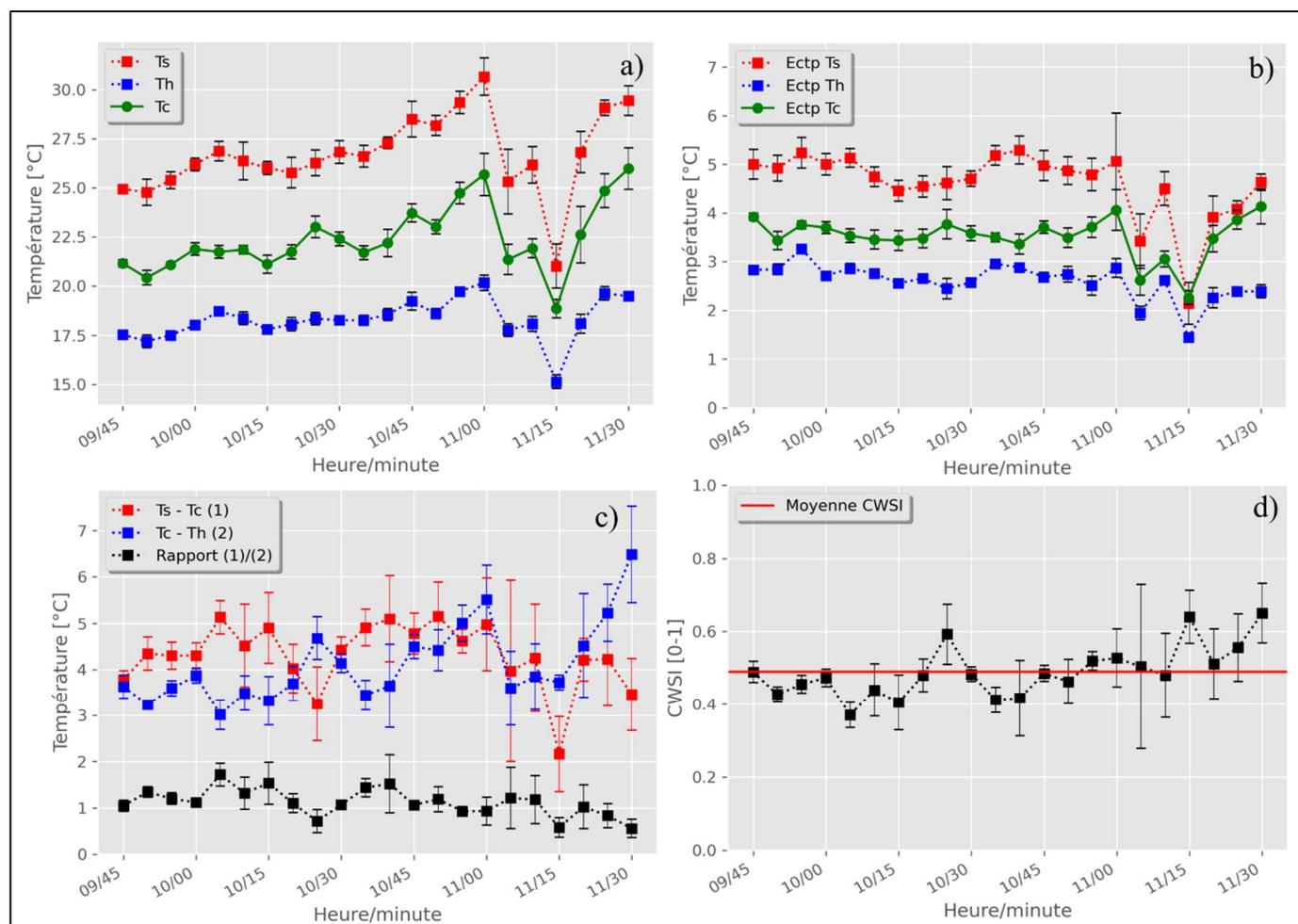


Figure 26 : Évolution de la température des références et de la canopée (a), de leur écart-type (Ectp) (b), des différences de température entre les références et la canopée (c) et de l'indice de stress hydrique des cultures (d) pour le système MC-SA au Centenaire le 25/05.

Le point négatif du matériau C qui a été utilisé est qu'il n'est pas utilisable sur le support B. Celui-ci avait tendance à se déformer même une fois sec ce qui rendait difficile son modelage en demi-sphère. Le matériau A, qui présentait les meilleures caractéristiques, a été coloré en teintes de vert plus foncées et testé à Lonzée (Figure 27). Il présenta le même comportement que le MC-SA sauf que cette fois-ci la période post-zénithale était prise en compte. Sur la partie avant midi, un CWSI plutôt stable était observé (d). De nombreuses phases nuageuses ont apporté, après 12h30, des variations importantes dans le calcul du CWSI. Malgré cela, sa valeur a continué de graviter autour de la valeur de 0,45. Les écarts-types de la référence sèche et humide sont plus faibles que celui de la canopée (b). Celui de la référence sèche est particulièrement faible et résilient aux changements. Ceci peut être dû au fait que la référence une fois humide s'assombrit davantage et stocke mieux la chaleur. Une couleur légèrement plus claire pourrait être utilisée pour Rh afin de pallier à cet assombrissement. Pour le coloris plus sombre, les mêmes éléments

sont perçus, à la différence que le CWSI est plus faible avec une valeur moyenne de 0,35. Le coloris joue un rôle important dans la quantification du stress et doit être déterminé au préalable. La couleur du froment évoluant au cours de la saison, le choix d'une teinte de vert unique est difficile. Pour les trois dernières sessions d'acquisition réalisées à Redebel, c'est donc un système semblable à celui utilisé sur la série temporelle de Lonzée, avec 3 systèmes de différents coloris, qui a été testé.

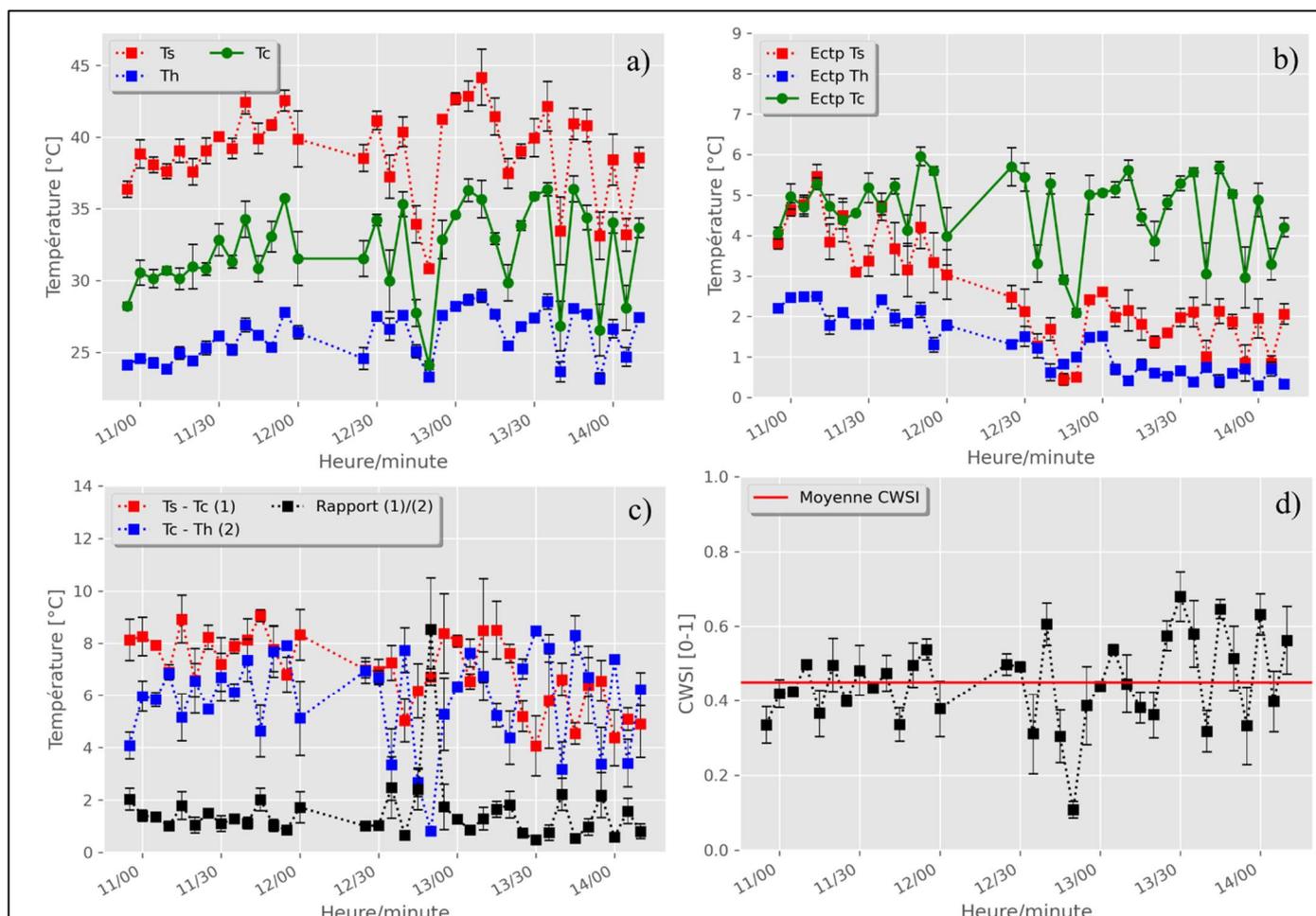


Figure 27 : Évolution de la température des références et de la canopée (a), de leur écart-type (b), des différences de température entre les références et la canopée (c) et de l'indice de stress hydrique des cultures (d) pour le système MA-SA-C2 à Lonzée le 29/06.

2. Analyse de l'algorithme de détection

2.1. Taux de détection

La méthode de détection des références dans l'image thermique n'a été évaluée que sur des images acquises à Redebel. La position des références n'étant pas identique dans chaque image contrairement aux séries temporelles, ces images donnent un meilleur aperçu sur la qualité de l'algorithme de détection réalisé. L'algorithme a traité les 360 images thermiques récoltées sur les 6 journées d'expérimentation. En prenant en compte le fait que plusieurs systèmes de référence ont été testés lors de certaines sessions d'acquisition, ce sont 1200 références sèches (RS) et 1200 références humides (RH) qui ont dû être détectées. La RH a pu être déterminée dans 100% des cas sans mordre sur une partie du support. Le contraste entre la haute température du support et la température basse de la référence a permis de la détecter dans tous les cas. En ce qui concerne RS, 53 détections sont considérées comme erronées, ce qui donne un taux de détection de 95,62%. Dans ces 4,42% d'erreur, 3 catégories visuelles ont été établies : erreurs fortes, moyennes et faibles (**Tableau 7**). Les erreurs fortes rassemblent les RS détectées en dehors même du support, dans la canopée (**Figure 28**). Les erreurs moyennes indiquent des RS détectées en partie sur la référence et sur le support ou la canopée. Les erreurs faibles sont comptabilisées lorsque le cercle de détection empiète sur la fine bordure du support qui maintient la référence. Les erreurs fortes et moyennes ne sont rencontrées que dans 2,5% des cas. Il est possible que l'algorithme rentre dans une boucle sans fin lorsque les conditions ne sont jamais remplies. Pour éviter ce scénario, des valeurs initiales plus larges ont été définies en termes de rayon minimum et maximum et de distance minimale entre les cercles. Ceci permet l'apparition de ces erreurs fortes et moyennes. Elles peuvent être évitées en ajustant les paramètres ou en jouant sur les prétraitements de l'image. Ces erreurs ont toutes été rencontrées sur l'analyse des systèmes MA-SA-C2, MA-SB-C3 et MA-SA-C3. Leur teinte étant plus sombre, leur température est plus haute et le contraste avec le support est plus faible. Les erreurs faibles peuvent être annulées en diminuant légèrement le rayon du cercle détecté. Cette action peut toutefois modifier la température moyenne mesurée. Dans certains cas, des feuilles ou des épis ont recouvert les demi-sphères, mais la détection n'a pas été perturbée.

Tableau 7 : Catégories des erreurs de détection de la référence sèche.

Catégorie	Occurrences	Proportion de l'erreur (%)	Proportion totale (%)
Erreurs fortes	6	11,4	0,5
Erreurs moyennes	24	45,2	2
Erreurs faibles	23	43,4	1,92

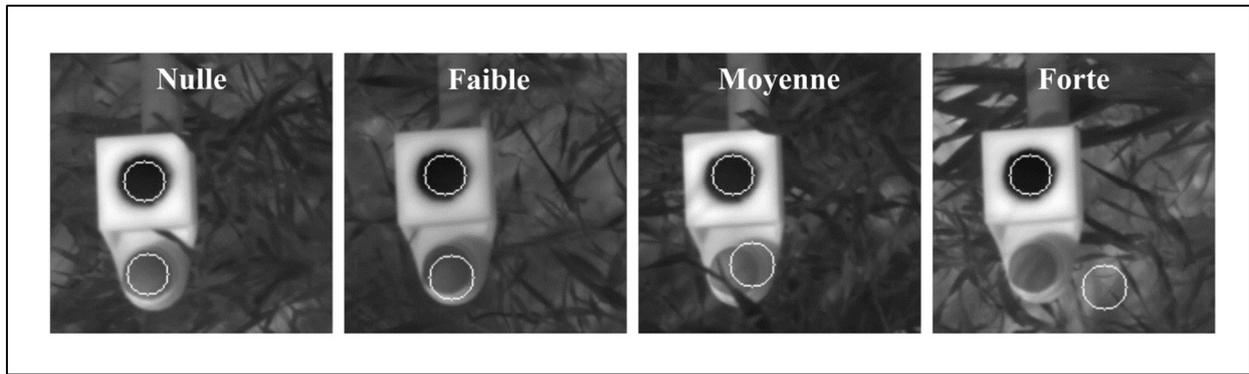


Figure 28 : Différents types d'erreur de détection rencontrés.

2.2. Validation de la détection

Le coefficient de détermination (R^2), le RMSE ainsi que le MAE ont été calculés entre la détection automatique et manuelle pour les deux références. Le système était placé sur un axe vertical dans le cas des séances d'acquisition évaluées et la référence sèche était tournée vers le bas de l'image. La caméra et le système de référence étant maintenus à 1,5 m de distance l'une de l'autre, un pixel de l'image équivaut approximativement à 1.4 mm. L'ensemble des RMSE pour les deux axes était inférieur à 4.2 mm, soit 3 pixels. C'est la valeur dont a été diminué le rayon des cercles détectés automatiquement afin de ne pas empiéter sur le bord du support. Un cercle détecté avec un rayon égal ou inférieur au rayon de la référence restait donc dans la zone d'intérêt. Pour RH, l'ensemble des RMSE et MAE pour les deux axes a été inférieur à 2,8 mm, soit 2 pixels (**Tableau 8**). Les erreurs étaient plus importantes dans la majorité des cas pour l'axe des ordonnées. Ceci est causé par la boucle d'optimisation de la détection qui réduit les écarts entre les deux références détectées sur l'axe horizontal (X). Pour la référence sèche, les erreurs étaient situées entre 1,4 mm et 4,2 mm avec des valeurs variables (**Tableau 9**). Le même phénomène que pour RH est observé pour la RS mais de façon plus intense pour l'axe vertical (Y). Certains graphes ont montré que la droite de régression pour cette donnée était au-dessus de la droite unitaire (**Figure 29**). Ceci indique que le centre de la RS va être détecté à une position plus élevée sur l'axe vertical. Les images ayant leur pixel 0 dans le coin supérieur gauche, une position sur l'axe en augmentation va descendre dans le bas de l'image. Ceci était dû au fait que la détection a tendance à prendre en compte le bord du support circulaire. Un autre facteur pouvant augmenter le taux d'erreur, est l'ombre de la référence sur le support. Ce phénomène apparaît pour les deux références, mais sa visibilité est accrue pour RH qui n'est influencée que par ce paramètre. L'ombre étant située vers le haut de l'image, c'est la droite unitaire qui est supérieure à la droite de régression du graphique (**Figure 30**).

Tableau 8 : Résultats de validation de la méthode automatique pour RH concernant la position du centre du cercle détecté sur l'axe horizontal (X) et vertical (Y) et pour la température mesurée.

	Référence humide (RH)								
	Position axe horizontal (X)			Position axe vertical (Y)			Température (°C)		
	R ²	RMSE (mm)	MAE (mm)	R ²	RMSE (mm)	MAE (mm)	R ²	RMSE (mm)	MAE (mm)
28/04/2022 (MA-SA-C1)	0.992	2.243	1.773	0.945	2.272	1.867	0.775	0.599	0.510
11/05/2022 (MA-SB-C1)	0.755	2.123	1.477	0.793	1.365	1.050	0.984	0.309	0.270
01/06/2022 (MA-SA-C1)	0.977	1.657	1.260	0.94	1.705	1.330	0.992	0.097	0.075
01/06/2022 (MA-SA-C2)	0.986	1.226	0.793	0.637	1.676	1.307	0.986	0.148	0.116
01/06/2022 (MA-SA-C3)	0.985	1.365	1.003	0.906	2.061	1.773	0.987	0.200	0.167

Tableau 9 : Résultats de validation de la méthode automatique pour RS concernant la position du centre du cercle détecté sur l'axe horizontal (X) et vertical (Y) et pour la température mesurée.

	Référence sèche (RS)								
	Position axe horizontal (X)			Position axe vertical (Y)			Température (°C)		
	R ²	RMSE (mm)	MAE (mm)	R ²	RMSE (mm)	MAE (mm)	R ²	RMSE (mm)	MAE (mm)
28/04/2022 (MA-SA-C1)	0.988	2.771	2.263	0.967	2.823	2.053	0.380	0.993	0.870
11/05/2022 (MA-SB-C1)	0.660	2.329	1.727	0.513	3.192	2.287	0.811	0.641	0.476
01/06/2022 (MA-SA-C1)	0.971	1.705	1.237	0.727	2.398	1.727	0.997	0.131	0.112
01/06/2022 (MA-SA-C2)	0.936	2.800	1.773	0.556	2.687	2.077	0.977	0.287	0.194
01/06/2022 (MA-SA-C3)	0.964	2.191	1.750	0.923	2.717	1.960	0.950	0.720	0.500

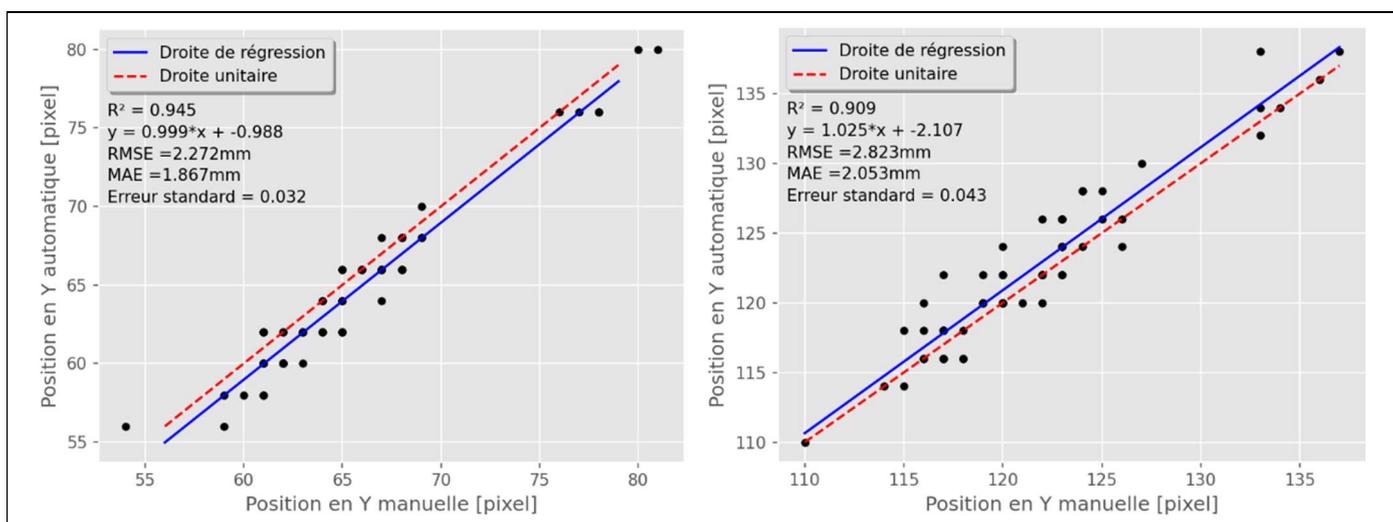


Figure 29 : Comparaison de la position en Y de RH (gauche) et RS (droite) entre la méthode automatique et manuelle. Détection du système MA-SA-C1 lors de la journée du 28/04/2022.

Pour les températures, RH présente des erreurs plus basses. Cette dernière disposait d'une inertie plus importante au niveau de sa température. L'algorithme détermine assez bien sa température sauf lors de l'expérimentation du 28 avril. La référence n'avait pas été acclimatée aux conditions environnementales et il s'agissait d'une journée ensoleillée sans vent ni nuage. Les températures de RH et RS présentaient une plus grande variance dépassant les 10 degrés avec l'effet d'ensoleillement et d'ombrage (**Figure 31**). Une erreur de quelques pixels peut changer de façon importante la température moyenne dans ce cas. Le même principe est à l'ouvrage au niveau de la référence MA-SA-C3. Sa teinte plus foncée, permet de stocker davantage de chaleur, ce qui augmente la variance de sa température.

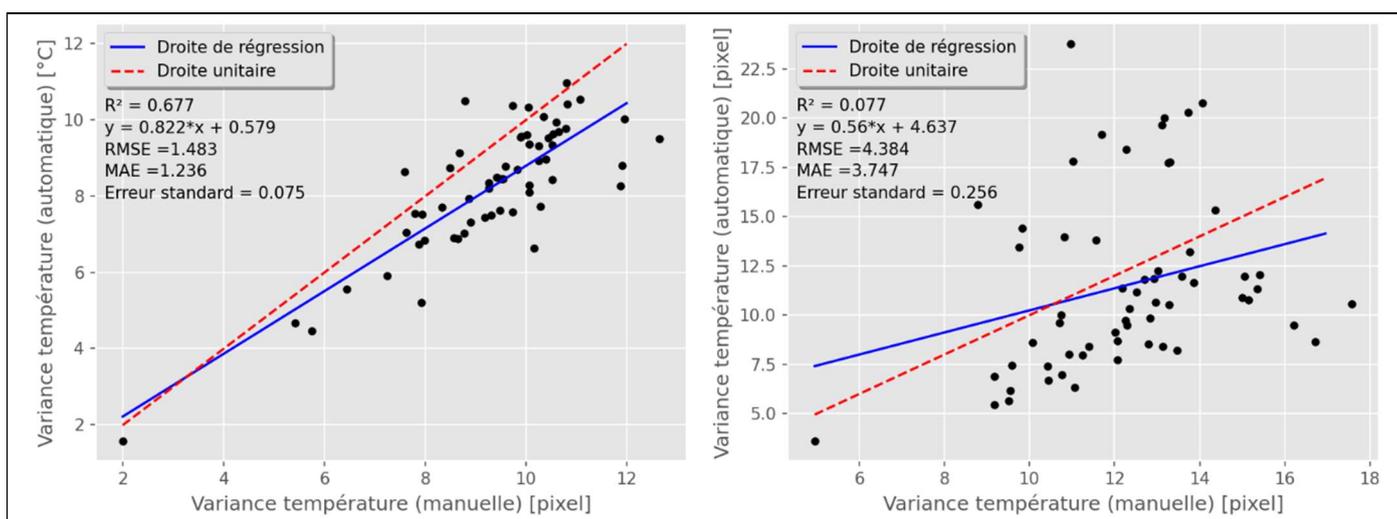


Figure 30 : Comparaison de la variance mesurée sur RH (gauche) et RS (droite) entre la méthode automatique et manuelle. Détection du système MA-SA-C1 lors de la journée du 28/04/2022.

Plusieurs paramètres ont influencé la détection des références. Le premier est le contraste entre le matériau de référence et le support. La RH ayant bénéficié d'un contraste plus important, sa détection au sein de l'image a été systématique et plus exacte. Les effets d'ombre sur le support ont également joué un rôle dans le positionnement de la référence dans l'image. Les journées nuageuses ont permis une meilleure détection des références mais diminuaient l'intérêt de l'usage d'une demi-sphère. Les résultats ont montré que la position des références était décalée de maximum 3 mm sur chaque axe. Sur une demi-sphère de 20 mm de rayon, cette erreur reste faible en prenant en compte que la détection automatique retire 3 mm au cercle détecté.

3. Expérimentation à Redebel

3.1. Différences significatives de stress

L'expérimentation à Redebel n'a montré une différence entre les différentes applications que sur deux variables : la température de canopée et la densité d'épis (**Tableau 10**). Aucun apport positif ou négatif des biostimulants vis-à-vis du CWSI et de ses variantes n'a été constaté. Un effet de bord au niveau des micro-parcelles peut être la cause de cette absence de différence. Une hétérogénéité avait été constatée avec une hauteur plus faible en centre de micro-parcelles. Le système d'acquisition était limité dans sa portée et ne pouvait étudier le centre sans endommager la culture. Ce dernier avait donc été collé à la culture et prenait les images à 30 cm du bord. Pour la hauteur, des ornières empêchaient d'avoir un système parallèle au sol en toute circonstance, ce qui a pu perturber la mesure de la hauteur de blé.

Tableau 10 : Résultats du test de Tukey pour différentes variables lors des sessions d'acquisition. Une différence significative entre les moyennes est indiquée par une couleur verte tandis qu'une égalité est représentée par une couleur rouge. Un seuil de significativité α de 0.15 a été utilisé.

Date et stade	Température de la canopée [°C]	CWSI [-]	IG [-]	NDVI [-]	Ratio de vert [-]	Ratio de feuille [-]	Hauteur [m]	Densité d'épis [épis/m ²]
28/04/2022 BBCH : 30								X
12/05/2022 BBCH : 33								X
01/06/2022 BBCH : 65								
15/06/2022 BBCH : 72								
22/06/2022 BBCH : 73-75								
05/07/2022 BBCH : 79								

Lors de la première journée d'acquisition, ce sont des différences entre la température de trois groupes qui ont été mesurées (**Figure 31**). Le témoin (T0) ainsi que l'application de biostimulant 1 (T1) et 2 (T2) ont montré une différence significative avec le traitement 4 (T4) (**a**). Le rayonnement solaire incident ne montre cependant aucune différence importante lors de l'acquisition sur les micro-parcelles traitées par le quatrième biostimulant (**b**). Cette différence de température est donc due aux autres variables environnementales telles que le vent, l'humidité relative ou la température de l'air. Elle peut également être représentative d'une différence de stress hydrique car les autres indices ont montré la même tendance (point 3.2.). Pour la dernière journée d'acquisition, ce sont les variables de température et de densité d'épis qui ont montré une différence (**Figure 32**). Pour la différence de température, le traitement 2 (T2) s'est révélé être différent du traitement 1 (T1) et du traitement 4 (T4) (**a**). Cette fois-ci, deux des micro-parcelles de ce

traitement ont été mesurées sous des conditions nuageuses avec un rayonnement incident beaucoup plus faible (b). Pour la densité d'épis, une micro-parcelle a montré des valeurs beaucoup plus importantes (d), ce qui donne une différence significative entre le traitement 3 (T3) et le traitement 1 (T1) (c). Ceci est possiblement dû à un mauvais calcul de la hauteur, dû aux ornières de la parcelle, ou au bras portant les références qui a occulté moins d'épis que dans les autres micro-parcelles.

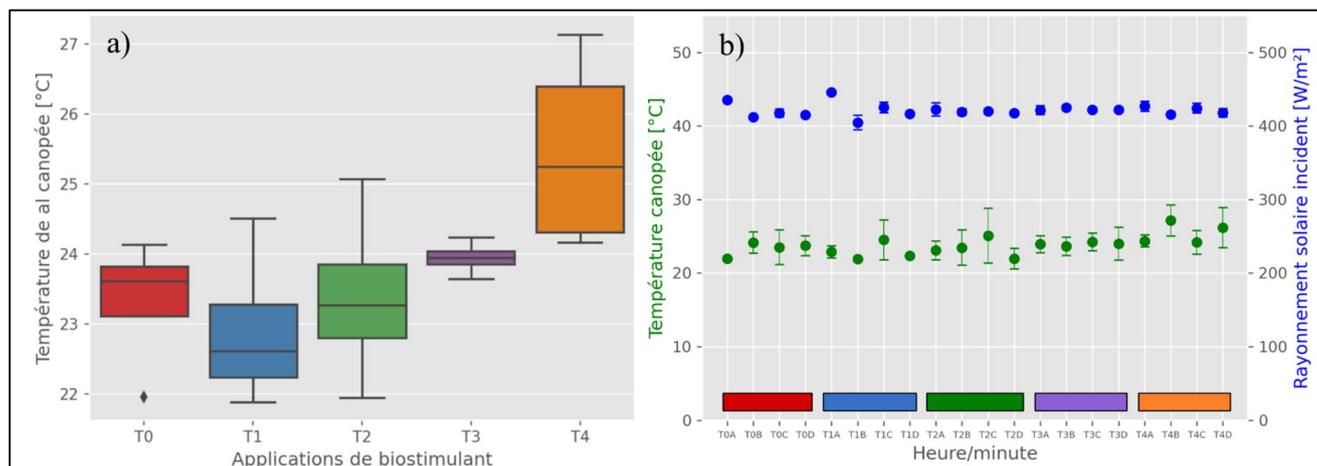


Figure 31 : Température de la canopée en fonction du traitement (a) et en fonction de la micro-parcelle étudiée et du rayonnement solaire incident (b). T0 représente le témoin sans application de biostimulant.

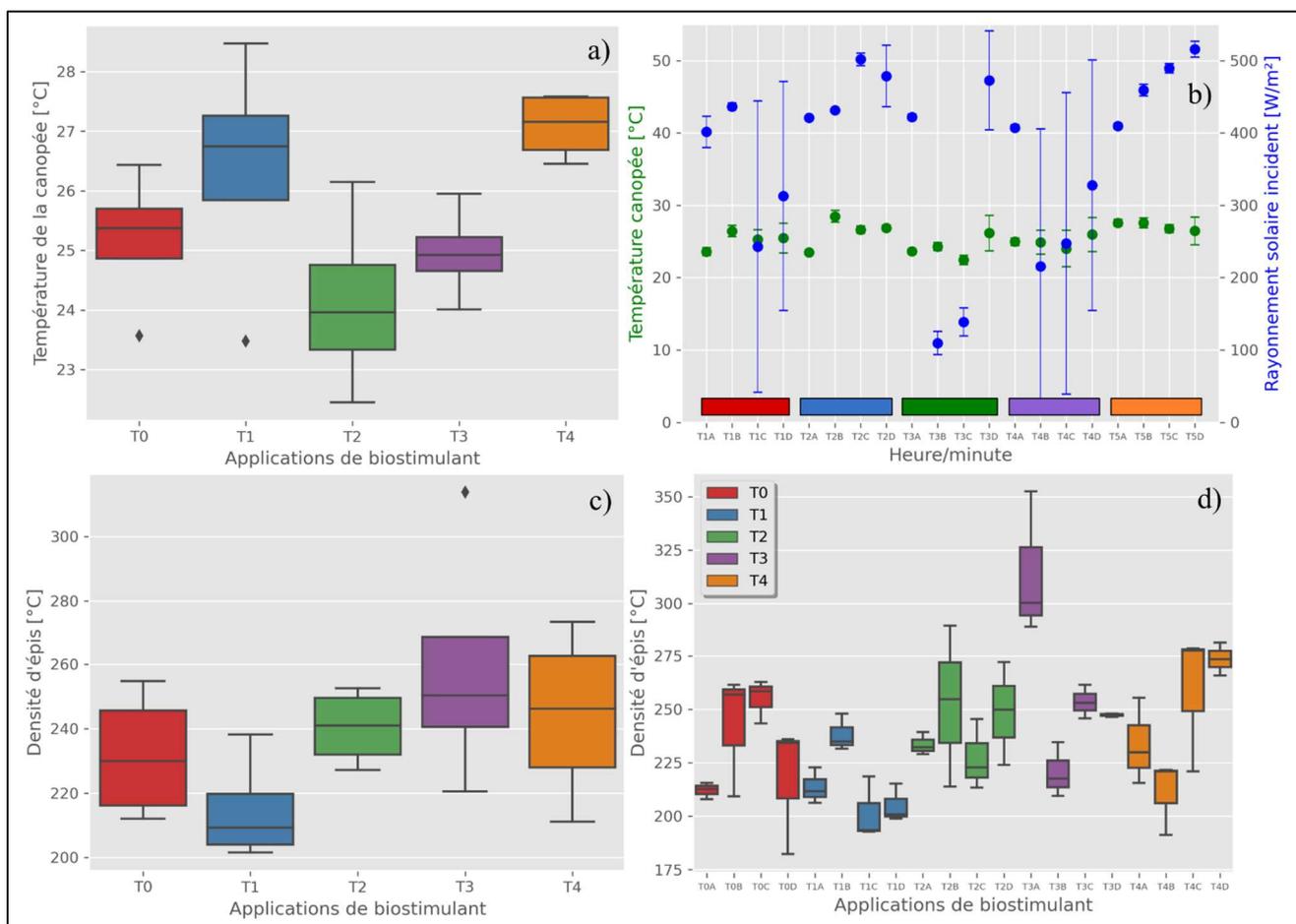


Figure 32 : Température de la canopée en fonction du traitement (a) et de la micro-parcelle étudiée (b). Densité d'épis fonction du traitement (c) et en fonction de la micro-parcelle étudiée (d). T0 représente le témoin sans application de biostimulant.

3.2. Tendances observées

3.2.1. Stades BBCH 30 et 33

Les deux premières sessions d'acquisition ont démontré deux tendances majoritaires sur les différents traits morphologiques et physiologiques étudiés (**Figure 33**). L'ensemble des indicateurs ont exprimé un apport positif en moyenne du traitement 1 (T1) comparé au témoin de l'expérimentation (T0). A l'opposé, un impact nul, voire négatif du traitement 4 (T4) est observé par rapport au témoin. Il s'agissait des deux traitements ayant été appliqués en premier sur la culture, juste après le semis, le 19 novembre 2021. Le traitement 4 (T4) a même encore été appliqué une deuxième fois le 6 janvier 2022. Une des causes possibles des moyennes légèrement plus faibles du traitement 4 pourrait être cette double application. Au stade 30, les valeurs de CWSI sont supérieures à 1, cela étant dû à une mauvaise acclimatation des références aux conditions environnementales (**a**). L'ensemble des indices montrent le même comportement et appuient la différence significative mise en avant à ce stade par la température de la canopée (point 3.1.). Le traitement 2 et 3 montrent une grande variabilité et sont supérieurs en moyenne au témoin pour le ratio de vert et de feuilles (**b et c**). Au stade 33, seul le CWSI ne présente pas les mêmes tendances qu'au stade précédent. Le traitement 3 (T3) montrait un avantage en termes de CWSI. Il venait d'être réappliqué la veille de la première session le 27 avril. Ceci peut expliquer le fait que les autres indices ne montrent pas encore d'améliorations. Cette différence de CWSI peut également être due aux variations environnementales sur les micro-parcelles traitées par ce biostimulant (**Annexes Figure 42**). Entre les deux sessions d'acquisition, l'augmentation du NDVI et du ratio de feuilles est causée par le développement des plants de froment. La diminution du ratio de vert (**d**), malgré l'augmentation du nombre de feuilles, peut être due au stress hydrique qui diminue la quantité de chlorophylle dans les feuilles.

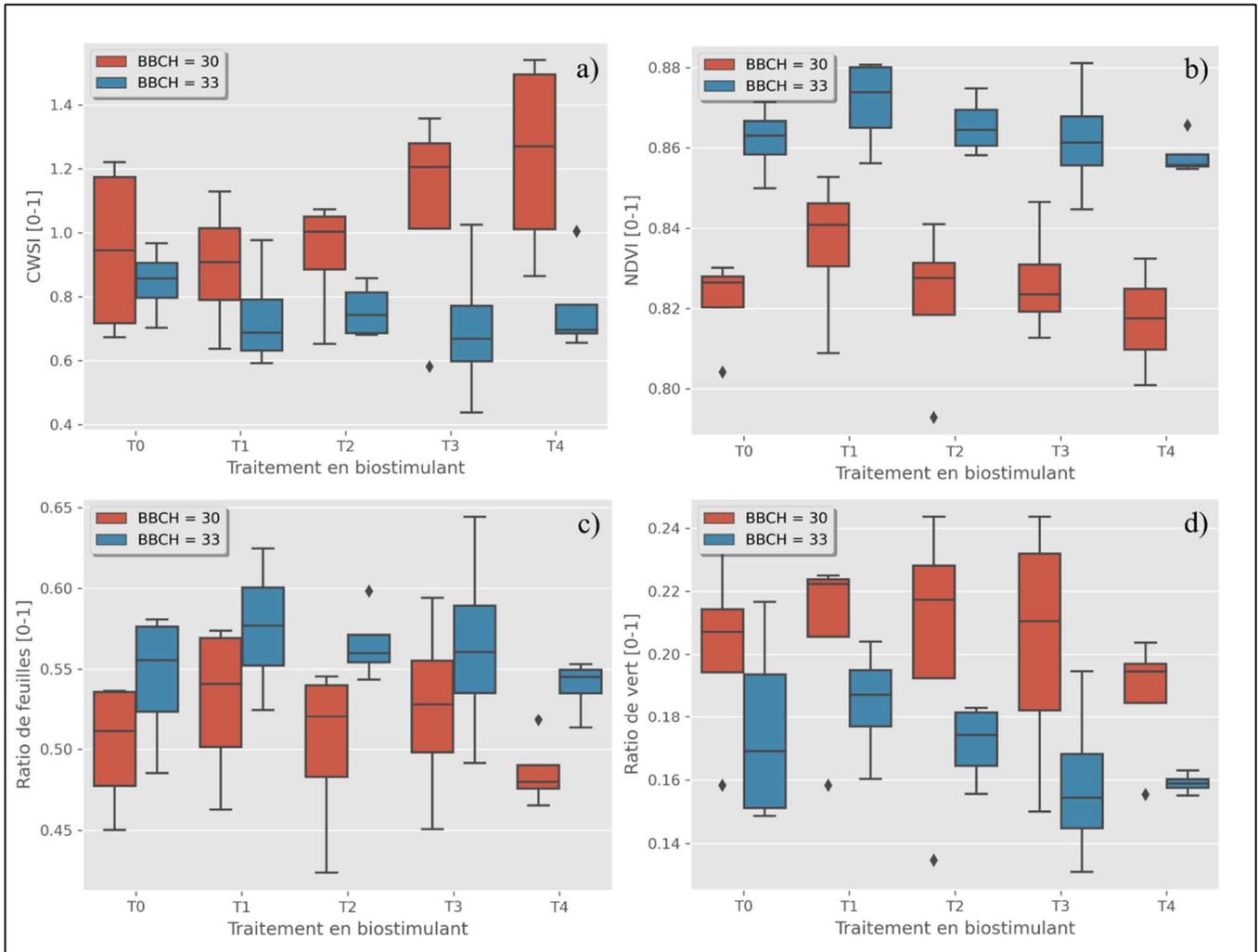


Figure 33 : Comparaison entre les stades 30 et 33 de la variation du CWSI (a), du NDVI (b), du ratio de feuilles (c) et de vert (d) dans l'image entre les différents traitements, T0 étant le témoin.

3.2.2. Stades BBCH 65 et 72

Lors de la troisième session d'acquisition au stade 65, tous les traitements azotés ainsi que toutes les applications de biostimulant ont été réalisés. Le froment réalisait sa floraison et se dirige vers le stade de développement du grain (72) (**Figure 34**). La densité d'épis (e) montre un comportement au stade 65 qui concorde avec le CWSI mesuré (a). Un CWSI plus faible a été observé avec une densité d'épis plus forte chez le traitement 4 (T4). Le traitement 1 (T1) et 2 (T2) qui possèdent le CWSI le plus haut ont, quant à eux, une densité d'épis moyenne plus faible. Le 4^{ème} traitement a montré un CWSI plus faible et des valeurs légèrement plus hautes pour les autres indices à l'exception du ratio de vert (d). A ce stade les différences sont faibles entre les traitements. Le ratio de vert plus faible pour le traitement 4 peut être lié à sa densité d'épis plus importante dans l'image ou à des variations de l'ensoleillement sur ses feuilles. Au stade 72, les valeurs de CWSI présentant une grande variabilité, il fut donc difficile d'en tirer une tendance. Les autres indicateurs étaient assez contrastés avec le NDVI (b) qui montrait des signes bénéfiques avec le traitement 1 et 2 (T1-T2). La densité d'épis était quant à elle plus importante pour le traitement 2 et (T2). Ils présentent

également un CWSI légèrement plus faible en moyenne, ce qui suit le même principe qu'au stade précédent. Entre les deux stades, le NDVI et le ratio de vert ont diminué avec l'augmentation de la densité des épis. Le CWSI est resté constant tandis que le ratio de feuilles a augmenté.

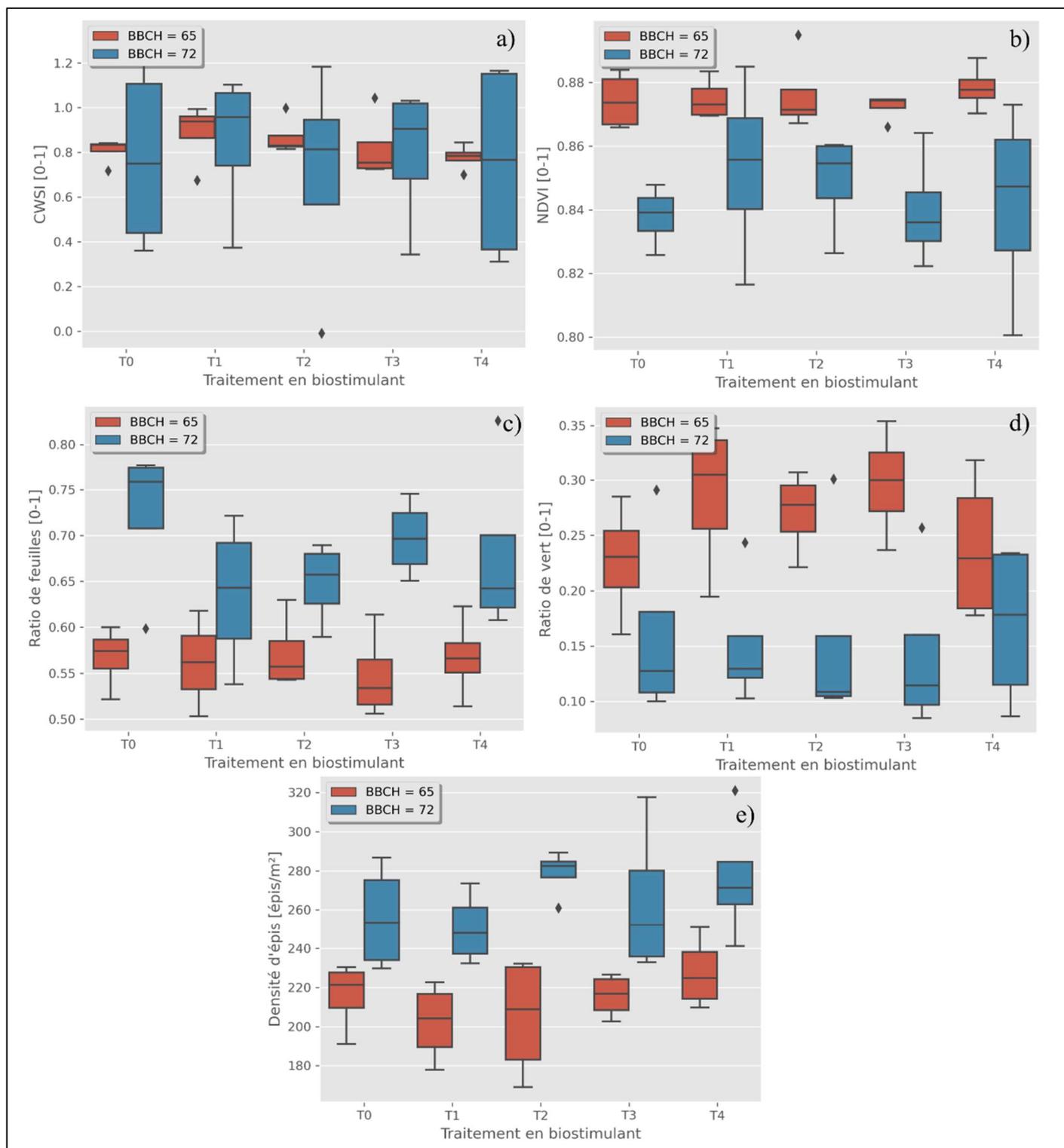


Figure 34 : Comparaison entre les stades 65 et 72 de la variation du CWSI (a), du NDVI (b), du ratio de feuilles (c) et de vert (d) dans l'image et de la densité d'épis (e) entre les différents traitements, T0 étant le témoin.

3.2.3. Stades BBCH 73-75 et 79

Durant ces deux stades, le grain a continué son développement (**Figure 35**). Le stade 73-75 ne montre pas de tendance au niveau du CWSI (**a**). La densité d'épis pour le traitement 2 (T2) a diminué en passant 280 épis/m² au stade 72 à 240 ce stade-ci (**e**). Une des causes est le recouvrement des épis lorsque ces derniers en occultent d'autres après leur affaissement à la fin de leur développement. Un ratio de vert (**d**) plus important est observé pour le traitement 4 (T4). Davantage d'épis détectés peuvent jouer sur la valeur de vert détectée, cependant elle présente tout de même un ratio de feuilles (**c**) plus élevé en moyenne. Lors de la dernière session d'acquisition, les plants de froment étaient déjà rentrés en sénescence comme le montre le ratio de vert qui a diminué. Dans ce cas-ci le CWSI n'a plus de cohérence car les plantes ne sont plus un matériau vivant capable de transpiration. Le traitement 2 (T2) présentait un ratio de vert plus important en moyenne que l'ensemble des autres traitements. Davantage de feuilles sont restées vertes plus longtemps, comparé aux autres applications. Cette dernière présentait également un NDVI (**b**) et un ratio de feuilles supérieurs au témoin. Le premier traitement qui montrait un impact positif en début d'expérimentation montre maintenant le moins de différence avec le témoin. La densité d'épis montre, quant à elle, plus ou moins la même valeur moyenne pour les trois autres applications, le traitement 3 (T3) montrant une grande variabilité. La variabilité du rayonnement a encore une fois pu changer la valeur des indices observés (**Annexes Figure 42**).

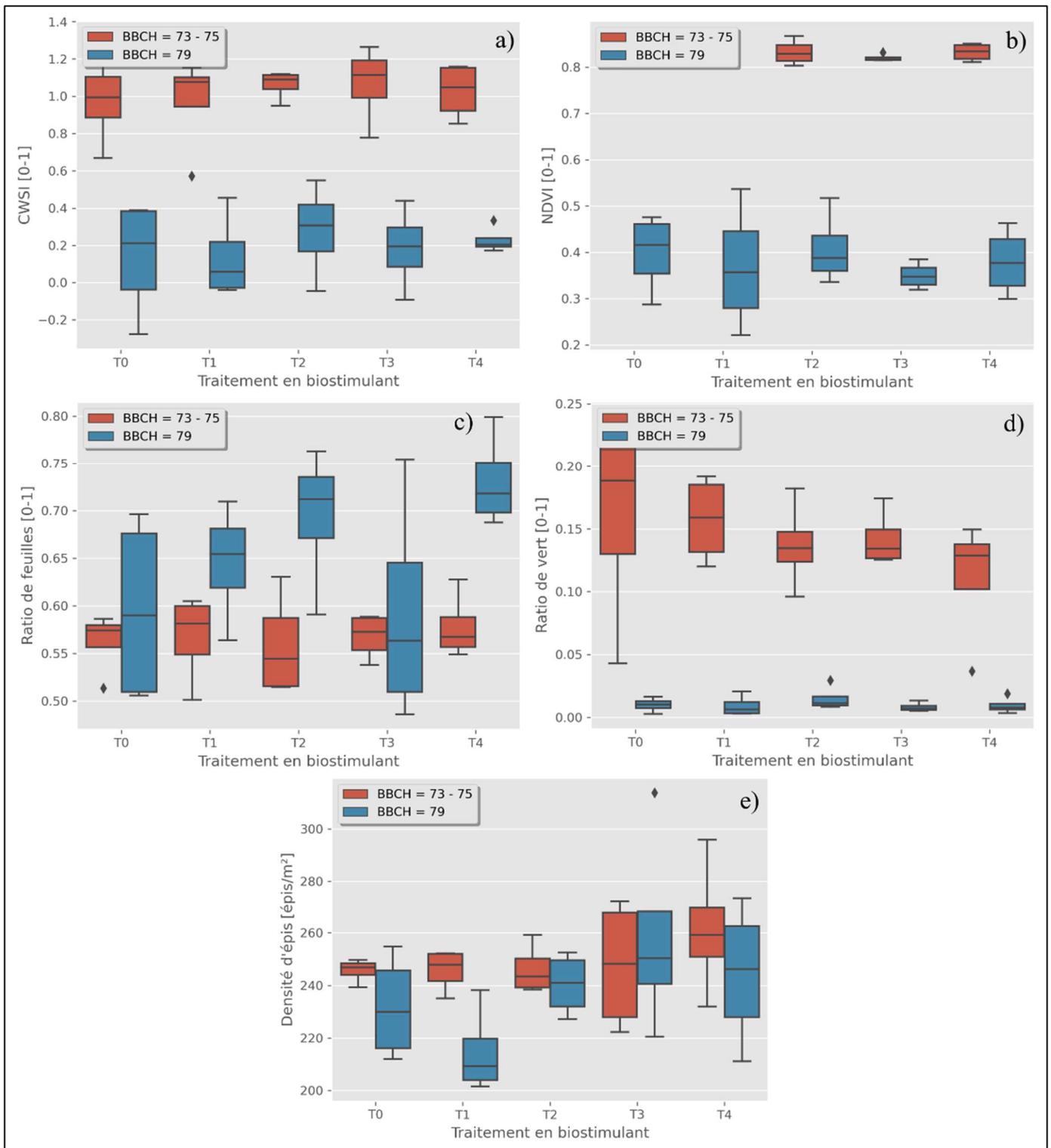


Figure 35 : Comparaison entre les stades 73-75 et 79 de la variation du CWSI (a), du NDVI (b), du ratio de feuilles (c) et de vert (d) dans l'image et de la densité d'épis (e) entre les différents traitements, T0 étant le témoin.

3.2.4. Résumé des tendances

Les stades 30 et 33 ont montré des signes positifs sur la majorité des indicateurs pour le traitement 1. Avec l'épiaison et la floraison au stade 65, les indicateurs ont renseigné des tendances bénéfiques différentes entre les applications. Le traitement 4 a pris le pas sur le premier, hormis pour le ratio de vert dans l'image. Au stade 72, le traitement 2 s'est avéré bénéfique concernant le NDVI ainsi que la densité d'épis. Le traitement 4 montrait une amélioration pour le ratio de vert et la densité d'épis. Au stade 73-75, le traitement 4 se distingue uniquement avec une haute densité d'épis, mais un ratio de vert faible. Au dernier stade (79), les biostimulants 3 et 4 ont montré une densité d'épis supérieure. Le traitement 1 montrait un CWSI plus faible et un ratio de vert et de feuilles plus important. L'indice de stress hydrique des cultures n'a pas permis de mesurer une différence significative dû à sa variabilité (**Figure 36**). Le système de référence ne parvenait pas à normaliser les fortes variations de température de canopée. La différence est visible entre le stade 33 et le stade 72 où la variation de rayonnement solaire incident a été plus importante. Pour le stade 30, elle a indiqué la même tendance que les autres indices, possiblement par coïncidence. Pour les stades 33 et 65, l'indice montre une valeur légèrement plus faible pour le traitement 3, qui est un des traitements qui a montré une tendance positive pour la densité d'épis en fin d'expérimentation. Il est compliqué de déterminer si un biostimulant a permis de limiter le stress hydrique subi par la plante tout au long de l'expérimentation. Ces derniers ne sont pas appliqués au même moment, et le résultat sur la culture peut être perçu avec un délai entre les traitements. Ils peuvent également avoir des effets sur des traits morphologiques différents chez la plante selon leur nature qui n'est ici, pas connue. Une solution pour déterminer le meilleur biostimulant serait de comparer le rendement en grain pour chaque traitement avec la densité d'épis mesurée lors de la dernière session d'acquisition.

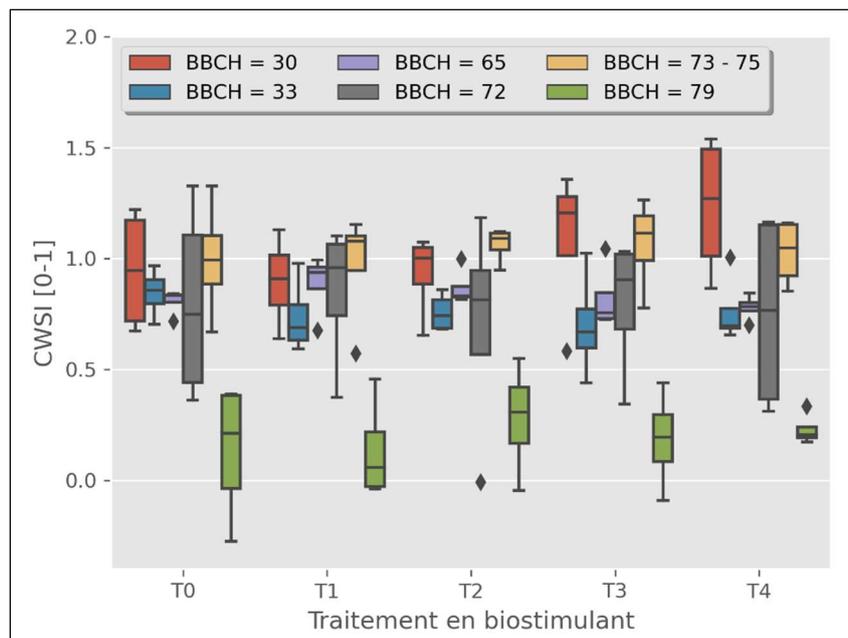


Figure 36 : Variation du CWSI lors des 6 sessions d'acquisition pour chaque traitement, T0 étant le témoin.

D. Conclusions et perspectives

1. Conclusions

Il s'agissait d'une approche exploratoire afin d'adapter un système de référence de mesure du stress hydrique sur un système de phénotypage de proximité en vue zénithale. Un nouveau système de référence sec et humide, inspiré de la littérature, a été imaginé et construit. Plusieurs matériaux ont été testés afin de définir celui qui pourrait imiter au mieux les propriétés de la canopée. Un algorithme original capable d'extraire l'information utile des références de manière automatique a été mis en place. Ce dernier a permis le calcul des indices de stress hydrique tels que le CWSI et le IG. Le comportement thermique d'une canopée de froment a été étudié en parallèle de plusieurs paramètres qui en ont été extraits. Le système de référence a été testé afin de savoir s'il pouvait être utilisé dans un contexte expérimental afin de déterminer une différence de stress entre plusieurs applications de biostimulant. Bien que presque aucune différence significative n'a été observée à partir des indices extraits par le système, ces derniers ont permis de comparer les différents traitements. Des tendances positives ont pu être observées entre les applications. Cette étude a permis de comprendre les différentes facettes de l'imagerie thermique ainsi que ses limites et celles du nouveau système de référence créé. Plusieurs points d'amélioration peuvent être imaginés dans le but d'améliorer le système ou d'avoir une meilleure idée de son fonctionnement réel et de sa qualité.

2. Perspectives

2.1. Expérimentation

Le premier point d'amélioration est tourné vers l'expérimentation et l'application de ce système. Les biostimulants peuvent avoir des effets bénéfiques sur les cultures mais ceux-ci ne sont pas flagrants au niveau du stress hydrique mesuré. Il est également possible que les biostimulants testés n'aient aucun effet. Dans le cas d'une étude sous différents régimes hydriques, une meilleure idée de la qualité du système pourrait être obtenue (Shoa et al., 2021). Cette nouvelle étude conserverait l'utilisation de serres pour protéger d'un apport supplémentaire d'eau les cultures sous stress. Des différences de stress plus importantes pourraient ainsi être déterminées. Pour le système d'acquisition, la table de la structure doit pouvoir être suffisamment grande que pour pouvoir acquérir des images au centre de la micro-parcelle sans endommager les plants de froment. Ceci permettrait d'éviter tout effet de bord lors des mesures et d'augmenter la stabilité des mesures. Sur les micro-parcelles, ce sont trois images qui ont été prises en déplaçant le système pour prendre en compte l'hétérogénéité du sol. Trois images auraient également dû être réalisées à chaque position différente pour prendre en compte l'erreur de 2°C présente lors de la prise

de mesure par la caméra thermique. Ceci pourrait réduire davantage la variabilité des mesures sur la canopée et les références. La température au soleil et à l'ombre ont pu être séparées afin d'obtenir deux températures distinctes. Le même procédé pourrait être réalisé sur les références afin de séparer leurs températures. Ce serait un CWSI au soleil ainsi qu'un CWSI à l'ombre qui pourraient être obtenus.

La méthode de détermination du CWSI à l'aide des variables environnementales pourrait être implémentée pour réaliser une comparaison avec les valeurs obtenues à l'aide du système de référence. Cette dernière nécessite cependant des mesures du rayonnement net (W/m^2), de la vitesse du vent (m/s), de l'humidité relative (%) et de la température de l'air avec une haute fréquence (Kar & Kumar, 2010; Maes & Steppe, 2012; Prashar & Jones, 2014).

Pour définir si le système permettait de calculer efficacement le stress hydrique, une approche par l'estimation de la conductance stomatique a été imaginée. Des mesures prises à l'aide d'un Licor ou d'un AP4 poromètre renseignent la conductance stomatique à l'eau des feuilles étudiées ($mmol/m^2/s$). A partir des températures sèche, humide et de canopée, il aurait été possible d'approximer la valeur de conductance stomatique (Iseki & Olaleye, 2020; H. Jones et al., 2002; Leinonen et al., 2006; Maes & Steppe, 2012).

2.2. Système de référence et détection

La détection des références n'a été réalisée que sur base de l'image thermique car le système de référence perturbait l'étape d'alignement des images. Les tuyaux d'irrigation présents sur la parcelle de Redebel possédaient une température semblable à celle du support de couleur noire. Cet inconvénient a rendu la détection du système par une méthode de seuillage bien plus complexe à mettre en œuvre. Dans ces conditions la forme d'une demi-sphère s'est révélé être une solution pour détecter les références sur la seule base d'une information 8 bits. Cependant, les résultats ont démontré que les références sèche et humide présentaient une variabilité différente de leur température comparées à la canopée étudiée. Une forme plus adaptée qu'une demi-sphère peut être imaginée. Cette dernière nécessite cependant d'avoir accès aux informations fournies par les autres capteurs du montant. La référence doit alors être placée dans l'image alignée, même si ceci mène à une perte d'informations concernant la température de la canopée ainsi que les autres traits morphologiques et physiologiques étudiés. La procédure d'alignement doit, dans ce cas, être adaptée afin de ne pas trop déformer le système de référence. Ce n'est pas la seule procédure qui doit être adaptée, vu qu'il faut s'assurer que les différents masques créés soient toujours conformes. Une fois le traitement des images adapté à la présence du système, une détection plus précise et stable pourrait être réalisée. Une forme semblable à celle utilisée par Shoa et al. (2020) pourrait être imaginée. Ce dernier a réalisé de fausses feuilles construites à partir de fils de fer et d'un tissu vert semblable à du nylon. Plusieurs

références humides dans différentes positions étaient utilisées afin de prendre en compte la diversité de la canopée dans le calcul de la température. Dans certains cas, des feuilles ou des épis passaient devant les demi-sphères. L'algorithme arrivait dans la majorité des cas à correctement détecter les références. Il incluait alors la température de la feuille avec la partie non occultée de la demi-sphère pour obtenir T_{sec} . Une méthode de seuillage aurait permis de les séparer mais aurait modifié la température des autres demi-sphères non occultées. Avec l'image alignée et le masque de la canopée, ce genre de désagrément peut être évité, pour autant que la référence y soit incluse.

Dans le cas où l'apparence du prototype qui a été imaginé est conservée, plusieurs améliorations peuvent lui être apportées. La détection présente déjà de bons résultats avec la référence humide. Le matériau noir du support apparaît comme une des températures les plus chaudes dans l'image avec les tuyaux d'irrigation. La référence humide ayant la température la plus basse, le contraste important permet une meilleure détection. En ce qui concerne la référence sèche, la détection a tendance à prendre en compte les bords du support circulaire qui est sous la référence sèche. Afin de diminuer cet inconvénient, un support identique pourrait être instauré pour les deux références. Pour aider la détection, une couleur de support plus claire pourrait diminuer sa température et augmenter le contraste avec la référence sèche. En ce qui concerne le matériau utilisé, le matériau C pourrait être retesté en conditions réelles. C'est celui qui avait montré les résultats les plus probants lors des séries temporelles. Un nouveau matériau spongieux avec une capacité calorifique et des propriétés spectrales semblables à celle des feuilles de froment pourrait être recherché. Ce matériau devrait également ne pas être impacté par de la moisissure ou d'autres dégradations. Le matériau A majoritairement utilisé a présenté un léger pâlissement à la fin des expérimentations. Pour ne pas impacter l'étude, ce dernier a été remplacé par un matériau A intact.

En ce qui concerne le coloris utilisé, une couleur unique définie avant acquisition en photographiant la canopée pourrait être envisagée. Cette méthode nécessiterait de devoir préparer rapidement une référence adaptée. Plusieurs demi-sphères d'un coloris vert différent préparées à l'avance pourraient être créées. Celle dont la couleur se rapproche le plus de la canopée serait alors implémentée lors de l'expérimentation. Un système avec plusieurs couleurs spécifiques insérées simultanément dans l'image pourrait être implémenté. Un dernier point d'amélioration serait l'anticipation de l'assombrissement du matériau après humidification. Un matériau légèrement plus clair serait utilisé pour la référence humide.

2.3. Mesure de l'émissivité

Dans cette expérimentation, la notion d'émissivité a été négligée en prenant une valeur de 1. Il n'était pas possible de modifier ce facteur à partir de la librairie Python qui contrôlait l'acquisition des images. Une approximation a été faite en considérant dès lors les corps étudiés comme des corps noirs. Leur facteur d'émissivité réelle est situé entre 0.94 et 0.99 pour une plante. La température mesurée par la caméra (température de brillance) est donc supérieure à la température réelle des corps. Il faut également retirer le rayonnement des corps alentours réfléchi par les objets étudiés vers la caméra. Ceci nécessite de connaître la valeur d'émissivité de l'objet d'intérêt. Pour la mesurer, la comparaison entre la mesure d'un thermocouple et celle fournie par la caméra peut être utilisée. A l'aide du logiciel d'utilisation de la caméra, l'émissivité est modifiée jusqu'à atteindre la même température que celle délivrée par le thermocouple. L'émissivité obtenue reste celle d'une feuille et non celle d'une canopée qui peut s'avérer être différente et beaucoup plus complexe à définir. Si cette émissivité est détenue, plusieurs articles ont utilisé une méthode pour corriger la mesure de température (Bulanon et al., 2008; Leinonen & Jones, 2004; Pou et al., 2014; Shoa et al., 2020, 2021). Ces derniers ont utilisé un matériau avec une faible émissivité tel que de l'aluminium froissé afin de mesurer uniquement le rayonnement réfléchi et la température dite « d'arrière-plan ». A partir de l'émissivité et de cette température, la mesure de la caméra peut être corrigée pour obtenir la température réelle des objets étudiés (Eq.6). En vue zénithale, la température d'arrière-plan renseigne majoritairement la température du ciel qui est beaucoup plus froide. Lors des tests, ceci modifiait énormément l'image thermique et perturbait la détection des références. Cette méthode pourrait être intégrée en modifiant la méthode de détection et en calculant l'indice d'émissivité.

$$T_r = \sqrt[4]{\frac{T_{br}^4 - (1 - \varepsilon)T_{ap}^4}{\varepsilon}} \quad (6)$$

Où :

- T_r = Température réelle (°C)
- T_{br} = Température de brillance (°C)
- T_{ap} = Température d'arrière-plan (°C)
- ε = Facteur d'émissivité

E. Annexes

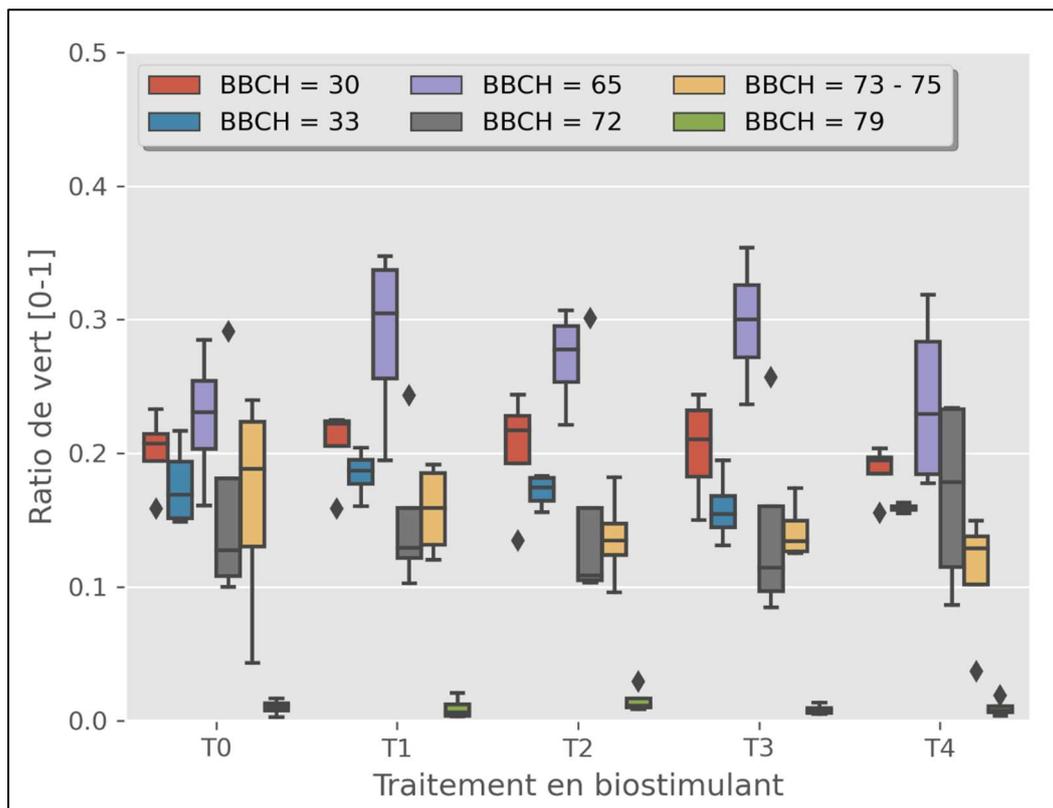


Figure 37 : Variation du ratio de vert lors des 6 sessions d'acquisition pour chaque traitement, T0 étant le témoin.

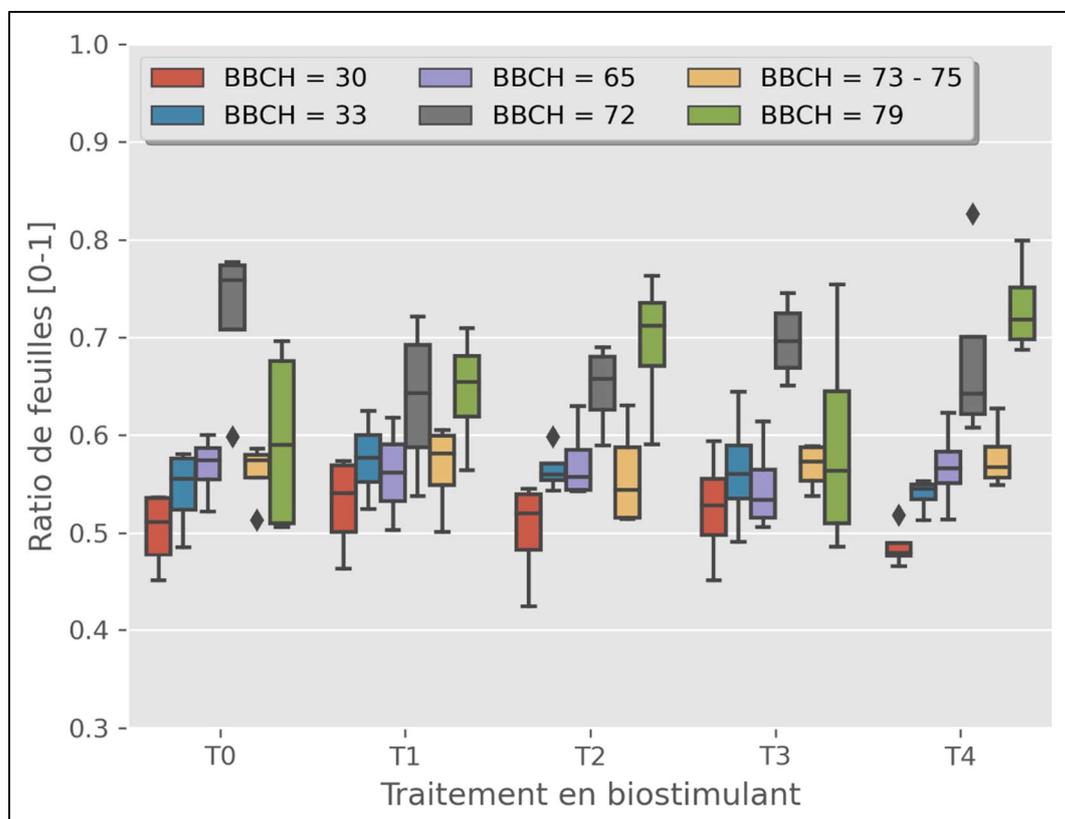


Figure 38 : Variation du ratio de feuilles lors des 6 sessions d'acquisition pour chaque traitement, T0 étant le témoin.

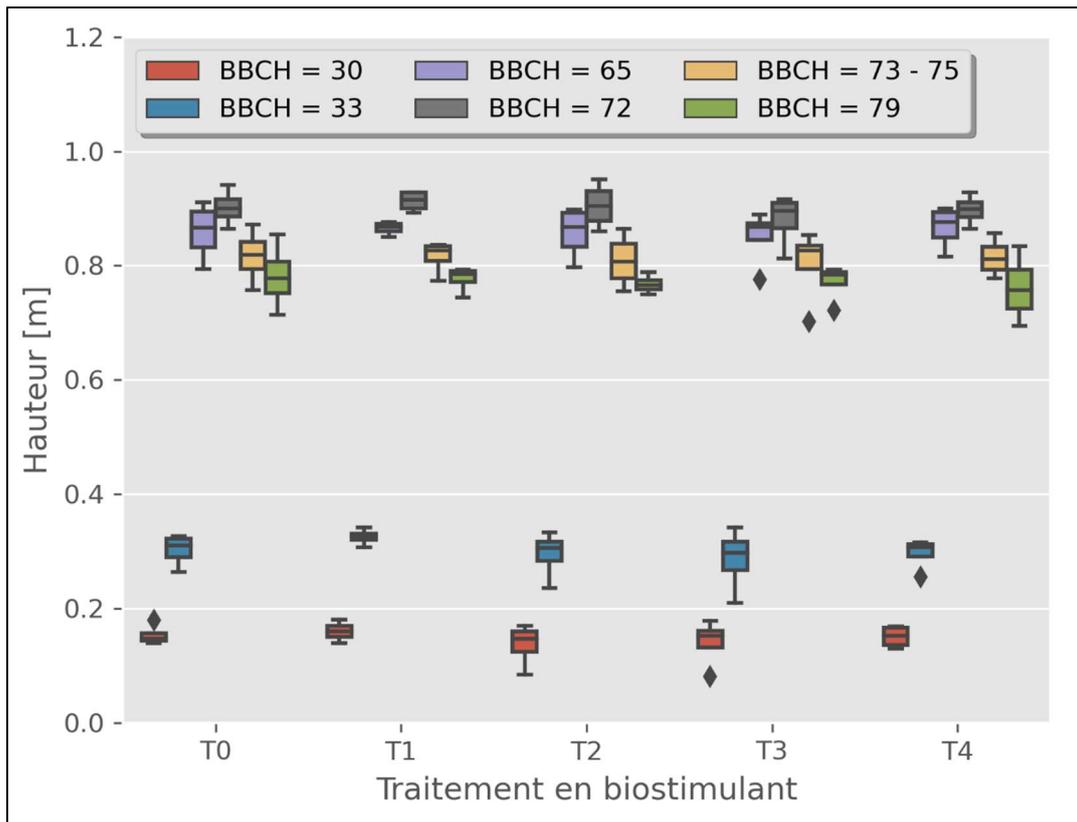


Figure 39 : Variation de la hauteur lors des 6 sessions d'acquisition pour chaque traitement, T0 étant le témoin.

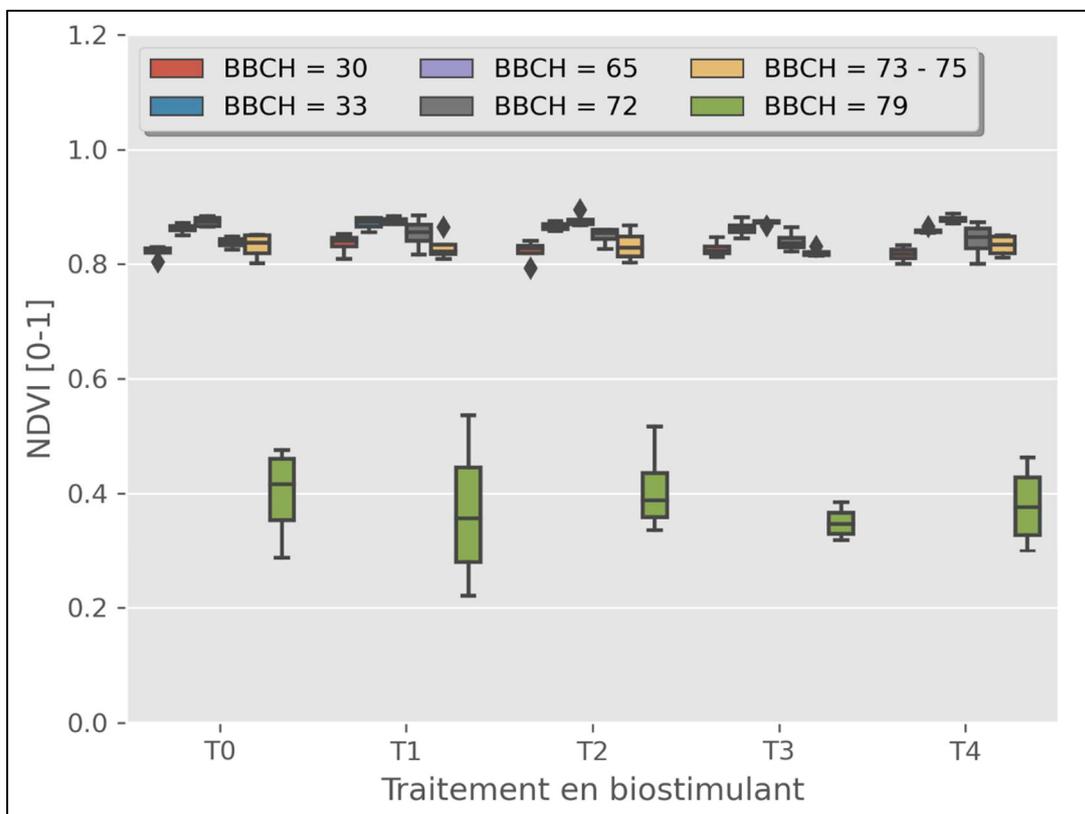


Figure 40 : Variation du NDVI lors des 6 sessions d'acquisition pour chaque traitement, T0 étant le témoin.

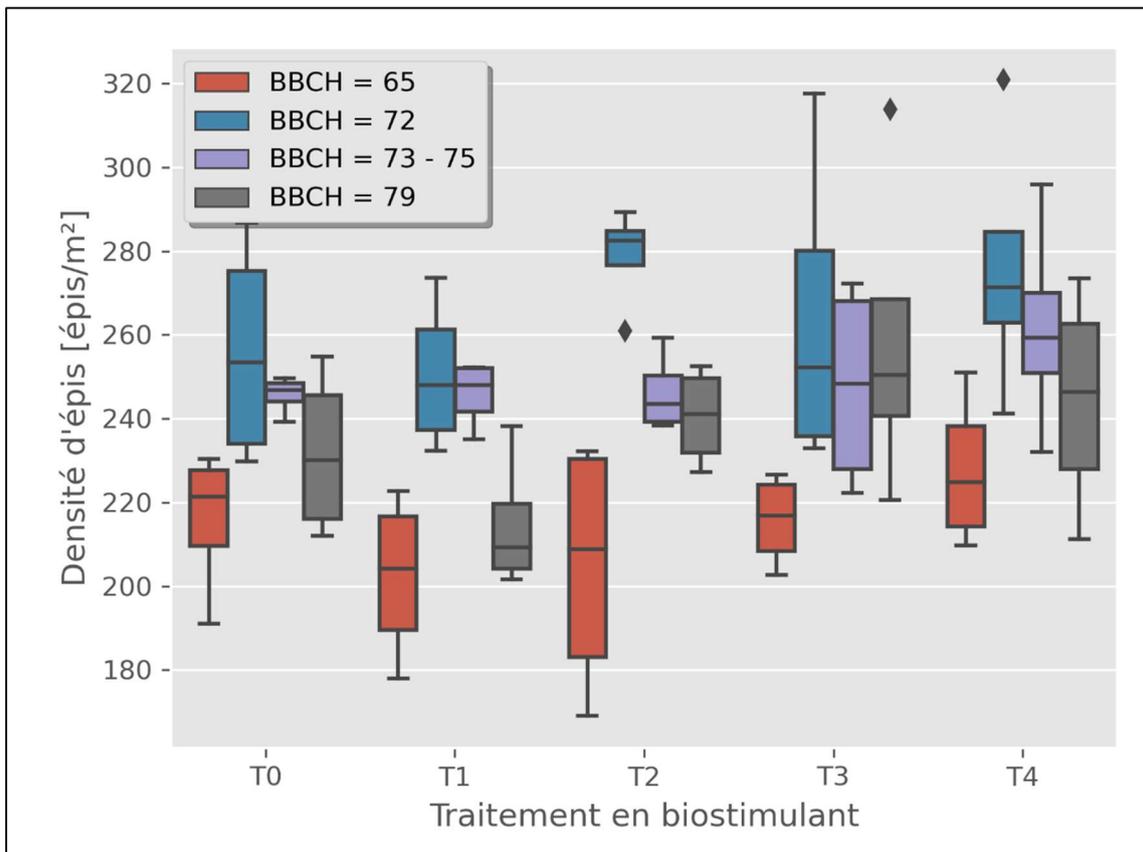


Figure 41 : Variation de la densité d'épis lors des 6 sessions d'acquisition pour chaque traitement, T0 étant le témoin.

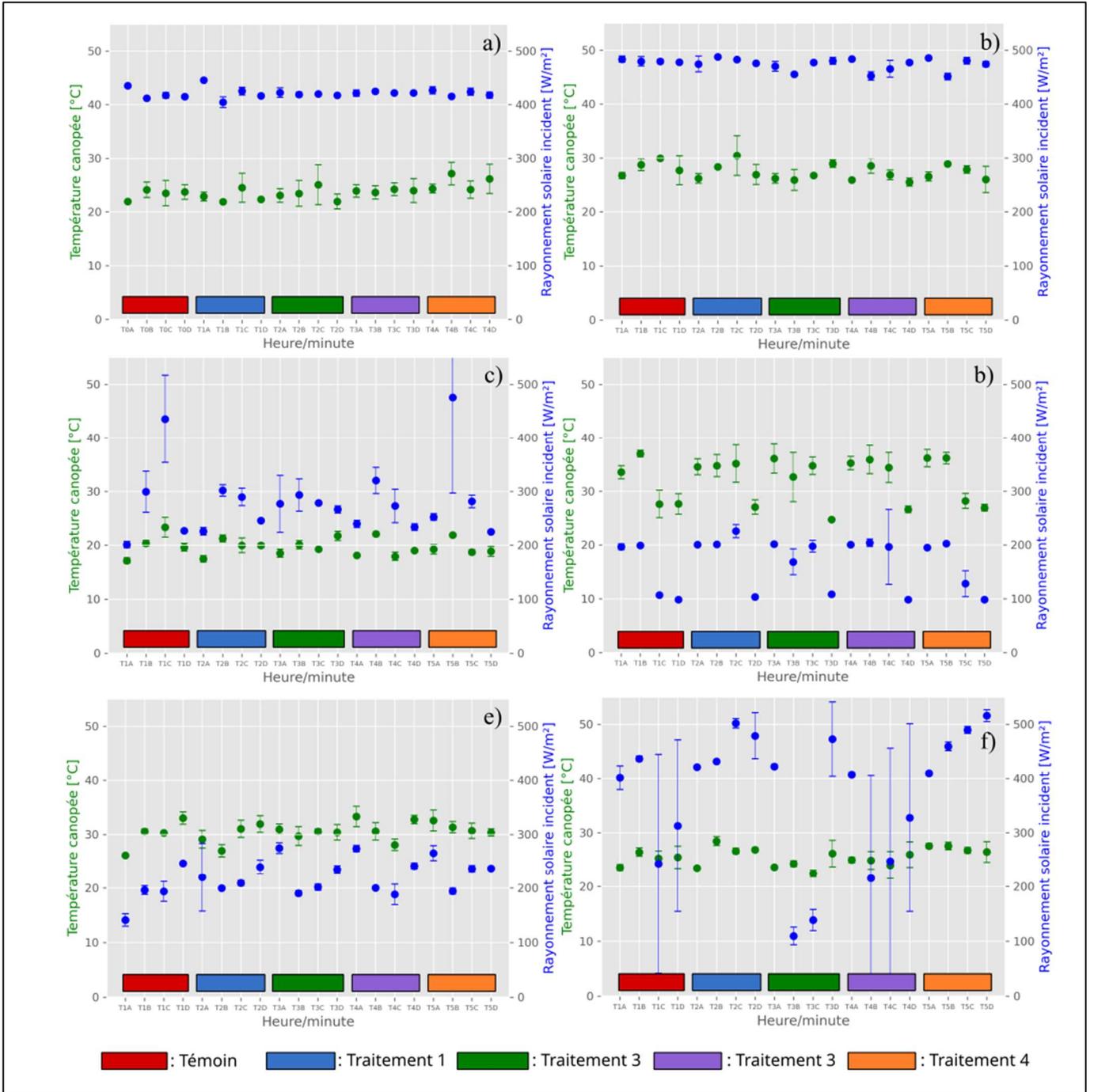


Figure 42 : Température de la canopée et rayonnement solaire incident en fonction de la micro-parcelle étudiée à Redebel aux stades BBCH 30 (a), 33 (b), 65 (c), 72 (d), 73-75 (e), 79 (f).

F. Bibliographie

- Abioye, E. A., Abidin, M. S. Z., Mahmud, M. S. A., Buyamin, S., Ishak, M. H. I., Rahman, M. K. I. A., Otuoze, A. O., Onotu, P., & Ramli, M. S. A. (2020). A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, *173*, 105441. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105441>
- Allahverdiyev, T. I., M.Talai, J., Huseynova, I. M., & A.Aliyev, J. (2015). Effect of drought stress on some physiological parameters, yield, yield components of durum (*Triticum durum* desf.) and bread (*Triticum aestivum* L.) wheat genotypes. *Ekin Journal of Crop Breeding and Genetics*, *1*(1), 50-62.
- Andrews, P. K., Chalmers, D. J., & Moremong, M. (1992). Canopy-Air Temperature Differences and Soil Water as Predictors of Water Stress of Apple Trees Grown in a Humid, Temperate Climate. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, *117*(3), 453.
- Apolo-Apolo, O. E., Martínez-Guanter, J., Pérez-Ruiz, M., & Egea, G. (2020). Design and assessment of new artificial reference surfaces for real time monitoring of crop water stress index in maize. *Agricultural Water Management*, *240*, 106304. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106304>
- Bajwa, S. G., & Vories, E. D. (2007). Spatial analysis of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) canopy responses to irrigation in a moderately humid area. *Irrigation Science*, *25*(4), 429-441. <https://doi.org/10.1007/s00271-006-0058-4>
- Baluja, J., Diago, M. P., Balda, P., Zorer, R., Meggio, F., Morales, F., & Tardaguila, J. (2012). Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Irrigation Science*, *30*(6), 511-522. <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0382-9>
- Baranowski, P., Mazurek, W., Wozniak, J., & Majewska, U. (2012). Detection of early bruises in apples using hyperspectral data and thermal imaging. *Journal of Food Engineering*, *110*(3), 345-355. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.12.038>

- Bellvert, J., Zarco-Tejada, P. j., Marsal, J., Girona, J., González-Dugo, V., & Fereres, E. (2016). Vineyard irrigation scheduling based on airborne thermal imagery and water potential thresholds. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 22(2), 307-315. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12173>
- Boccardi, S., Boffa, N. D., Carlomagno, G. M., Maio, L., Meola, C., & Ricci, F. (2015). Infrared thermography and ultrasonics to evaluate composite materials for aeronautical applications. *Journal of Physics: Conference Series*, 658, 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/658/1/012007>
- Bodnar, J. luc. (2009). *Le contrôle des matériaux par méthodes optiques infrarouges* (p. 232-296).
- Broberg, M. C., Högy, P., Feng, Z., & Pleijel, H. (2019). Effects of Elevated CO₂ on Wheat Yield : Non-Linear Response and Relation to Site Productivity. *Agronomy*, 9(5), 243. <https://doi.org/10.3390/agronomy9050243>
- Bulanon, D. M., Burks, T. F., & Alchanatis, V. (2008). Study on temporal variation in citrus canopy using thermal imaging for citrus fruit detection. *Biosystems Engineering*, 101(2), 161-171. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.08.002>
- Caretta, M. A., Mukherji, A., Arfanuzzaman, M., Betts, R. A., Gelfan, A., Hirabayashi, Y., Lissner, T. K., Lopez Gunn, E., Liu, J., Morgan, R., Mwanga, S., & Supratid, S. (2022). Water. In H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. M. B. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, & B. Rama (Éds.), *Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Chelladurai, V., Jayas, D. S., & White, N. D. G. (2010). Thermal imaging for detecting fungal infection in stored wheat. *Journal of Stored Products Research*, 46(3), 174-179. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2010.04.002>
- Clawson, K. L., & Blad, B. L. (1982). Infrared Thermometry for Scheduling Irrigation of Corn1. *Agronomy Journal*, 74(2), 311-316. <https://doi.org/10.2134/agronj1982.00021962007400020013x>

- Clawson, K. L., Jackson, R. D., & Pinter Jr., P. J. (1989). Evaluating Plant Water Stress with Canopy Temperature Differences. *Agronomy Journal*, *81*(6), 858-863.
<https://doi.org/10.2134/agronj1989.00021962008100060004x>
- Cohen, Y., Alchanatis, V., Meron, M., Saranga, Y., & Tsipris, J. (2005). Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis*. *Journal of Experimental Botany*, *56*(417), 1843-1852. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri174>
- Cointault, F., Journaux, L., Miteran, J., & Destain, M.-F. (2008). *Improvements of image processing for wheat ear counting*. International Conference on Agricultural Engineering.
<https://orbi.uliege.be/handle/2268/30556>
- Costa, J. M., Grant, O. M., & Chaves, M. M. (2013). Thermography to explore plant–environment interactions. *Journal of Experimental Botany*, *64*(13), 3937-3949.
<https://doi.org/10.1093/jxb/ert029>
- 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. *Frontiers in Plant Science*, *11*, 96.
<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.
<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. <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.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107161>
- Das, S., Chapman, S., Christopher, J., Choudhury, M. R., Menzies, N. W., Apan, A., & Dang, Y. P. (2021). UAV-thermal imaging : A technological breakthrough for monitoring and quantifying

crop abiotic stress to help sustain productivity on sodic soils – A case review on wheat. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 23, 100583.

<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100583>

Das, S., Christopher, J., Apan, A., Choudhury, M. R., Chapman, S., Menzies, N. W., & Dang, Y. P.

(2021). Evaluation of water status of wheat genotypes to aid prediction of yield on sodic soils using UAV-thermal imaging and machine learning. *Agricultural and Forest Meteorology*, 307,

108477. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108477>

Datcu, S. (2002). Quantification des déperditions thermiques des bâtiments par thermographie infrarouge

[Thesis, Paris 12]. In <Http://www.theses.fr>. <http://www.theses.fr/2002PA120071>

Debaeke, P., & Bertrand, M. (2008). Évaluation des impacts de la sécheresse sur le rendement des

grandes cultures en France. *Cahiers Agricultures*, 17(5), 437-443 (1).

<https://doi.org/10.1684/agr.2008.0230>

Djekoun, A., & Planchon, C. (1992). Stomatal conductance, photosynthesis and acetylene reduction rate

in soybean genotypes. *Canadian Journal of Plant Science*, 72(2), 383-390.

<https://doi.org/10.4141/cjps92-043>

do Rosário Rosa, V., Farias dos Santos, A. L., Alves da Silva, A., Peduti Vicentini Sab, M., Germino, G.

H., Barcellos Cardoso, F., & de Almeida Silva, M. (2021). Increased soybean tolerance to water deficiency through biostimulant based on fulvic acids and *Ascophyllum nodosum* (L.) seaweed extract. *Plant Physiology and Biochemistry*, 158, 228-243.

<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.008>

du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants : Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia*

Horticulturae, 196, 3-14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>

Elsayed, S., Elhoweity, M., Ibrahim, H. H., Dewir, Y. H., Migdadi, H. M., & Schmidhalter, U. (2017).

Thermal imaging and passive reflectance sensing to estimate the water status and grain yield of wheat under different irrigation regimes. *Agricultural Water Management*, 189, 98-110.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.05.001>

Eurostat. (2022). *European Commission | Cereals production*.

<https://agridata.ec.europa.eu/extensions/DashboardCereals/CerealsProduction.html>

Fahad, S., Bajwa, A. A., Nazir, U., Anjum, S. A., Farooq, A., Zohaib, A., Sadia, S., Nasim, W., Adkins, S., Saud, S., Ihsan, M. Z., Alharby, H., Wu, C., Wang, D., & Huang, J. (2017). Crop Production under Drought and Heat Stress : Plant Responses and Management Options. *Frontiers in Plant Science*, 8. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2017.01147>

Fauquet, C. (2020). *Étude de l'utilisation de l'imagerie thermique des articulations chez le chien de traîneaux en condition de course : Description chez le chien sain et application de cas cliniques lors de la grande odyssée 2020* [Other]. <https://oatao.univ-toulouse.fr/26842/>

Fernandez-Gallego, J. A., Buchailot, M. L., Aparicio Gutiérrez, N., Nieto-Taladriz, M. T., Araus, J. L., & Kefauver, S. C. (2019). Automatic Wheat Ear Counting Using Thermal Imagery. *Remote Sensing*, 11(7), 751. <https://doi.org/10.3390/rs11070751>

Francesca, S., Raimondi, G., Cirillo, V., Maggio, A., Barone, A., & Rigano, M. M. (2020). A Novel Plant-Based Biostimulant Improves Plant Performances under Drought Stress in Tomato. *Biology and Life Sciences Forum*, 4(1), 52. <https://doi.org/10.3390/IECPS2020-08883>

Francesconi, S., Harfouche, A., Maesano, M., & Balestra, G. M. (2021). UAV-Based Thermal, RGB Imaging and Gene Expression Analysis Allowed Detection of Fusarium Head Blight and Gave New Insights Into the Physiological Responses to the Disease in Durum Wheat. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2021.628575>

Fuchs, M. (1990). Infrared measurement of canopy temperature and detection of plant water stress. *Theoretical and Applied Climatology*, 42(4), 253-261. <https://doi.org/10.1007/BF00865986>

García-Tejero, I. F., Costa, J. M., Egipto, R., Durán-Zuazo, V. H., Lima, R. S. N., Lopes, C. M., & Chaves, M. M. (2016). Thermal data to monitor crop-water status in irrigated Mediterranean viticulture. *Agricultural Water Management*, 176, 80-90. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.05.008>

García-Tejero, I. F., Ortega-Arévalo, C. J., Iglesias-Contreras, M., Moreno, J. M., Souza, L., Távira, S. C., & Durán-Zuazo, V. H. (2018). Assessing the Crop-Water Status in Almond (*Prunus dulcis*

Mill.) Trees via Thermal Imaging Camera Connected to Smartphone. *Sensors*, 18(4), 1050.

<https://doi.org/10.3390/s18041050>

García-Tejero, I. F., Rubio, A. E., Viñuela, I., Hernández, A., Gutiérrez-Gordillo, S., Rodríguez-Pleguezuelo, C. R., & Durán-Zuazo, V. H. (2018). Thermal imaging at plant level to assess the crop-water status in almond trees (cv. Guara) under deficit irrigation strategies. *Agricultural Water Management*, 208, 176-186. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.002>

Gardner, B. R., Blad, B. L., Garrity, D. P., & Watts, D. G. (1981). Relationships between crop temperature, grain yield, evapotranspiration and phenological development in two hybrids of moisture stressed sorghum. *Irrigation Science*, 2(4), 213-224.

<https://doi.org/10.1007/BF00258375>

Gardner, B. R., Nielsen, D. C., & Shock, C. C. (1992). Infrared Thermometry and the Crop Water Stress Index. I. History, Theory, and Baselines. *Journal of Production Agriculture*, 5(4), 462-466.

<https://doi.org/10.2134/jpa1992.0462>

Gonzalez-Dugo, V., Zarco-Tejada, P., Berni, J. A. J., Suárez, L., Goldhamer, D., & Fereres, E. (2012). Almond tree canopy temperature reveals intra-crown variability that is water stress-dependent. *Agricultural and Forest Meteorology*, 154-155, 156-165.

<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.11.004>

Gutiérrez, S., Fernández-Navales, J., Diago, M.-P., Iñiguez, R., & Tardaguila, J. (2021). Assessing and mapping vineyard water status using a ground mobile thermal imaging platform. *Irrigation Science*, 39(4), 457-468. <https://doi.org/10.1007/s00271-021-00735-1>

Halpern, M., Bar-Tal, A., Ofek, M., Minz, D., Müller, T., & Yermiyahu, U. (2015). The Use of Biostimulants for Enhancing Nutrient Uptake. *Advances in Agronomy*, 130, 141-174.

<https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.10.001>

Han, S., & Cointault, F. (2013, juin). Détection précoce de maladies sur feuilles par traitement d'images.

Orasis, Congrès des jeunes chercheurs en vision par ordinateur. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00829402>

- Hanasaki, N., Yoshikawa, S., Pokhrel, Y., & Kanae, S. (2018). A global hydrological simulation to specify the sources of water used by humans. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(1), 789-817. <https://doi.org/10.5194/hess-22-789-2018>
- Haque, M. S., Saha, N. R., Islam, M. T., Islam, M. M., Kwon, S.-J., Roy, S. K., & Woo, S.-H. (2021). Screening for drought tolerance in wheat genotypes by morphological and SSR markers. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 24(1), 27-39. <https://doi.org/10.1007/s12892-020-00036-7>
- Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter, P. J., Reginato, R. J., & Hatfield, J. L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24, 45-55. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(81\)90032-7](https://doi.org/10.1016/0002-1571(81)90032-7)
- Idso, S. B., Jackson, R. D., & Reginato, R. J. (1977). Remote-Sensing of Crop Yields. *Science*, 196(4285), 19-25. <https://doi.org/10.1126/science.196.4285.19>
- IRM. (2020). *Rapport climatique*. IRM. <https://climat.be/en-belgique/climat-et-emissions/changements-observe>
- Iseki, K., & Olaleye, O. (2020). A new indicator of leaf stomatal conductance based on thermal imaging for field grown cowpea. *Plant Production Science*, 23(1), 136-147. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2019.1625273>
- Ishimwe, R., Abutaleb, K., & Ahmed, F. (2014). Applications of Thermal Imaging in Agriculture—A Review. *Advances in Remote Sensing*, 03(03), 128. <https://doi.org/10.4236/ars.2014.33011>
- Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., & Pinter Jr., P. J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17(4), 1133-1138. <https://doi.org/10.1029/WR017i004p01133>
- Jackson, R. D., Kustas, W. P., & Choudhury, B. J. (1988). A reexamination of the crop water stress index. *Irrigation Science*, 9(4), 309-317. <https://doi.org/10.1007/BF00296705>
- Jackson, R. D., Reginato, R. J., & Idso, S. B. (1977). Wheat canopy temperature : A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*, 13(3), 651-656. <https://doi.org/10.1029/WR013i003p00651>

- Johnson, K. M., Jordan, G. J., & Brodribb, T. J. (2018). Wheat leaves embolized by water stress do not recover function upon rewatering. *Plant, Cell & Environment*, *41*(11), 2704-2714.
<https://doi.org/10.1111/pce.13397>
- Jones, H. (2004). Application of Thermal Imaging and Infrared Sensing in Plant Physiology and Ecophysiology. *Undefined*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Potential-of-Digital-Thermography-for-Disease-Oerke-Steiner/cf75453083a196766af6eb0999b06a1229f5dca3>
- Jones, H. G. (1999). Use of thermography for quantitative studies of spatial and temporal variation of stomatal conductance over leaf surfaces. *Plant, Cell & Environment*, *22*(9), 1043-1055.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1999.00468.x>
- Jones, H. G. (2013). *Plants and Microclimate : A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology* (3^e éd.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511845727>
- Jones, H. G., Hutchinson, P. A., May, T., Jamali, H., & Deery, D. M. (2018). A practical method using a network of fixed infrared sensors for estimating crop canopy conductance and evaporation rate. *Biosystems Engineering*, *165*, 59-69. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.012>
- Jones, H., Stoll, M., Santos, T., Souza, C., Chaves, M., & Grant, O. (2002). Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field : Application to grapevine. *Journal of experimental botany*, *53*, 2249-2260. <https://doi.org/10.1093/jxb/erf083>
- Kar, G., & Kumar, A. (2010). Energy balance and crop water stress in winter maize under phenology-based irrigation scheduling. *Irrigation Science*, *28*(3), 211-220. <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0192-x>
- Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Asgarzadeh, H., Majnooni-Heris, A., Rahimi, A., & Besharat, S. (2020). Response of maize and black gram yield and water productivity to variation in canopy temperature and crop water stress index. *International Agrophysics*, *34*(3), 381-390.
<https://doi.org/10.31545/intagr/126439>
- Khorsandi, A., Hemmat, A., Mireei, S. A., Amirfattahi, R., & Ehsanzadeh, P. (2018). Plant temperature-based indices using infrared thermography for detecting water status in sesame under greenhouse

conditions. *Agricultural Water Management*, 204, 222-233.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.012>

Kotchi, S. O. (2004). *DÉTECTION DU STRESS HYDRIQUE PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE : Application à la culture de la pomme de terre*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4909.5280>

Labbé, S., Lebourgeois, V., Jolivot, A., & Marti, R. (2012). *Thermal infra-red remote sensing for water stress estimation in agriculture*. 67, 11.

Leemans, V. (2008, octobre 30). *Application de la Thermographie infrarouge au diagnostic*. Les méthodes et outils de diagnostic et de contrôle appliqués pour la maintenance et la maîtrise des risques. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/59658>

Leinonen, I., Grant, O. M., Tagliavia, C. P. P., Chaves, M. M., & Jones, H. G. (2006). Estimating stomatal conductance with thermal imagery. *Plant, Cell & Environment*, 29(8), 1508-1518. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2006.01528.x>

Leinonen, I., & Jones, H. G. (2004). Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress. *Journal of Experimental Botany*, 55(401), 1423-1431.

Lima, R. S. N., García-Tejero, I., Lopes, T. S., Costa, J. M., Vaz, M., Durán-Zuazo, V. H., Chaves, M., Glenn, D. M., & Campostrini, E. (2016). Linking thermal imaging to physiological indicators in *Carica papaya* L. under different watering regimes. *Agricultural Water Management*, 164, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.017>

Ma, S.-C., Duan, A.-W., Ma, S.-T., & Yang, S.-J. (2016). Effect of Early-Stage Regulated Deficit Irrigation on Stem Lodging Resistance, Leaf Photosynthesis, Root Respiration and Yield Stability of Winter Wheat under Post-Anthesis Water Stress Conditions. *Irrigation and Drainage*, 65(5), 673-681. <https://doi.org/10.1002/ird.2022>

Maes, W. H., Baert, A., Huete, A. R., Minchin, P. E. H., Snelgar, W. P., & Steppe, K. (2016). A new wet reference target method for continuous infrared thermography of vegetations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 226-227, 119-131. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.05.021>

- Maes, W. H., & Steppe, K. (2012). Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture : A review. *Journal of Experimental Botany*, *63*(13), 4671-4712. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers165>
- Manickavasagan, A., Jayas, D. S., & White, N. D. G. (2008). Thermal imaging to detect infestation by *Cryptolestes ferrugineus* inside wheat kernels. *Journal of Stored Products Research*, *44*(2), 186-192. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2007.10.006>
- Martin, E. C. (2014). Methods of Measuring for Irrigation Scheduling—WHEN. *CALS Publications Archive. The University of Arizona*. <https://repository.arizona.edu/handle/10150/333138>
- Meron, M., Tsipris, J., Orlov, V., Alchanatis, V., & Cohen, Y. (2010). Crop water stress mapping for site-specific irrigation by thermal imagery and artificial reference surfaces. *Precision Agriculture*, *11*(2), 148-162. <https://doi.org/10.1007/s11119-009-9153-x>
- Moran, M. S. (2004). Thermal infrared measurement as an indicator of plant ecosystem health. In *Thermal Remote Sensing in Land Surface Processes*. CRC Press.
- Müller Schmied, H., Cáceres, D., Eisner, S., Flörke, M., Herbert, C., Niemann, C., Peiris, T. A., Popat, E., Portmann, F. T., Reinecke, R., Schumacher, M., Shadkam, S., Telteu, C.-E., Trautmann, T., & Döll, P. (2021). The global water resources and use model WaterGAP v2.2d : Model description and evaluation. *Geoscientific Model Development*, *14*(2), 1037-1079. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-1037-2021>
- Mwadzingeni, L., Shimelis, H., Tesfay, S., & Tsilo, T. J. (2016). Screening of Bread Wheat Genotypes for Drought Tolerance Using Phenotypic and Proline Analyses. *Frontiers in Plant Science*, *7*. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2016.01276>
- Nanda, M. K., Giri, U., & Bera, N. (2018). Canopy Temperature-Based Water Stress Indices : Potential and Limitations. In S. K. Bal, J. Mukherjee, B. U. Choudhury, & A. K. Dhawan (Éds.), *Advances in Crop Environment Interaction* (p. 365-385). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1861-0_14

- Ojeda, H., & Saurin, N. (2014). L'irrigation de précision de la vigne : Méthodes, outils et stratégies pour maximiser la qualité et les rendements de la vendange en économisant de l'eau. *Innovations Agronomiques*, 38, 97.
- Padhi, J., Misra, R. K., & Payero, J. O. (2012). Estimation of soil water deficit in an irrigated cotton field with infrared thermography. *Field Crops Research*, 126, 45-55.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.09.015>
- Panigada, C., Rossini, M., Meroni, M., Cilia, C., Busetto, L., Amaducci, S., Boschetti, M., Cogliati, S., Picchi, V., Pinto, F., Marchesi, A., & Colombo, R. (2014). Fluorescence, PRI and canopy temperature for water stress detection in cereal crops. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 30, 167-178. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.02.002>
- Poirier-Pocovi, M., Volder, A., & Bailey, B. N. (2020). Modeling of reference temperatures for calculating crop water stress indices from infrared thermography. *Agricultural Water Management*, 233, 106070. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106070>
- Pokharel, D., Baral, K., Ojha, B., Ghimirey, S., & Pandey, M. (2018). Screening Wheat Genotypes for Drought Tolerance and Co-relation Study among Morpho-physiological Traits. *Journal of Agriculture and Environment*, 14, 65. <https://doi.org/10.3126/aej.v14i0.19787>
- Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Tignor, M. M. B., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A., & Rama, B. (Éds.). (2022). Summary for policymakers. In *Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Pou, A., Diago, M. P., Medrano, H., Baluja, J., & Tardaguila, J. (2014). Validation of thermal indices for water status identification in grapevine. *Agricultural Water Management*, 134, 60-72.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.11.010>
- Pradawet, C., Khongdee, N., Pansak, W., Spreer, W., Hilger, T., & Cadisch, G. (2022). Thermal imaging for assessment of maize water stress and yield prediction under drought conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 00(1-15). <https://doi.org/10.1111/jac.12582>

- Prashar, A., & Jones, H. G. (2014). Infra-Red Thermography as a High-Throughput Tool for Field Phenotyping. *Agronomy*, 4(3), 397-417. <https://doi.org/10.3390/agronomy4030397>
- Sabella, E., Aprile, A., Negro, C., Nicoli, F., Nutricati, E., Vergine, M., Luvisi, A., & De Bellis, L. (2020). Impact of Climate Change on Durum Wheat Yield. *Agronomy*, 10(6), 793. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060793>
- Saiz-Rubio, V., Rovira-Más, F., Cuenca-Cuenca, A., & Alves, F. (2021). Robotics-based vineyard water potential monitoring at high resolution. *Computers and Electronics in Agriculture*, 187, 106311. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106311>
- Saleem, M. (2003). Response of Durum and Bread wheat Genotypes to Drought Stress : Biomass and Yield Components. *Asian Journal of Plant Sciences*. <http://docsdrive.com/pdfs/ansinet/ajps/2003/290-293.pdf>
- Sepúlveda-Reyes, D., Ingram, B., Bardeen, M., Zuñiga, M., Ortega-Farias, S., & Poblete-Echeverría, C. (2016). Selecting Canopy Zones and Thresholding Approaches to Assess Grapevine Water Status by Using Aerial and Ground-Based Thermal Imaging. *Remote Sensing*, 8, 822. <https://doi.org/10.3390/rs8100822>
- Shoa, P., Hemmat, A., Amirfattahi, R., & Gheysari, M. (2020). Automatic extraction of canopy and artificial reference temperatures for determination of crop water stress indices by using thermal imaging technique and a fuzzy-based image-processing algorithm. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 1-12. <https://doi.org/10.1080/17686733.2020.1819707>
- Shoa, P., Hemmat, A., Gheysari, M., & Amirfattahi, R. (2021). Effect of micro climatic indices on the accuracy of thermographic plant water status monitoring, case study of a semi-arid area. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 18(5), 283-299. <https://doi.org/10.1080/17686733.2020.1768496>
- Silletti, S., Di Stasio, E., Van Oosten, M. J., Ventrino, V., Pepe, O., Napolitano, M., Marra, R., Woo, S. L., Cirillo, V., & Maggio, A. (2021). Biostimulant Activity of *Azotobacter chroococcum* and *Trichoderma harzianum* in Durum Wheat under Water and Nitrogen Deficiency. *Agronomy*, 11(2), 380. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020380>

- Stajniko, D., Lakota, M., & Hočevan, M. (2004). Estimation of number and diameter of apple fruits in an orchard during the growing season by thermal imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 42(1), 31-42. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(03\)00086-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(03)00086-3)
- Statista. (2022). *Céréales : Volume de production par type dans le monde 2022/2023*. Statista. <https://fr.statista.com/statistiques/565119/production-totale-de-cereales-par-type-dans-le-monde/>
- Stoll, M., & Jones, H. G. (2007). Thermal imaging as a viable tool for monitoring plant stress. *OENO One*, 41(2), 77-84. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2007.41.2.851>
- Stoll, M., Schultz, H. R., Baecker, G., & Berkelmann-Loehnertz, B. (2008). Early pathogen detection under different water status and the assessment of spray application in vineyards through the use of thermal imagery. *Precision Agriculture*, 9(6), 407-417. <https://doi.org/10.1007/s11119-008-9084-y>
- Vadivambal, R., & Jayas, D. S. (2011). Applications of Thermal Imaging in Agriculture and Food Industry—A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 4(2), 186-199. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0333-5>
- Varith, J., Hyde, G. M., Baritelle, A. L., Fellman, J., & Sattabongkot, T. (2003). Non-contact bruise detection in apples by thermal imaging. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 4, 211-218. [https://doi.org/10.1016/S1466-8564\(03\)00021-3](https://doi.org/10.1016/S1466-8564(03)00021-3)
- Wilcox, J., & Makowski, D. (2014). A meta-analysis of the predicted effects of climate change on wheat yields using simulation studies. *Field Crops Research*, 156, 180-190. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.11.008>
- Yakhin, O. I., Lubyaynov, A. A., Yakhin, I. A., & Brown, P. H. (2017). Biostimulants in Plant Science : A Global Perspective. *Frontiers in Plant Science*, 7. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2016.02049>
- Zhou, Z., Majeed, Y., Diverres Naranjo, G., & Gambacorta, E. M. T. (2021). Assessment for crop water stress with infrared thermal imagery in precision agriculture : A review and future prospects for deep learning applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 182, 106019. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106019>

Zia, S., Du, W., Spreer, W., Spohrer, K., He, X., & Muller, J. (2012). Assessing crop water stress of winter wheat by thermography under different irrigation regimes in North China Plain. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 5(3), 24-34.
<https://doi.org/10.25165/ijabe.v5i3.573>