

RAPPORT DE SYNTHÈSE

Référence du projet : D65-1412/P2

Acronyme : PHENWHEAT

Titre du projet : Caractérisation de la dynamique de croissance de variétés de froment d'hiver résistantes à différents stress biotiques et abiotiques au moyen d'une plateforme de phénotypage par proxidétection.

Date de démarrage et de fin du projet :

du 01/07/2021 au 30/06/2024

Durée du projet : 36 mois

Organismes partenaires du projet

Partenaire 1 : Université de Liège – Gembloux Agro Bio Tech

Adresse internet partenaire 1 : <https://www.gembloux.uliege.be>

Contact : MERCATORIS Benoît (Benoit.Mercatoris@uliege.be)

Partenaire 2 : Centre Wallon de Recherches Agronomiques (CRA-W)

Adresse internet partenaire 2 : <https://www.cra.wallonie.be>

Contacts : SINNAEVE Georges, Directeur général

BAETEN Vincent, Unité 12 (v.baeten@cra.wallonie.be)

Partenaire 3 : Université de Mons

Adresse internet partenaire 3 : <https://web.umons.ac.be>

Contact : GOSSELIN Bernard (bernard.gosselin@umons.ac.be)

1. Contexte

En regard du secteur des grandes cultures et en particulier du froment d'hiver, la deuxième priorité des producteurs est la sélection variétale. En plus des critères classiques de rendement et de résistance à la verse, les producteurs sont désireux de disposer de variétés plus résistantes aux maladies afin d'anticiper les évolutions légales en matière phytosanitaire ou de débouchés non alimentaires. En regard des spécificités des grandes cultures biologiques, les producteurs souhaitent que la recherche et l'encadrement incluent également le développement de variétés adaptées aux itinéraires techniques en culture biologique. L'objectif du projet est de développer une plateforme de phénotypage des variétés de froment d'hiver par proxidétection en fusionnant les données obtenues par différents types de capteurs et caméras sensibles à la lumière visible et proche-infrarouge ainsi qu'à la fluorescence des plantes. Des algorithmes d'intelligence artificielle sont utilisés pour mettre en commun les technologies numériques et les observations de terrain. La mesure de traits morphologiques et physiologiques au tallage, à l'élongation de la tige et à l'épiaison sont mis en relation avec le statut sanitaire général des plantes et la résistance à la verse. Une meilleure compréhension de la dynamique de croissance permet de cibler les variétés adaptées en culture conventionnelle et en culture bio, demandant moins d'intrant dans le contexte pédoclimatique wallon (azote, régulateur de croissance, produits de protection des plantes). La première triennale s'est consacrée à la conception et la calibration de la plateforme en parcelles d'essais. La deuxième triennale a porté sur la consolidation et la validation en essais en conditions culturales réelles. Le principal résultat obtenu est la mise à disposition de deux types de plateformes de phénotypage (multispectrale et hyperspectrale) pour le secteur de la production végétale afin de caractériser les variétés destinées aux agriculteurs wallons.

2. Objectifs

Le programme de recherche visait à concevoir une plateforme de proxidétection pour le phénotypage automatisé du couvert végétal de cultures de froment d'hiver en essais de sélection et d'évaluation variétale en région wallonne. L'objectif était d'utiliser cette plateforme munie de capteurs dans le visible et le proche infrarouge pour caractériser, de manière non-destructive, précise et robuste, des traits agronomiques pertinents avec une très haute résolution spatiale et temporelle. Combiné à des algorithmes d'intelligence artificielle, cet outil a permis de mettre en commun les technologies numériques et les observations de terrain. La mesure de traits morphologiques et physiologiques au tallage, à l'élongation de la tige et à l'épiaison a été mise en relation avec le statut sanitaire général des cultures. Les informations dérivées de cette plateforme ont servi en appui à l'œil des experts de terrain dans leur travail complexe d'observations au champ pour caractériser le statut des variétés et des cultures. A plus long terme, l'objectif est d'acquérir une meilleure compréhension de la dynamique de croissance des cultures afin de cibler des variétés adaptées en conditions conventionnelles et en culture biologique, demandant moins d'intrants dans le contexte pédoclimatique wallon.

3. Conclusions synthétiques d'interprétation des résultats des travaux

Ce projet a permis la conception d'une plateforme pilote de phénotypage (phénomobile), munie d'un système de capteurs comportant 2 caméras couleurs, 1 caméra multispectrale, 1 spectromètre de lumière incidente et 1 caméra thermique (Figure 1). Ce projet a également permis la mise en œuvre de l'imagerie hyperspectrale proche infrarouge avec le développement d'une plateforme d'acquisition d'images en laboratoire et deux plateformes d'acquisition d'images au champ, l'une sur un portique enjambeur (voir illustration de droite dans la Figure 5) et l'autre sur une rampe montée sur un tracteur (Figure 2).



Figure 1 : Déploiement de la phénomobile en parcelles d'essai.



Figure 2 : Plateforme d'imagerie hyperspectrale embarquée sur tracteur et son système d'éclairage halogène.

Les données acquises durant le projet ont permis de valider l'utilisation de la phénomobile pour le phénotypage du froment d'hiver. L'utilisation hebdomadaire de cette plateforme a permis d'éprouver son fonctionnement. Les pipelines d'analyse des données ont permis une segmentation précise des organes du froment au sein d'images acquises au champ.

Le traitement de ces données a permis la déconvolution de stress biotiques (maladies foliaires) et abiotique (stress azoté). Un algorithme de deep learning de type Unet a été utilisé afin de séparer les parties endommagées des feuilles. La segmentation des images RGB était basée sur la méthode SegVeg consistant à utiliser (i) une

architecture U-NET pour séparer le background de l'image (sol) de la partie végétative et (ii) une méthode d'apprentissage automatique classique sur la base des caractéristiques des images pour segmenter les pixels de feuille saine et les pixels de feuille endommagée. Les meilleures performances ont été obtenues avec le modèle EfficientNetB2 et le modèle XGBoost. La combinaison de ces deux modèles a permis une segmentation très précise du sol, des éléments verts et régions endommagées du couvert végétal (voir Figure 3). Cette déconvolution a démontré que les maladies affectent le statut azoté des feuilles de froment non seulement au niveau des parties du feuillage avec symptômes mais aussi de celles sans symptôme.

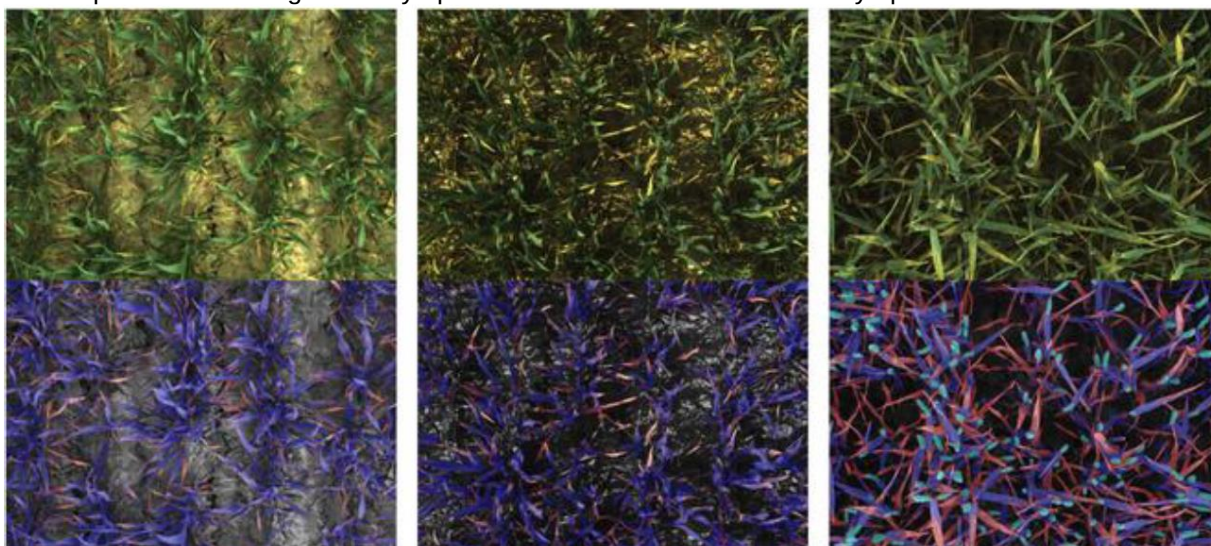


Figure 3 : Exemples de segmentation obtenus avec les images de la phénomobile.

De plus, l'utilisation d'algorithmes de Deep Learning pour le traitement des données de la phénomobile a permis de prédire la matière sèche du blé, l'absorption d'azote et la concentration d'azote à partir d'images RGB et multispectrales acquises tout au long de la saison du tallage à la maturité. Les résultats obtenus ont permis d'établir la répartition prévue de la matière sèche du blé et de l'absorption d'azote au cours de la saison de croissance pour chaque micro-parcelle de l'essai. Cette approche offre une alternative intéressante pour fournir des informations précieuses sur la répartition de la matière à l'intérieur de la plante. En outre, les modèles développés dans le cadre de ce projet ont permis de détecter avec succès l'émergence de nouveaux organes, tels que la dernière feuille et l'épi.

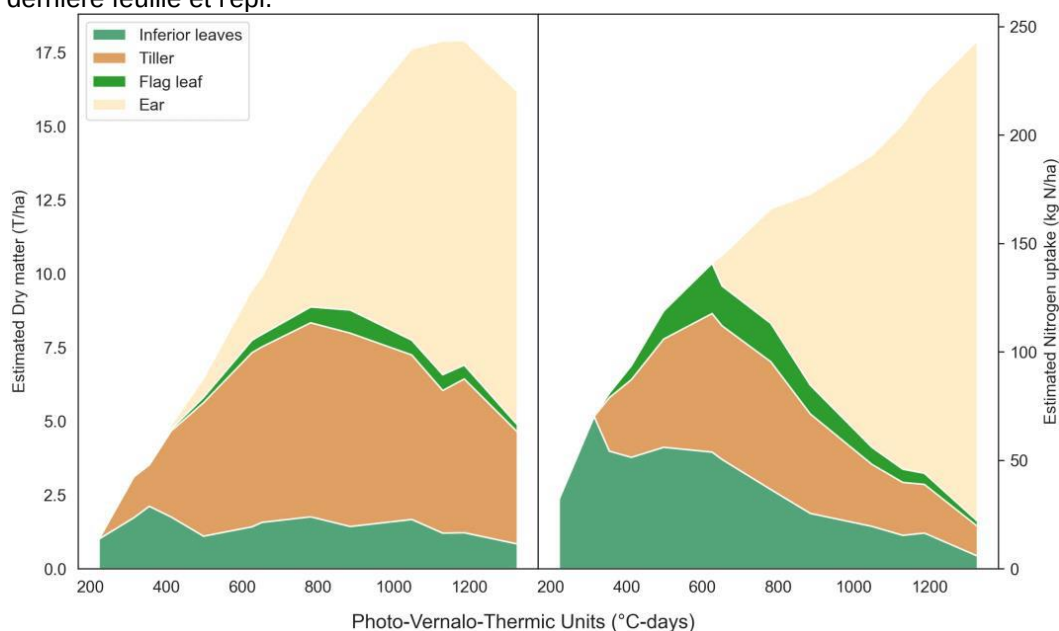


Figure 4 : Partitionnement prédit de la matière sèche et de l'absorption d'azote à travers la saison pour une micro-parcelle d'essai.

Les résultats indiquent que les algorithmes de Deep Learning tels que les réseaux de neurones convolutifs (CNN) sont des outils accessibles et prometteurs pour le phénotypage quantitatif des variables biophysiques des cultures. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour exploiter pleinement ces outils. Bien que l'ensemble de données acquises dans ce projet contienne une quantité substantielle de données hétérogènes de vérité terrain, la performance des modèles peut soulever des questions en raison de sa taille limitée en termes d'architecture et de couleur des cultures, qui n'inclut que quelques génotypes. Par conséquent, la communauté du phénotypage devrait donner la priorité au développement d'ensembles de données étendus et bien annotés pour les défis essentiels du phénotypage, tels que l'ensemble de données Global Wheat Head Detection (GWHD) (David et al., 2021). En outre, l'exploration de solutions alternatives, telles que l'apprentissage auto-supervisé ou la génération de données synthétiques à l'aide de modèles de plantes fonctionnel et structurel (FSPM), peut encore améliorer l'apprentissage et les performances du modèle.

Les données acquises en imagerie hyperspectrale durant le projet ont permis de développer deux méthodes de détection de la fusariose sur épis de froment d'hiver respectivement, une méthode en laboratoire et une méthode en conditions extérieures (sur le terrain). La plateforme de mesures en laboratoire (illustration de gauche dans la Figure 5) a permis l'analyse d'épis prélevés au champ et les 2 plateformes de terrain ont permis l'analyse d'épis directement au champ.

La méthode développée en laboratoire était basée sur la création de modèles PLS-DA étalonnés avec des images acquises durant les années 2019 à 2021. Ces modèles ont été validés en utilisant un jeu d'images indépendant provenant également des années 2019 à 2021. Les modèles ont correctement détecté les épis fusariés (sensibilité) dans 98,2 % des cas. De plus, les épis sains ont été correctement détectés (spécificité) dans 90,5 % des cas. Ces modèles ont ensuite été appliqués sur les images acquises en laboratoire en 2022 et 2023. Les résultats obtenus en 2022 ont montré une faible performance des modèles. Ces erreurs de prévision pourraient être liées à un niveau de maturité différent des épis par rapport au jeu de données des modèles. Concernant les résultats obtenus en 2023, la détection d'épis fusariés a montré une sensibilité de 91,3% et une spécificité de 74,3%. Ces résultats ont démontré la possibilité de détecter la fusariose sur des épis prélevés au champ. La méthode a également permis d'estimer la sévérité de l'infection sur les épis selon 3 classes de sévérité. La méthode permet un bon classement entre épis sains et fusariés cependant l'estimation de la sévérité est moins précise que l'observation visuelle. Cette plus faible performance peut s'expliquer par des différences de maturité des épis ainsi que des variations de conditions de croissance d'une année à l'autre.

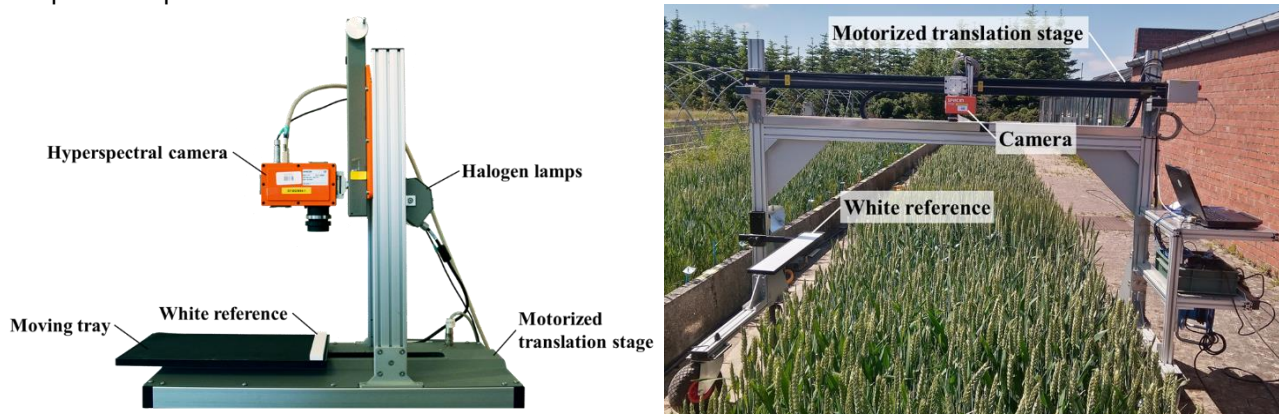


Figure 5 : Plateformes de mesures hyperspectrales en laboratoire (à gauche) et portique de mesure sur le terrain (à droite).

Les résultats obtenus sur le terrain ont permis de démontrer que l'imagerie hyperspectrale proche infrarouge peut être utilisée en conditions extérieures pour l'évaluation de stress biotiques. La méthode développée dans ce projet a permis de détecter les épis et estimer leur état sanitaire. Cependant les modèles n'ont pas permis de différencier des stress biotiques dont les symptômes sur l'épi sont similaires, à savoir la fusariose et le piétin échaudage.

Ce projet a également permis d'utiliser des algorithmes de Deep Learning pour faciliter le travail d'annotation des images acquises avec la phénomobile ainsi que l'entraînement des modèles de segmentation de ces images. Les modèles développés dans le cadre de ce projet ont permis un gain de temps précieux pour l'annotation de grands ensembles de données.

4. Impact actuel sur l'agriculture wallonne et perspectives futures de cet impact

Concernant l'imagerie hyperspectrale, les méthodes développées dans le projet ne sont pas encore suffisamment matures pour envisager des débouchés en dehors de la recherche. Cependant les plateformes de capteurs et les jeux de données seront valorisés dans le cadre de nouvelles collaborations pour la recherche agronomique.

En ce qui concerne les plateformes de capteurs, elles viendront alimenter les activités de recherche et de démonstration réalisées avec le laboratoire mobile dans le cadre du projet PRW-MOBILAB. Elles seront aussi utilisées dans le cadre de projets de phénotypage en cours ou à venir. Ainsi au travers du projet européen PHENET, la plateforme d'imagerie hyperspectrale et les modèles développés pour la fusariose sur épis seront adaptés pour d'autres maladies de l'épi comme la carie et la cécidomyie du blé.

En ce qui concerne les jeux de données, des images RGB et des images NIR hyperspectrales ont été acquises durant ce projet en lien avec l'évaluation de la fusariose sur épis.

Pour les images RGB, une méthode à apprentissage automatique, basée sur l'imagerie couleur, a été développée pour détecter et segmenter les épis de l'émergence à la maturité. Un jeu de données de référence Global Wheat Head Detection dataset (GWHD) a été utilisé pour entraîner ce modèle. L'étape suivante sera d'évaluer la fusariose sur ces épis. Ainsi, les images RGB d'épis fusariés acquises dans le cadre du projet Phenwheat pourront alimenter le jeu de données du Global Wheat Fusarium Head Blight dataset (GWFHD). D'autres modèles d'apprentissage profond pourront être développés.

Pour les images proche infrarouges hyperspectrales, l'approche utilisée dans le cadre du projet est une approche de classification discriminante entre partie saine et partie fusariée de l'épi, appliquée a posteriori sur les images. L'approche utilise l'information spectrale au niveau du pixel et non une moyenne sur l'épi, ce qui permet notamment de mettre précisément en évidence les bandes spectrales utiles à la discrimination entre épis sains et affectés. L'étape suivante sera d'optimiser les algorithmes afin de réaliser les prédictions des images en temps réel. Ainsi, les images proche infrarouges hyperspectrales acquises en laboratoire ou au champ dans le cadre du projet Phenwheat serviront de cas d'étude pour le projet QUALISPECTRA. Ce projet vise directement à améliorer les résultats obtenus dans cette étude, via des méthodes d'IA supervisée de manière à obtenir un résultat en temps réel, ce qui suggère un besoin de localisation précis et une vitesse de prédiction élevée. Par ailleurs, une limitation de l'approche actuelle est sa moins bonne efficacité sur les épis matures. Ceci constitue un autre enjeu pour le traitement des images en vue de permettre une récolte plus ciblée et qualitative.

La stratégie consistant à combiner la performance des capteurs et des algorithmes pour évaluer la fusariose sur épis en temps réel au champ pourra être étendue à d'autres maladies sur épi ou sur feuilles, à d'autres stress biotiques et abiotiques, à d'autres cultures afin d'aider le sélectionneur/évaluateur à rechercher les variétés les moins sensibles aux stress environnementaux. A terme, en plus de la dimension spectrale et spatiale, l'objectif est aussi de faciliter l'intégration d'une dimension temporelle à l'analyse : Comment détecter l'évolution des maladies végétales et à quel moment fixer le diagnostic en vue de maximiser le rendement des récoltes avec moins de traitements (agriculture de précision) ? Cette question guide la réflexion sur l'innovation, les perspectives et l'évolution du projet. Côté utilisateurs, ils considèrent que les capteurs pourraient représenter une solution pour valider l'intégrité et la conformité de leurs produits. Pour l'instant, l'implémentation de cette technologie est rendue difficile par le coût élevé, la vitesse des flux de produit et par l'installation des instruments eux-mêmes.

Ces perspectives de valorisation et nouveaux enjeux constatés dans le projet Phenwheat ouvrent des portes pour des projets futurs qui s'inscrivent dans le Domaine d'innovation Stratégique 5 (DIS5) : Chaînes agro-alimentaires du futur et gestion innovante de l'environnement et en particulier dans l'IIS Digibiocontrol qui vise à interconnecter le monde du numérique avec la lutte contre les pathogènes des plantes. Tout ceci vise à augmenter la maturité numérique du secteur agricole pour le rendre plus compétitif et développer une agriculture pérenne et rentable pour les agriculteurs.

5. Publications

Articles publiés dans des journaux scientifiques avec comité de lecture

- David E., Serouart M., Smith D., Madec S., Velumani K., Liu S., Wang X., Pinto F., Shafiee S., Tahir I.S.A., *et al.*, 2021. "Global Wheat Head Detection 2021: An Improved Dataset for Benchmarking Wheat Head Detection Methods." *Plant Phenomics* doi:10.34133/2021/9846158
lien d'accès : <https://doi.org/10.34133/2021/9846158>
- 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.
lien d'accès : <https://doi.org/10.3390/rs13071380>
- Carlier A., Dandrifosse S., Dumont B., Mercatoris B., 2022. "Wheat Ear Segmentation Based on a Multisensor System and Superpixel Classification." *Plant Phenomics*. doi:10.34133/2022/9841985
lien d'accès : <https://doi.org/10.34133/2022/9841985>
- Dandrifosse S., Carlier A., Dumont B., Mercatoris B., 2022. "In-Field Wheat Reflectance: How to Reach the Organ Scale?" *Sensors*, 22, 3342. doi : 10.3390/s22093342
lien d'accès : <https://doi.org/10.3390/s22093342>
- Vincke, D., Mercatoris, B., Eylenbosch, D., Baeten, V., Vermeulen, P., 2022. "Assessment of kernel presence in winter wheat ears at spikelet scale using near-infrared hyperspectral imaging". *Journal of Cereal Science* 106: 103497.
lien d'accès : <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2022.103497>
- 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 (07 July 2022): 107161. doi:10.1016/j.compag.2022.107161.
lien d'accès : <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107161>
- Vincke D., Eylenbosch D., Jacquemin G., Chandelier A., Fernández Pierna J. A., Stevens F., Baeten V., Mercatoris B., Vermeulen P., 2023. "Near infrared hyperspectral imaging method to assess Fusarium Head Blight infection on winter wheat ears". *Microchemical Journal*, Volume 191, 108812.
lien d'accès : <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.108812>
- Carlier A., Dandrifosse S., Dumont B., Mercatoris B., 2023. "To what extent does yellow rust infestation affect remotely sensed nitrogen status?". *Plant Phenomics*, 5, 0083.
lien d'accès : <https://doi.org/10.34133/plantphenomics.0083>
- Carlier A., Dandrifosse S., Dumont B., Mercatoris B., 2023. "Comparing CNNs and PLSr for estimating wheat organs biophysical variables using proximal sensing". *Frontiers in Plant Science, Section Technical Advances in Plant Science*, 14 (20 November 2023). doi: 10.3389/fpls.2023.1204791.
lien d'accès : <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1204791>

Thèses de doctorat

- A. Carlier, 2023. "Assessment of wheat yield through in-field organ-scale phenotyping and deep learning techniques"
lien d'accès : <https://hdl.handle.net/2268/306283>
- S. Dandrifosse, 2022. "Dynamics of wheat organs by close-range multimodal machine vision"
lien d'accès : <https://hdl.handle.net/2268/294161>
- D. Vincke, 2024. "Evaluation of fusarium head blight infection on winter wheat using near infrared hyperspectral imaging from the laboratory to the field"
lien d'accès : <https://hdl.handle.net/2268/321486>