

10. Perspectives

- 1 Deux nouveaux outils d'aide à la décision en céréales en Wallonie..... 2
- 2 Blé dur : une opportunité pour la diversification des cultures ? 17
- 3 Premières évaluations d'une culture céréalière pérenne (*Th. intermedium*) en Belgique et optimisation de ses productions 23
- 4 Le phénotypage numérique en champs : un outil de caractérisation des cultures 26
- 5 Estimation de l'intensité d'infection de fusariose sur épis de froment d'hiver par imagerie hyperspectrale proche infrarouge 31

1 Deux nouveaux outils d'aide à la décision en céréales en Wallonie

D. Rosillon¹, J. P. Huart¹, V. Planchon¹, M. De Proft², B. Dumont³

1.1 Introduction

Deux nouveaux outils d'aide à la décision (OAD) vont être disponibles au printemps 2020 pour le suivi de la culture du froment en Wallonie.

Le premier OAD, l'OAD phéno, a pour objectif de suivre le développement du froment afin de planifier des opérations culturales et de comparer l'année en cours avec une année « normale ». Cet outil est un module de base mais est fondamental pour réaliser ultérieurement des avertissements en céréales ; le stade de développement du froment conditionne en effet les opérations culturales ainsi que la sensibilité à certaines maladies et ravageurs.

Le second OAD, **CECIBLE**, simule le développement de la cécidomyie orange, depuis la larve hivernant dans le sol, jusqu'à l'émergence de l'adulte. Grâce à l'utilisation de données météorologiques spatialisées, cet outil permet de déterminer les dates d'émergence de ce ravageur pour chaque point du territoire.

Les publics visés par ces OAD sont les structures d'encadrement, les acteurs de la recherche agronomique et les agriculteurs.

1.2 OAD phéno – Suivi du développement du froment

1.2.1 Les formalismes

a. Le modèle « STICS »

L'OAD phéno est l'implémentation d'un module du modèle STICS (Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard) développé depuis 1996 par l'INRA. STICS est un modèle déterministe dynamique qui simule le fonctionnement des cultures à pas de temps journalier. Les grands processus simulés sont la croissance et le développement de la culture ainsi que les bilans hydrique et azoté. STICS est adapté à un grand nombre de cultures (blé, maïs, betterave, prairies, soja, sorgho, etc.).

Le modèle STICS est largement utilisé de par le monde. Son développement et son évolution,

¹ CRA-W – Département Production Agricole – Unité Agriculture, Territoire et Intégration Technologique

² CRA-W – Département Sciences du vivant – Unité Santé des Plantes et Forêts

³ ULiege – Gx-ABT – Unité de phytotechnie tempérée

ainsi que l'animation scientifique autour du modèle, sont assurés par une communauté de scientifiques en France, en Belgique et au Canada. Le modèle est utilisé par plusieurs plateformes agrométéorologiques en France et est couplé avec plusieurs modèles. Il est également utilisé dans de nombreux projets internationaux [1].

L'OAD phéno est une implémentation simplifiée du module « Développement » (voir Figure 10.1) et ce pour le froment uniquement. Par rapport au formalisme complet de STICS, on ne considère pas (i) le calcul de l'imbibition de la graine, (ii) l'humidité dans le sol au niveau du lit de semences ou encore (iii) l'existence d'une croûte retardant l'émergence. De même, nous ne calculons pas les pertes de densité liées à un faible taux de germination, à un faible taux de levée ou au gel des plantules.

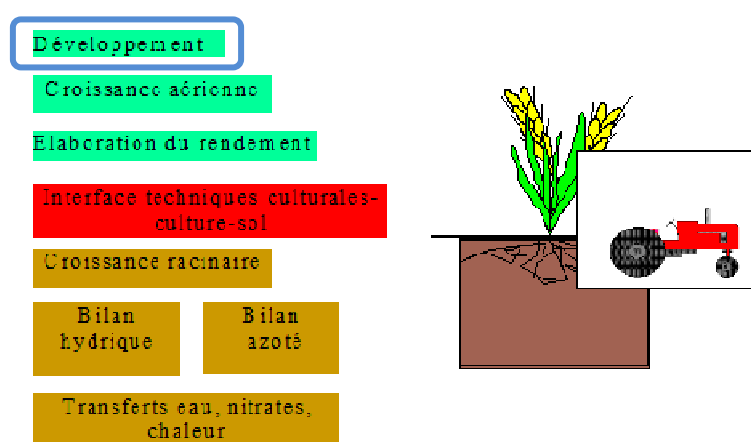


Figure 10.1 – Modules composant le modèle STICS [2].

b. Formalismes de l'OAD phéno

Les formalismes de l'OAD phéno sont illustrés à la Figure 10.2. Les deux grandes phases suivantes peuvent être dissociées dans la modélisation du développement du froment :

- une phase de développement sous-terrain qui va de la semence sèche à la levée en passant par la germination ;
- une phase de développement aérien qui va de la levée à la maturité du grain.

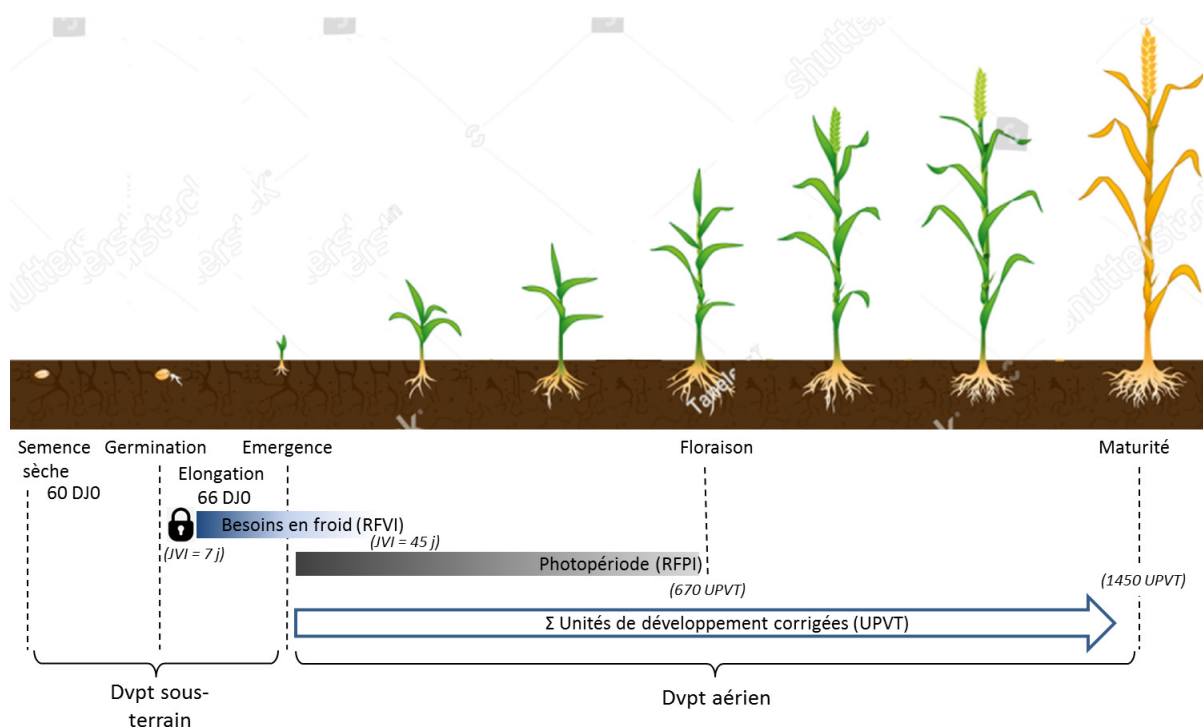


Figure 10.2 – Développement du froment - formalisme OAD phéno [3].

c. Le développement sous-terrain

Le développement de la culture commence lorsque la semence commence à s'imbiber. La germination de la graine se produit lorsqu'une somme de 60 degrés-jour en base 0 est atteinte. Ces données de température proviennent du réseau Pameseb du CRA-W. Pour les stations équipées de sondes de température à la surface du sol, cette mesure de la température est utilisée. Pour les stations météorologiques qui n'en sont pas équipées, la température de l'air à 1,5 m est utilisée.

L'émergence se produit lorsque l'élongation des coléoptiles est supérieure à la profondeur de semis. L'élongation des coléoptiles est fonction de la température du sol. Une profondeur de semis de 3 cm a été implémentée par défaut dans l'OAD phéno ce qui correspond à 66 degré-jour en base 0. Ce paramètre pourrait à l'avenir être encodé dans l'outil par l'agriculteur. La figure 10.3 illustre la fonction entre l'élongation des coléoptiles et la somme de degré-jour.

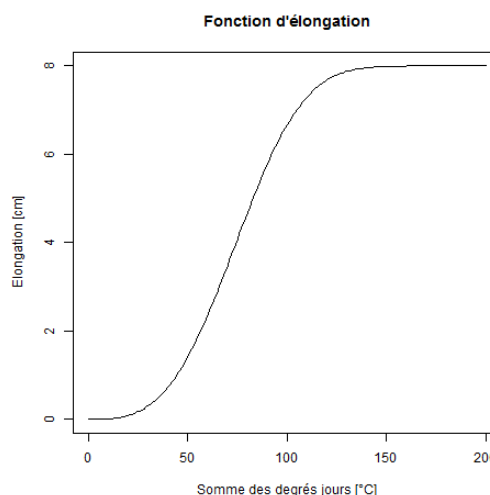


Figure 10.3 – Fonction liant l'élongation des coléoptiles et la somme de degré-jour du sol.

d. Le développement aérien

Les durées séparant les stades successifs de développement sont évaluées en unités de développement (UPVT) reproduisant le temps physiologique de la plante. Le moteur de ce temps physiologique est la température (UDEV) ; il peut être ralenti par des conditions non optimales de photopériodes (RFPI < 1) ou par la non satisfaction des besoins en froid (RFVi < 1). Dans l'OAD phéno, le ralentissement de développement ayant pour cause les stress hydrique ou azoté n'est pas pris en compte.

Ainsi, chaque jour, le parcours physiologique (UPVT) est donné par l'équation suivante :

$$UPVT = UDEV * RFPI * RFVI.$$

Les durées séparant les stades successifs de développement sont propres à chaque variété.

➤ Action de la température (UDEV)

L'action de la température est linéaire entre un seuil minimal et maximal (Figure 10.4). Dans l'OAD phéno, la fonction bilinéaire a été retenue (tracé continu sur la figure ci-dessous). La température minimale a été fixée à 0°C. La température maximale a été fixée à 35°C. Cela signifie qu'en dessous de 0°C, la plante ne se développe pas et que des températures supérieures à 35°C ne participent pas plus au développement de la plante qu'une température de 35°C.

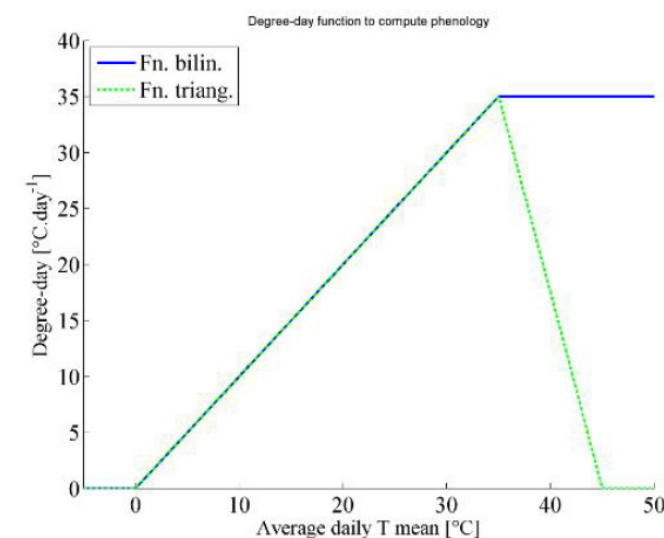


Figure 10.4 – Fonction liant UDEV à la température moyenne de l'air.

➤ Action de la photopériode (RFPI = frein photopériodique)

Le froment, est une plante photopériodique. Cela signifie que son développement est fonction de la durée du jour et que la seule température ne suffit pas à assurer son développement. L'épi devient plus sensible au froid dès lors qu'il a commencé à monter. Les deux freins (vernalisation et longueur du jour) permettent que les stades sensibles n'arrivent que lorsque les températures commencent à se radoucir.

La Figure 10.5 montre le lien entre la longueur du jour et le frein photopériodique (RFPI). Le frein photopériodique s'applique entre les photopériodes seuils. En-dessous de 6 heures 20 minutes de jour, le froment ne se développe pas sous l'effet d'un verrou photopériodique. Au-dessus de 20 heures de jour, le développement de la plante n'est plus freiné par la longueur du jour. Ce frein photopériodique agit du stade d'émergence au stade floraison. Après la floraison, le développement du froment n'est plus freiné par la photopériode.

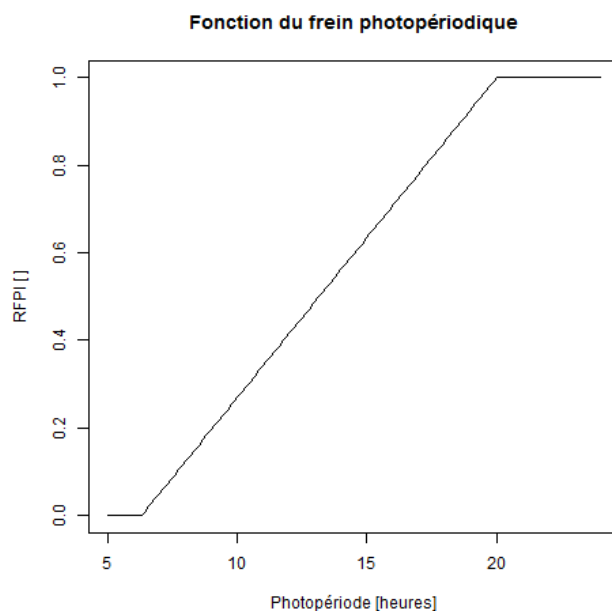


Figure 10.5 – Graphique de la fonction liant le frein photopériodique (RFPI) à la longueur du jour.

En Belgique, la durée minimale du jour atteinte aux alentours du 21 décembre est d'un peu moins de 8 heures. Même lors des jours les plus courts de l'année, le verrou photopériodique n'est donc pas atteint. La photopériode dépendant de la latitude, la Figure 10.6 montre la fonction liant le jour de l'année en jours juliens et le RFPI à Gembloux.

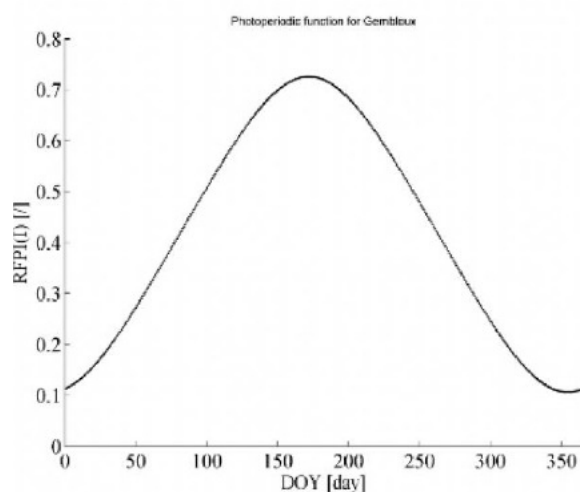


Figure 10.6 – Graphique de la fonction liant les jours juliens au frein photopériodique (RFPI) à Gembloux.

➤ **La vernalisation ou les besoins en froid (RFVI = frein de vernalisation)**

Un blé d'hiver a des besoins en froid pour monter en épi. La non satisfaction des besoins en froid bloque (RFVI = 0) ou ralentit le développement des cultures (RFVI < 1).

Les besoins en froid sont définis par un nombre de jours vernalisants et la valeur vernalisante d'un jour donné (JVI) est fonction de la température. La Figure 10.7 montre la fonction liant la température journalière moyenne de l'air et la valeur vernalisante de la journée telle qu'implémentée dans l'OAD phéno. Les valeurs minimales et maximales sont de respectivement -3,5°C et 16,5°C. Le maximum de la fonction est à 6,5°C.

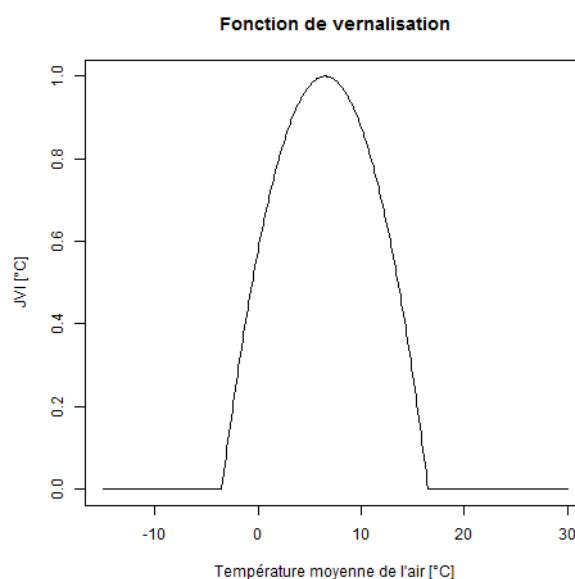


Figure 10.7 – Graphique de la fonction liant la valeur vernalisante d'un jour (JVI) à la température moyenne de l'air.

Le décompte des jours vernalisants démarre à la germination des cultures. Le verrou lié aux besoins en froid est levé après 7 jours vernalisants. Le frein lié aux besoins en froid se fait ressentir jusqu'à atteindre 45 jours vernalisants (voir Figure 10.8). Ce seuil peut changer en fonction des variétés dont les besoins en froid sont caractérisés par l'alternativité.

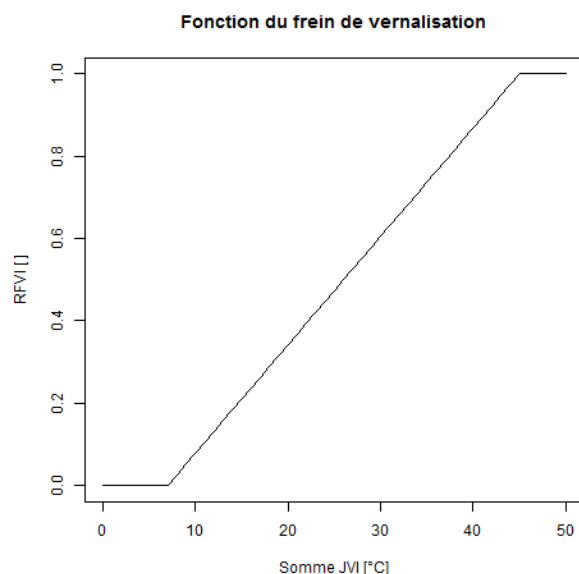


Figure 10.8 – Graphique de la fonction liant le frein de vernalisation (RFVI) et la somme des jours vernalisants (JVI).

1.2.2 Adaptation du modèle aux variétés cultivées en Belgique

Les formalismes du modèle présentés ci-dessus nécessitent d'être paramétrés en fonction des variétés cultivées en Belgique. Un travail de caractérisation des variétés a été réalisé sur base des observations au champ effectuées par le CRA-W. Les paramètres variétaux nécessaires pour alimenter l'OAD sont l'alternativité, la précocité à l'épiaison, la précocité à la floraison et la précocité à la maturité.

a. L'alternativité

Tableau 10.1 – Correspondance alternativité – vernalisation

[4]

Note	ALTERNATIVITÉ	Nb de jours vernalisants nécessaires
1	Très hiver	60 jours
2	Hiver	50 jours
3	Hiver à 1/2 Hiver	45 jours
4	1/2 Hiver	40 jours
5	1/2 Hiver à 1/2 Alternatif	32 jours
6	1/2 Alternatif	25 jours
7	Alternatif	15 jours
8	Alternatif à Printemps	10 jours

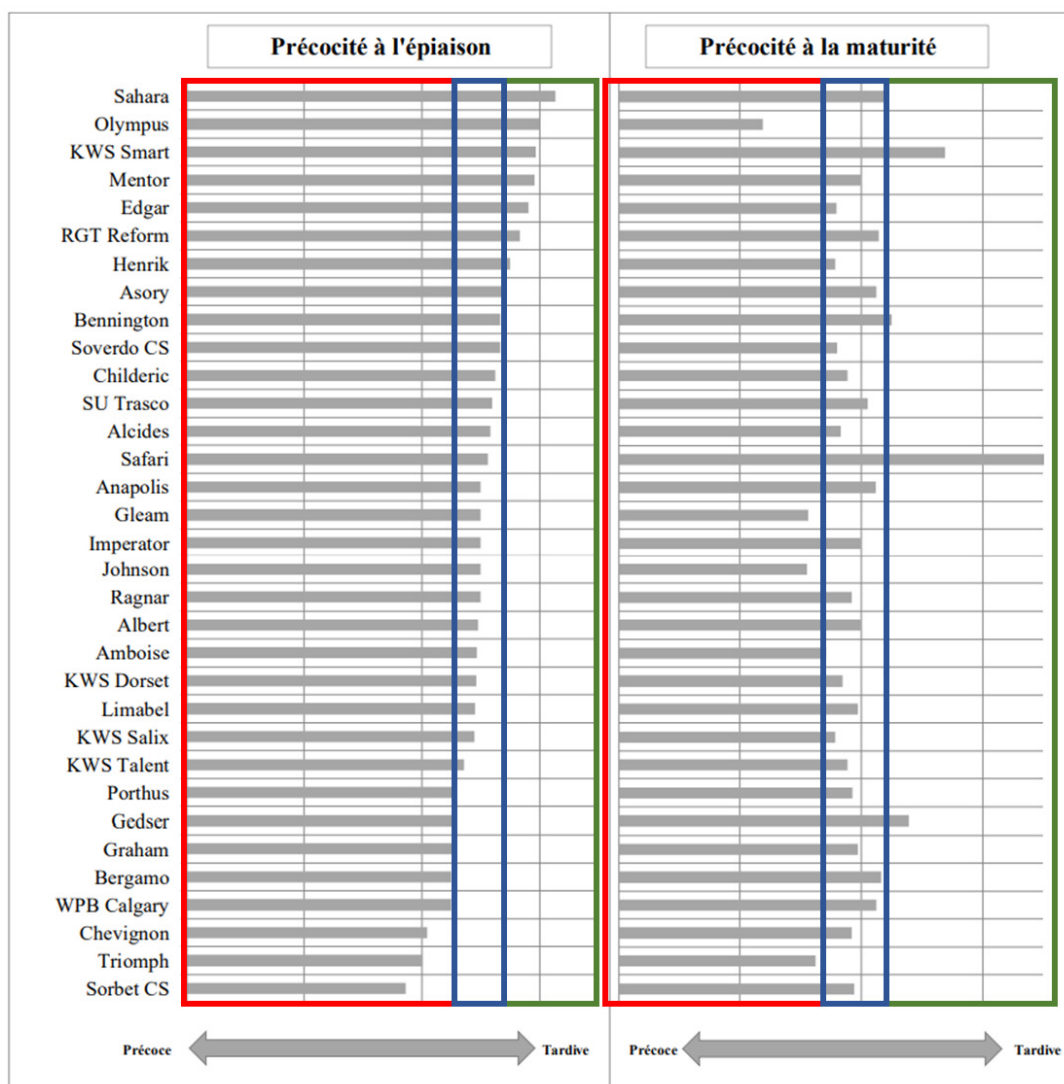
L'alternativité caractérise le besoin en froid relatif à une variété. Selon le nombre de jours vernalisants nécessaires, une note d'alternativité est attribuée sur une échelle de 1 à 9 (voir

Tableau 10.1). Cette information n'est pas facilement disponible auprès des distributeurs qui préfèrent communiquer sur la sensibilité au froid. Le nombre de jours vernalisants pour les variétés implémentées dans l'OAD phéno a été fixé à 45 jours (note de 3, classe « Hiver à demi-hiver »). En Belgique, pour des blés d'hiver semés jusqu'à mi-novembre, les besoins en froid sont toujours couverts. Ce paramètre n'est donc pas limitant jusqu'à présent.

b. La précocité

La précocité du froment à l'épiaison, à la floraison et à la maturité change en fonction des variétés. Afin d'intégrer cet aspect, trois classes de précocité ont été définies : précoce, moyenne et tardive. La précocité des variétés wallonnes a été estimée en se basant sur le classement présenté dans le Livre Blanc Céréales [5]. Le Tableau 10.2 présente le classement des variétés wallonnes selon leur précocité à l'épiaison et leur précocité à la maturation.

Tableau 10.2 – Classement des variétés wallonnes selon leur précocité à l'épiaison et leur précocité à la maturation.



Selon leur degré de précocité, le nombre d'UPVT nécessaires pour atteindre les stades

« épiaison », « floraison » et « maturité » est adapté. L'attribution du nombre d'UPVT par classe de précocité a été réalisée sur base d'essais menés au CRA-W. Le Tableau 10.3 présente les paramètres implémentés dans l'OAD phéno.

Tableau 10.3 – Nombre d'UPVT selon la précocité à l'épiaison, floraison et maturité.

Stade	Précoce	Moyenne	Tardive
Epiaison	540	575	610
Floraison	625	670	715
Maturité	1350	1450	1550

1.2.3 Validation qualitative du modèle

La saison 2017-2018 a été exceptionnelle d'un point de vue météorologique. Voici l'extrait d'une publication présentée au livre blanc céréales de septembre 2018 [6].

« Les quatre premiers mois ont bénéficié de conditions météorologiques parfaites.(...) A partir du mois de mars, le temps a, une fois de plus, perdu toute logique et confondu le fil des saisons. L'hiver est revenu en force, les températures sont redescendues sous les -5°C. (...) Au mois d'avril, les températures se sont envolées pour approcher les 30 degrés à plusieurs reprises. (...) Les mois d'avril, mai, juin et juillet ont connu des températures dignes de la région Méditerranéenne. (...) les moissons ont été plus précoces que jamais. Elles ont débuté avant le 15 juillet dans l'ouest du pays et au 1^{er} août, bien rares étaient les froments encore sur pied. ».

Cette année était remarquable et l'OAD phéno répond bien aux conditions météorologique et a bien reproduit ces particularités tel qu'illustré à la Figure 10.9.

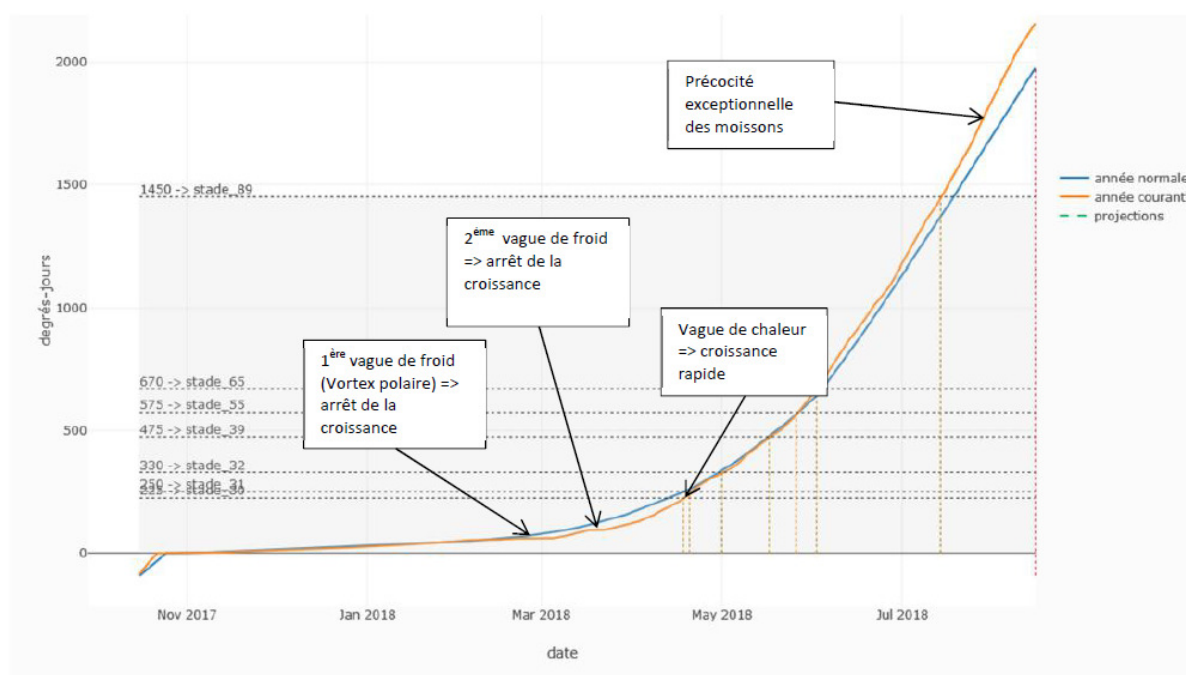


Figure 10.9 – Simulation de la croissance du froment pour la variété Albert pour un semis au 15/10/2017 à 7 km de Louvain-la-Neuve.

1.2.4 Les limites du modèle

L'OAD phéno est le fruit de plusieurs années de recherche. Les formalismes qui le sous-tendent ont été validés pendant de nombreuses saisons, dans différents contextes pédoclimatiques et les sorties ont été confrontées à la réalité de terrain. Cependant les limites suivantes doivent être mentionnées. La principale réside dans la caractérisation des variétés cultivées en Wallonie : les paramètres d'alternativité et de précocité que requiert le modèle ne sont pas toujours connus précisément et doivent être estimés sur base d'observations réalisées en champ. Un premier travail a été réalisé mais pourra être affiné en particulier sur la précocité des variétés.

De plus, de nouvelles variétés font chaque année leur apparition sur le marché. A nouveau, leur caractérisation demande des observations en champs et donc du temps. Toutes les variétés ne seront donc pas directement disponibles dans l'OAD phéno.

1.2.5 Se familiariser avec un nouvel outil

Dans la version « agriculteur », l'OAD phéno sera consultable par quiconque. L'utilisateur n'aura que trois paramètres à encoder afin de lancer une simulation : la variété semée, la date de semis et la localisation de sa parcelle. Les températures journalières moyennes (passées, temps réel, prévisions à 7 jours et moyennes historiques) et la longueur du jour sont automatiquement déduites de la localisation géographique.

Dans la version « expert », l'OAD phéno sera consultable moyennant l'obtention de codes d'accès. Cette version offrira plus de latitude dans la paramétrisation des simulations.

1.3 OAD « CECIBLE » (cécidomyie ... blé ... c'est ciblé !)

Prévision des émergences de cécidomyie orange du blé, *Sitodiplosis mosellana* Géhin

1.3.1 Mystère autour de l'émergence...

Lorsque les gaines éclatent et laissent apparaître l'épi, le froment entre dans la phase de son développement où il est vulnérable à la Cécidomyie orange du blé. Cette phase s'étend jusqu'à la fin de la floraison. La fenêtre de vulnérabilité du froment est d'une dizaine de jours.

Selon les années, plus de quarante jours peuvent séparer les dates d'émergences de la cécidomyie orange. Lors d'années à émergences très précoces, la plupart des froments ne sont pas encore en épis lors des vols de cécidomyies et la culture échappe à l'insecte. A l'autre extrême, lorsque les émergences sont très tardives, les froments ne sont plus vulnérables à l'insecte lorsque ce dernier émerge. La plus ou moins bonne coïncidence entre la phase vulnérable du blé et l'occurrence des émergences est donc critique en termes de risque. Pouvoir déterminer le moment des émergences, c'est aussi pouvoir dire si l'insecte présente un risque et pouvoir l'annoncer aux céréaliers.

L'OAD « CECIBLE » est un des aboutissements de travaux de recherches et d'observations sur la cécidomyie orange du blé entamés par le CRA-W en 2005, et poursuivis sans interruption jusqu'à ce jour. L'objectif principal de ces travaux était de comprendre l'enchaînement des facteurs de développement déterminant au final le moment de l'émergence des adultes.

Pourquoi l'acronyme « CECIBLE » ?

- « **CECI** », pour Cécidomyie : le ravageur concerné,
- « **BLE** », pour Blé : la principale culture cible,
- « **CECIBLE** » parce qu'en prononçant cet acronyme, on entend « **C'est ciblé** », ce qui évoque l'objectif de précision poursuivi dans la construction de cet OAD.

1.3.2 A la recherche des facteurs de développement

La cécidomyie orange du blé est univoltine, ce qui signifie qu'elle ne fait qu'une seule génération par an. On pourrait s'étonner du fait que les larves quittant les épis au début juillet, pour rejoindre le sol humide et tiède, ne poursuivent pas leur développement, alors que les conditions semblent s'y prêter.

a. Le paradoxe de la diapause

La larve qui pénètre dans le sol en juillet est arrêtée dans son développement par une « diapause », un blocage physiologique qui l'empêche d'évoluer en nymphe puis en adulte. Ce blocage durera tant que la larve n'aura pas subi une quantité suffisante de froid (voir Figure 10.10). De façon très paradoxale, en même temps qu'il empêche l'insecte de progresser dans son développement, le froid va avoir pour effet de lever la diapause, et de rendre l'insecte sensible aux bonnes conditions de développement qui surviendront plus tard.

Dans la nature, la larve de cécidomyie est d'abord insensible aux bonnes conditions de développement (de juillet jusqu'à la fin de l'automne). En hiver, le froid lève la diapause, mais sans permettre la reprise du développement. Cette dernière nécessite une phase de bon temps, c'est-à-dire le printemps. La diapause permet donc à l'insecte d'éviter des émergences à des périodes de l'année, où par exemple, il ne trouverait plus d'épi où aller pondre.

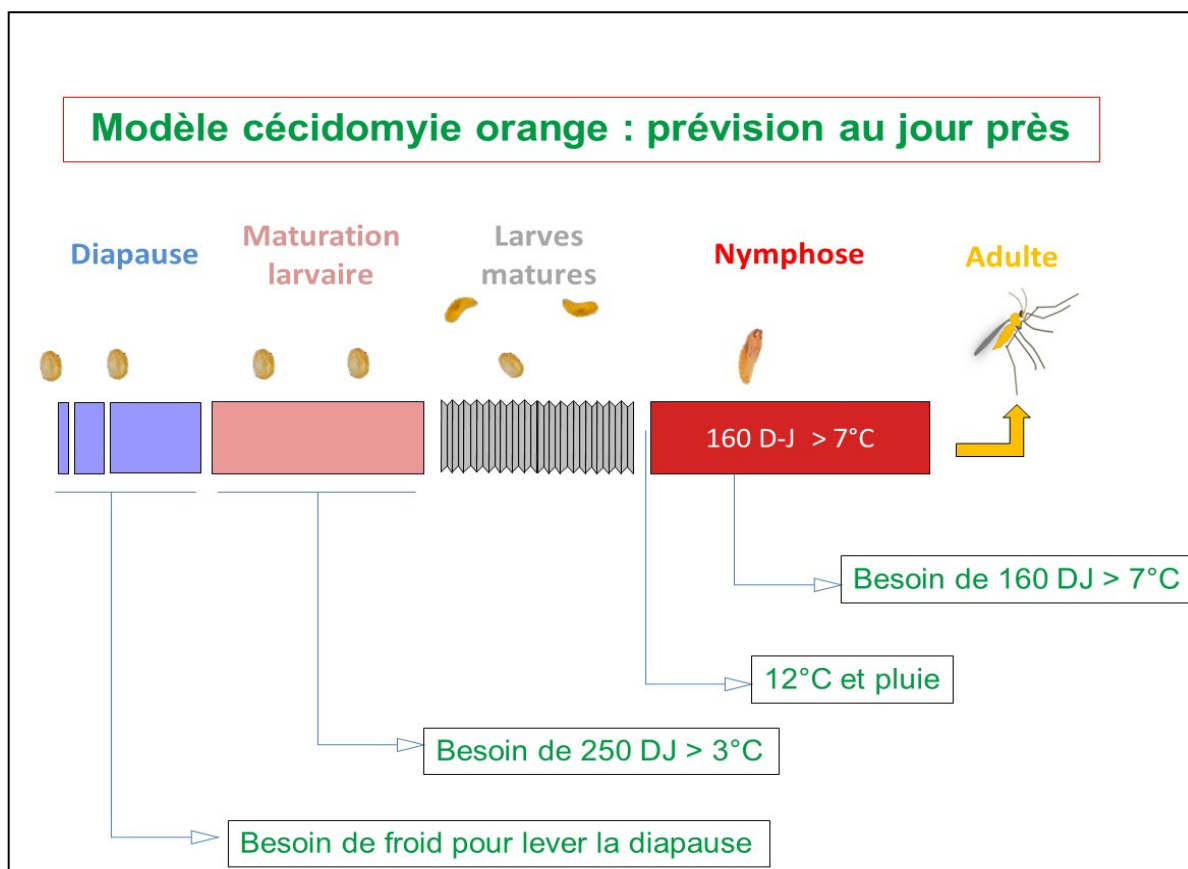


Figure 10.10 – Formalisme du modèle cécidomyie orange.

a. Capitaliser les températures > 3°C

Une fois la diapause levée, toute température supérieure à 3°C permettra à la larve de progresser vers la maturité. Plus les températures seront élevées, plus rapide sera la maturation des larves. Il a été calculé qu'il fallait 250 degrés-jour en base 3, c'est-à-dire > 3°C, pour que les larves atteignent la maturité.

b. Double signal nécessaire pour induire la nymphose

Les larves matures peuvent rester plusieurs semaines sans plus progresser, jusqu'à ce que survienne un double signal constitué d'une température d'au moins 12°C, accompagnée d'une pluie. Ce double signal va induire la nymphose, et la pluie sera appelée « pluie inductrice ».

c. Dernière ligne droite

Entre la pluie inductrice et l'émergence des adultes, il suffit d'une nouvelle capitalisation de 160 degrés-jour en base 7 ($> 7^{\circ}\text{C}$).

1.3.3 Fiabilité et limites du modèle

Ce modèle, appliqué aux 13 dernières années, a prédit les émergences avec une très grande exactitude. En effet, l'écart maximum observé entre émergences prévues et émergences observées a été de deux jours et, en moyenne, la prévision est d'environ $\frac{1}{2}$ jour. La prévision de l'émergence apparaît donc très fiable.

Toutefois, un modèle reste un modèle, et il n'est jamais à l'abri d'un scénario météorologique exceptionnel, qui le prendrait en défaut. Ainsi, dans le modèle développé sur la cécidomyie orange, on a considéré que la quantité de froid nécessaire à la levée de diapause était acquise au 1^{er} janvier. Cette date, définie arbitrairement, n'a évidemment aucune signification biologique. Elle a été prise par facilité. On aurait tout aussi bien pu choisir le 20 décembre ou le 10 janvier. Le 1^{er} janvier signifie simplement « le cœur de l'hiver », un moment où le développement, s'il n'est pas complètement à l'arrêt, est néanmoins très ralenti.

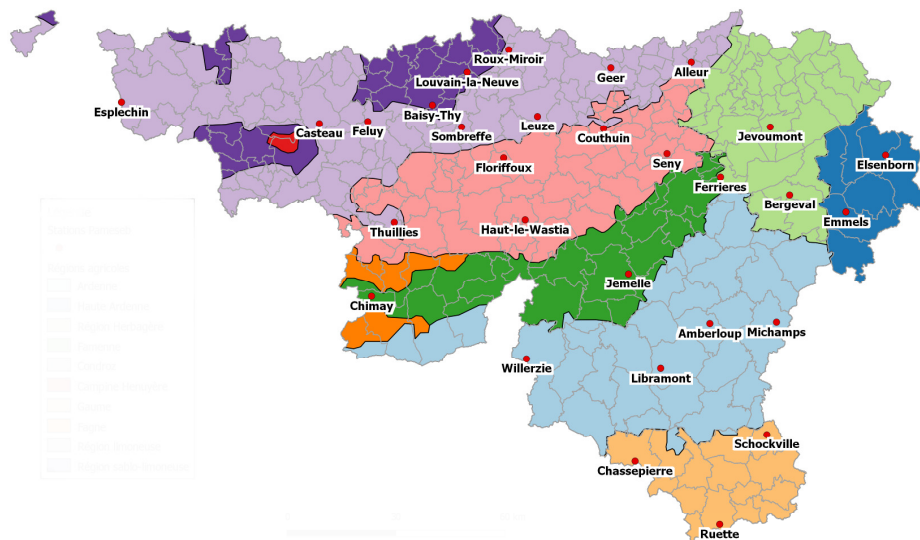
Il reste donc une inconnue sur la quantité réelle de froid nécessaire à lever la diapause. De même, il reste une inconnue sur le début de la capitalisation de températures supérieures à 3°C nécessaire pour la maturation des larves. Ces inconnues ont peu d'impact sur la détermination de la date d'émergence des adultes tant que l'hiver reste l'hiver ... En revanche, si les mois d'hiver étaient encore plus doux que ceux des dernières années, on pourrait se demander si la première accumulation de températures ne serait pas reculée (levée de diapause retardée par manque de froid) ou accélérée (températures élevées après la levée de diapause). Il faudra donc accompagner cet OAD par des observations de terrain, en particulier si les conditions sont exceptionnelles, ou si les pluies inductrices ne sont pas faciles à identifier.

1.3.4 Se familiariser avec un nouvel outil

L'OAD « CECIBLE » sera consultable par quiconque. Afin d'accompagner les premières utilisations, il est prévu d'assortir les prévisions d'émergences calculées par l'OAD d'explications et de résultats d'observations effectuées sur le territoire. Cet OAD est un outil pour mieux anticiper d'éventuelles attaques de cécidomyie. Il est aussi, et surtout dans ses premières utilisations, une invitation à aller au champ, pour confirmer ou rectifier les prévisions.

1.4 La plateforme Agromet

Pour être opérationnels et accessibles au public, les deux outils présentés ci-dessus ont été implémentés sur la plateforme Agromet. Cette plateforme assure la remontée, la gestion et la diffusion de données météorologiques en temps réel.



Un modèle, s'il fait intervenir des températures, ou surtout des pluies, ne fournit des renseignements corrects qu'à proximité des stations météorologiques où ces paramètres ont été mesurés. Le projet AGROMET, projet de recherche du CRA-W réalisé en collaboration avec l'IRM, est actuellement en cours et a pour objectif de spatialiser les données météorologiques selon un maillage de 1 km² couvrant l'ensemble de la Wallonie. Ce réseau de stations météorologiques virtuelles permettra de faire tourner les OAD pour n'importe quel point du territoire. Pour n'importe quelle parcelle, l'OAD CECIBLE donnera les dates prévues d'émergence de cécidomyie orange du blé et l'OAD Phéno donnera le stade de développement du froment.

L'OAD CECIBLE est en particulier très sensible aux précipitations : des épisodes orageux très localisés peuvent entraîner l'émergence de cécidomyies. Il est dès lors très important de suivre les pluies avec une haute résolution spatiale. Pour cela, la plateforme Agromet utilise les cartes de pluies horaires dérivées des images radar de l'IRM.

Les prévisions météorologiques sur sept jours sont également intégrées aux outils. Tout en gardant un regard critique vis-à-vis de celles-ci, cela permet en saison de simuler l'évolution de la situation pour les prochains jours. Au-delà de sept jours, les outils sont alimentés avec les moyennes calculées sur tout l'historique disponible par station météorologique de manière à simuler la suite de la saison en conditions « normales ».

1.5 Perspectives d'amélioration

Les outils présentés lors de ce livre blanc correspondent à une première version. Dans un premier temps, ces outils sont volontairement simples de sorte à faciliter leur prise en main et à assurer leur robustesse. Le travail de recherche réalisé par l'ULiege et le CRA-W va permettre de continuer à les améliorer. Voici quelques améliorations envisagées :

- OAD Phéno :
 - affinage de la caractérisation des variétés cultivées en Wallonie
- OAD CECIBLE :
 - prise en compte du stock de larves dans le sol et meilleure quantification de l'intensité des émergences dans l'OAD cécidomyies ;
 - étude sur la quantité réelle de froid nécessaire à lever la diapause ;
 - couplage avec l'OAD phéno pour aller vers un outil d'avertissement ;
- plateforme AGROMET :
 - spatialisation des températures journalières
 - diffusion des sorties des OAD sous forme de cartes.

Bibliographie

- [1] Site internet de STICS : <https://www6.paca.inrae.fr/stics/>
- [2] N. Brisson, B. Mary (2002). *STICS – Notice concepts et formalismes*. INRA 89p.
- [3] Source image : shutterstock - Image ID : 1298812864
- [4] <https://www.lgseeds.fr/fr/est-ce-possible-de-semer-du-ble-d-hiver-en-mars>
- [5] Livre blanc céréales
- [6] Livre Blanc Céréales Edition septembre 2018. Jacquemin G., Saison culturale 2017-2018, 3 pages

2 Blé dur : une opportunité pour la diversification des cultures ?

G. Jacquemin⁴, A. Hubaux⁵, D. Eylenbosch⁴, N. Maxmini⁶, R. Meza⁴

Peu d'entre nous connaissent le blé dur (*Triticum turgidum* L. subsp. *durum*) autrement que sous la forme de pâtes ou de semoule ; et c'est bien naturel, vu que cette céréale n'a, jusqu'à présent, pas été cultivée dans nos campagnes.

Le blé dur est une céréale à paille, cultivée principalement dans les régions chaudes et sèches du pourtour méditerranéen. Le blé dur est cependant également cultivé dans des régions plus septentrionales telles qu'au Canada ou en Russie.

Son nom est lié à la dureté de son grain. En effet, ce dernier est plus dur que celui du froment ou « blé tendre ». De ces grains, on tire une semoule qui est la matière première de la fabrication des pâtes et du couscous. Le blé dur produit sur le pourtour méditerranéen est presque exclusivement utilisé en alimentation humaine.

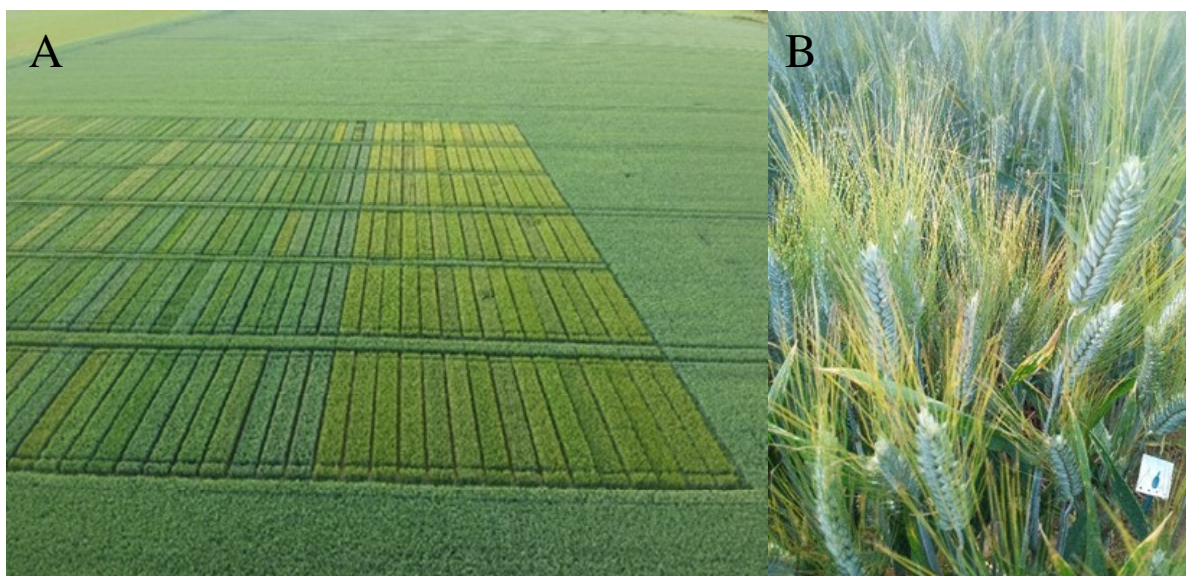


Figure 10.12 – Photo A : Vue aérienne de l'essai blé dur d'Acosse (à droite) accolé à un essai froment (à gauche). La photo date du 13 juin et mets en évidence la différence de coloration des deux cultures. Photo B : Epis de blé dur (CRAW, Acosse 17/06/2019).

⁴ CRA-W – Département Productions agricoles – Unité Productions végétales

⁵ Haute Ecole de la Province de Namur – Catégorie agronomique – TFE Année 2019

⁶ Moulin de Kleinbettingen – Département qualité – Luxembourg

2.1 Origine du blé dur

Les ancêtres des blés se sont vraisemblablement développés dans le sud-est de la Turquie et la Mésopotamie. Une première hybridation naturelle entre un *Triticum* et un *Aegilops* a permis l'obtention d'un blé tétraploïde disposant des génomes A et B (2 jeux de $(2 \times 7) = 28$ chromosomes) dont le grain était vêtu. Il s'agit de l'amidonnier sauvage (*T. dicoccoides*) (Figure 10.13).

Ce blé a ensuite été domestiqué et, par une suite de petites améliorations, une nouvelle espèce a été obtenue, l'amidonnier (*T. turgidum dicoccum*). Par la suite, une mutation particulièrement intéressante a été sélectionnée vers 7000 ans avant Jésus-Christ. Celle-ci conférait au blé le caractère « grain nu », le blé dur était né. Il est un des parents possibles du blé tendre dont il partage 2 des 3 génomes (A et B). Le blé tendre est lui hexaploïde et contient les 3 génomes A, B et D de 14 chromosomes chacun. Le génome D provient d'un autre *Aegilops* et a apporté au blé tendre une adaptation aux régions à hivers froids et étés humides. De cette manière, alors que le blé dur est resté cantonné aux régions bordant la Méditerranée, le blé tendre a, lui, colonisé l'Europe, puis le reste du monde.

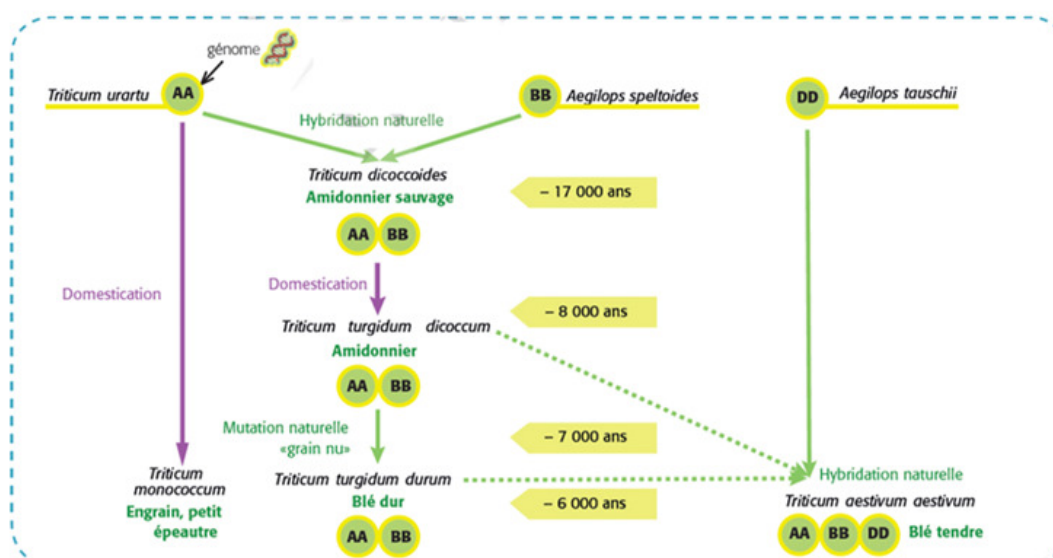


Figure 10.13 – Généalogie du blé dur (Arvalis institut du végétal).

2.2 En quelques chiffres ...

Le premier producteur mondial de blé dur est le Canada avec 7,8 millions de tonnes produites en 2016, suivi de l'Italie (4,9 millions de tonnes) et de la Turquie (3,6 millions de tonnes).

Contrairement à nos voisins français, 2^{ème} producteur européen, la Wallonie ne produit pas de blé dur. En 2017, le blé dur a été la 4^{ème} céréale produite en France (370.000 hectares). Cela représente 4 % de la surface céréalière et 3 % de la production des céréales françaises.

2.3 Spécificités du blé dur et différences avec le blé tendre

La biologie du blé dur est proche de celle des autres céréales à paille mais présente des particularités qui limitent son aire de culture et influencent sa conduite culturale. En effet, le cycle du blé dur est plus court que celui du blé tendre. De plus, il talle moins que les autres céréales et son épi, plus compact, porte des barbes plus longues que celles du blé tendre.

Outre sa zone de répartition et sa structure génétique, le blé dur se distingue du blé tendre par son amande (grain) vitreuse, dure et cassante. Etant donné la dureté de son amande, le blé dur est transformé en semoule et non en farine. Cette semoule est utilisée dans la confection de pâtes alimentaires ou bien consommée telle quelle dans diverses préparations culinaires comme le couscous. Le blé dur peut également servir à la préparation de certains pains, comme c'est notamment le cas en Afrique du Nord.

Le taux moyen de protéines du blé dur est élevé : 14% par rapport à 11,5% pour le blé tendre. Cette différence permet la production de pâtes plus résistantes. On y retrouve moins d'enzymes oxydantes et davantage de caroténoïdes (donnant des pâtes plus jaunes).

Bien qu'il soit majoritairement semé en automne, le blé dur est une céréale de printemps c'est-à-dire que ses besoins en vernalisation sont très faibles voire nuls (de 5 à 10 jours suffisent). Comme pour d'autres céréales, les conditions d'endurcissement au froid et de maintien de la tolérance lors des périodes temporaires de dégels sont déterminantes ; une descente progressive des températures permet aux plantes de s'endurcir et de résister à des températures basses. Pour la majorité des variétés, une mortalité des plantes à partir de -8°C (pour les plus sensibles) et de -14°C (pour les plus résistantes) est observée. En outre, des gelées tardives au printemps peuvent être dommageables au blé dur s'il est en début de montaison. C'est pourquoi, nous devons privilégier les variétés les plus tardives au stade redressement.

Contrairement au blé tendre, la graine du blé dur est peu dormante et par conséquent sensible à la germination sur pied. La dormance des graines est facilement levée par une période de chaleur à partir du stade mi-remplissage. A l'approche de la récolte, le risque de germination est élevé lorsque survient une période de climat frais ($T^{\circ} \text{Max} < 20-25^{\circ}\text{C}$) et humide (pluie $> 20\text{mm}$).

Des précipitations entre le stade épiaison et le stade grain laiteux peuvent se traduire par l'apparition de mouchetures. Il s'agit, en l'occurrence d'une coloration brunâtre autour du sillon du grain. Lorsque le grain est à maturité (teneur en eau $< 20-25\%$), les pluies précédant la récolte peuvent, quant à elles, augmenter le taux de mitadinage et par conséquent réduire le poids à l'hectolitre. Le mitadinage est le fait que le grain n'est pas complètement vitreux, mais en partie farineux. Une fois la maturité atteinte, le blé dur doit être récolté rapidement. Néanmoins, le choix de la variété permet de limiter les risques de germination sur pied dans les zones les plus humides en fin de cycle.

Le blé dur est également sensible aux maladies de l'épi telles que les fusarioses (*Fusarium* et *Microdochium*) dont le développement est favorisé par un temps humide autour de la

floraison. Cette période de sensibilité est assez longue allant du stade « sortie des barbes » au stade « grain laiteux-pâteux ».

2.4 Résultats des essais 2019 et perspectives

En 2019, deux essais variétaux ont été menés par le Centre wallon de Recherches Agronomiques (CRA-W) en vue d'évaluer la pertinence de la culture du blé dur en Wallonie. Treize variétés ont été testées suivant deux dates de semis : 11 variétés lors d'un semis d'automne à Acosse (Hesbaye liégeoise) et 12 variétés pour un semis de printemps à Gembloux. Les variétés Duralis et Duramonte réputées strictement de printemps n'ont pas été semées à l'automne, la variété Fulgur, quant à elle, n'était présente que dans l'essai semé en octobre

Les deux essais ont été implantés dans de bonnes conditions. Les variétés semées en octobre ont pu se développer sans problème avant l'arrivée de l'hiver. Par contre, le semis de février a été suivi d'une longue période de pluies avec des températures assez basses pour la saison. Après une première moitié du mois de mars pluvieux, une longue période de sécheresse s'est installée durant le mois d'avril, qui a, de plus, été accompagnée par une chute brutale de la température (jusqu'à -4°C à Gembloux). Ces conditions sèches et froides ont pu être très néfastes au développement de la culture. L'hiver n'a pas été suffisamment rigoureux pour évaluer de façon fiable, les tolérances au froid de chaque variété. Certaines comme RGT Voilur ont cependant déjà montré des signes de faiblesse.

Les densités au semis étaient respectivement de 325 et 350 grains /m² pour les semis d'octobre et de février. A Acosse, cela a permis d'obtenir un nombre d'épis équivalent au froment (400 épis/m²) semé quant à lui à 250 grains/m². A la sortie hiver, seul Wintergold présentait une précocité au stade montaison équivalente à celle des froments, les autres blés durs étant nettement plus précoces.

Les parcelles semées à l'automne ont été récoltées dans de bonnes conditions le 25 juillet, avant les fortes pluies du 27 juillet (41mm) qui ont notamment affecté la qualité technologique des blés tendres. Par contre, les parcelles semées en février n'ont été récoltées que le 8 août après plusieurs épisodes pluvieux, affectant très significativement la qualité de la récolte. Par comparaison avec l'essai froment qui bordait le blé dur, on peut estimer globalement que la maturité des grains a été atteinte par les variétés de blé dur, une semaine avant celle des froments.

Le Tableau 10.4 présente les résultats obtenus pour les deux semis. Les rendements sont exprimés en kg/ha, le poids à l'hectolitre en kg/hl, le taux de protéines et le taux de mitadinage en %.

Tableau 10.4 – Rendement obtenus (qx/ha) pour les semis d’automne (Acosse) et de printemps (Gembloux), poids à l’hectolitre (kg/hl), taux de protéines (%) et taux de mitadinage (%) en 2019.

Nom variété	Rendement		Poids Spécifique		Teneur en protéines		Mitadinage
	Acosse 2Fongi- 1Rég	Gembloux 1Fongi- 1Rég	Acosse	Gembloux	Acosse	Gembloux	Acosse
	Octobre	Février	Octobre	Février	Octobre	Février	Octobre
	qx/ha	qx/ha	kg/hl	kg/hl	%	%	%
Wintergold	99	70	85,3	80,7	11,9	13,3	26
Casteldoux	93	80	85,2	78,4	11,5	12,8	36
Miradoux	101	78	85,7	79,3	11,1	13,0	22
Toscadoux	98	77	85,8	79,7	11,6	12,7	37
Fulgur SZS	95	-	83,9	-	12,0	-	16
Duraboss	97	66	86,1	78,0	11,8	12,6	29
Durawin	88	66	86,1	79,7	12,9	13,8	12
Durasol	96	74	83,3	79,2	11,5	12,7	60
RGT Anvergur	95	85	84,9	79,6	12,0	12,5	24
RGT Voilur	96	78	84,0	77,8	11,8	12,8	49
RGT Karur	96	77	84,5	78,9	11,8	13,7	48
Duralis	-	78	-	78,6	-	12,8	-
Duramonte	-	71	-	80,0	-	12,6	-
Moyenne de l'essai	96	75	85,0	79,1	11,8	12,9	33

Les essais montrent qu’il est possible de produire du blé dur dans nos régions ; avec un rendement moyen pour le semis d’automne, de 96 qx/ha (min 88 qx/ha et max 101 qx/ha) et un rendement plus faible pour le semis de printemps, de 75 qx/ha (min 65 qx/ha et max 85 qx/ha). À l’inverse, le taux de protéines est supérieur dans le semis de printemps, avec un taux moyen de 12,9%, contre seulement 11,8% pour le semis d’automne. Le rendement étant plus élevé à Acosse, la protéine y a subi un phénomène de dilution. Ces taux sont faibles pour du blé dur mais ils sont à l’image de ceux obtenus par les froments. 2019 peut être qualifiée pour l’ensemble du territoire, d’année à haut rendement mais à faible teneur en protéine.

Si les rendements semblent être prometteurs, il faut néanmoins être attentif à la qualité du grain. Comme cité précédemment, la valeur ajoutée de la culture par rapport au blé tendre, demeure sa destination vers l’alimentation humaine. Pour le semis d’automne, toutes les variétés ont obtenu un bon poids à l’hectolitre (supérieur à 83 kg/hl). Par contre, pour le semis de printemps les résultats sont plus faibles et plus variables entre variétés : la valeur moyenne est de 79 kg/hl, ce qui reste cependant élevé.

Un autre aspect très important à prendre en compte est le pourcentage de mitadinage des graines. En effet, pour être commercialisé en France, le taux doit être inférieur à 20% du lot. Les analyses réalisées, uniquement dans les semis d’octobre, indiquent un taux moyen de 33% pour l’ensemble des variétés ; dépassant largement le taux minimal. Seules deux variétés ont eu un taux de mitadinage inférieur à 20% (Fulgur SZS et Durawin). Cependant, 4 variétés présentent un taux compris entre 20 et 30% (Wintergold, Miradoux, Duraboss et RGT Anvergur). Un renforcement de la fumure sur la fin de cycle pourrait permettre d’augmenter la protéine et de diminuer le mitadinage. Ceci sera une des voies explorées dans les essais de 2020.

10. Perspectives

La phytotechnie du blé dur n'est pas très différente de celle d'un froment panifiable. Le Tableau 10.5 présente les cotations maladies sur une échelle de 1 (très sensible) à 9 (très tolérante) réalisées en 2019. Les maladies observées et évaluées ont été les nécroses foliaires (septoriose et autres), l'oïdium et la rouille jaune. Globalement, les variétés testées se sont révélées plus sensibles à la rouille jaune que la majorité des froments. En outre, dans les parcelles non traitées, les épis, eux-mêmes étaient affectés par la rouille jaune. Il existe cependant une large gamme de sensibilité comprenant des variétés très tolérantes comme RGT Anvergur ou Toscadoux. Le blé dur est également connu pour sa sensibilité à la fusariose mais l'année 2019 ne nous a pas permis d'évaluation sur ce critère.

Tableau 10.5 – Comportement face aux maladies des 13 variétés de blé dur.

Nom variété	Nécroses foliaires (Septoriose, ...) (1-9)	Oïdium (1-9)	Rouille jaune (1-9)
Wintergold	8,0	9,0	7,3
Casteldoux	7,7	9,0	8,3
Miradoux	7,7	9,0	6,8
Toscadoux	8,0	8,0	8,3
Fulgur SZS	8,0	-	6,3
Duraboss	6,7	9,0	8,3
Durawin	5,3	7,0	6,8
Durasol	7,7	6,0	4,8
RGT Anvergur	8,7	8,0	8,5
RGT Voilur	7,0	7,0	7,5
RGT Karur	8,0	9,0	6,8
Duralis	-	8,0	-
Duramonte	-	6,0	-

2.5 Conclusion

Cette première année d'expérimentation semble indiquer que la culture du blé dur est possible dans nos régions. Cette année, l'essai d'automne s'est avéré plus concluant que celui de printemps mais c'est le résultat d'une seule année. Malgré tout, les rendements obtenus pour l'essai de printemps sont acceptables, et sans les pluies de la fin juillet, la qualité aurait sans doute été supérieure à celle obtenue pour les semis d'octobre.

Les facteurs climatiques qui pourraient favoriser l'implantation de la culture en Wallonie sont des printemps et des étés plus chauds et plus secs ainsi qu'un faible nombre de jours de gels en hiver. Cela rencontre les prévisions annoncées suite au dérèglement climatique. Les progrès génétiques vis-à-vis des résistances au gel et au mitadinage pourront bien entendu également favoriser son implantation dans nos régions.

Si aujourd'hui, nos premiers résultats sont encourageants en ce qui concerne la culture du blé dur en Wallonie, il faut néanmoins rester très prudents. Il reste encore beaucoup de chemin à parcourir afin de maîtriser au mieux cette culture.

Une bonne conduite culturale du blé dur en Wallonie passe sans nul doute par une poursuite de l'expérimentation. Pour l'heure, il y a encore de très nombreux aspects à étudier pour soutenir le développement d'une filière « blé dur » en Wallonie.

3 Premières évaluations d'une culture céréalière pérenne (*Th. intermedium*) en Belgique et optimisation de ses productions

L. Fagnant⁷, B. Bodson⁷ et B. Dumont⁷

3.1 Et si les céréales devenaient pérennes ?

La production céréalière est actuellement dominée par des espèces annuelles très productives. En effet, la sélection génétique a favorisé la hausse des rendements en grains, conduisant à l'autosuffisance alimentaire de nos pays. Pourtant, les espèces végétales peuvent nous rendre différents services, notamment environnementaux. A l'heure actuelle, ceux-ci bénéficient d'une attention particulière. En effet, on constate une évolution des attentes des consommateurs vers une production agricole plus respectueuse de la santé humaine et de l'environnement. C'est pourquoi, en Amérique du nord ou encore en Australie, un intérêt grandissant est porté sur la culture de céréales pérennes, capable d'allier des services de production à ceux de protection de l'environnement.

Une céréale pérenne est une graminée qui a été implantée pour plusieurs années. Son cycle de développement est donc similaire à celui des graminées fourragères, à la différence qu'on laisse la plante atteindre le stade reproducteur afin de récolter les grains. De cette manière, la culture passe du stade végétatif, principalement composés de feuilles et de tiges, au stade reproducteur via l'allongement des talles et la mise en place des inflorescences contenant les grains. Une fois la maturité des grains atteinte, les talles meurent. Ensuite, la plante mobilise ses réserves en carbone et azote et recommence un cycle en émettant de nouvelles talles (Figure 10.14). En conséquence, la production de la culture est double en générant à la fois du grain et du fourrage. La qualité de ce fourrage dépendra du stade de croissance de la plante où il est exploité. La pérennité de la culture implique également 2 traits fonctionnels majeurs : la couverture permanente du sol et un système racinaire important. De ce fait, différents services sont promus tels que la réduction du lessivage de l'azote, la réduction des risques d'érosions ou encore l'apport de carbone dans les sols (Figure 10.15). En outre, ceci pourrait induire de plus faibles coûts de production par des besoins réduits en intrants comme les engrais ou les produits de protection des plantes.

⁷ ULiège – Gx-ABT – Axe Plant Sciences – Phytotechnie

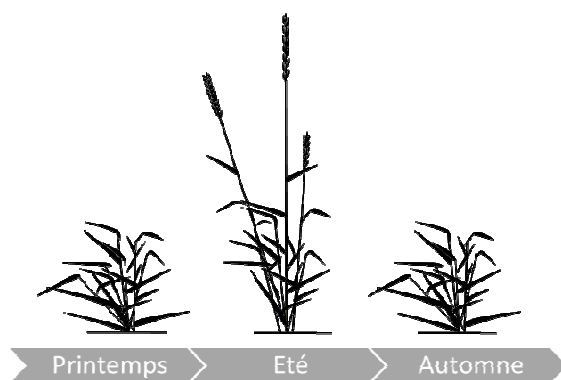


Figure 10.14 – Cycle de croissance d'une céréale pérenne.

Développée depuis quelques décennies sur le continent américain sous le nom de Kernza, l'espèce *Thinopyrum intermedium* subsp. *intermedium* est prometteuse en termes de pérennité et de rendements en grains, qui sont supérieurs à d'autres graminées pérennes. Cette espèce, toujours en cours de domestication, pourrait à l'avenir être une source de diversification de nos productions végétales européennes. En effet, la culture permet d'entrevoir de multiples débouchés via la fourniture de grains pour l'alimentation humaine et de fourrages pour l'alimentation animale ou la filière énergétique (Figure 10.15). Actuellement, des marchés de niches sont développés au Canada et aux USA pour la valorisation du grain. De la bière est fabriquée à partir des grains et la farine de Kernza entre dans la composition de pains ou de pâtes.

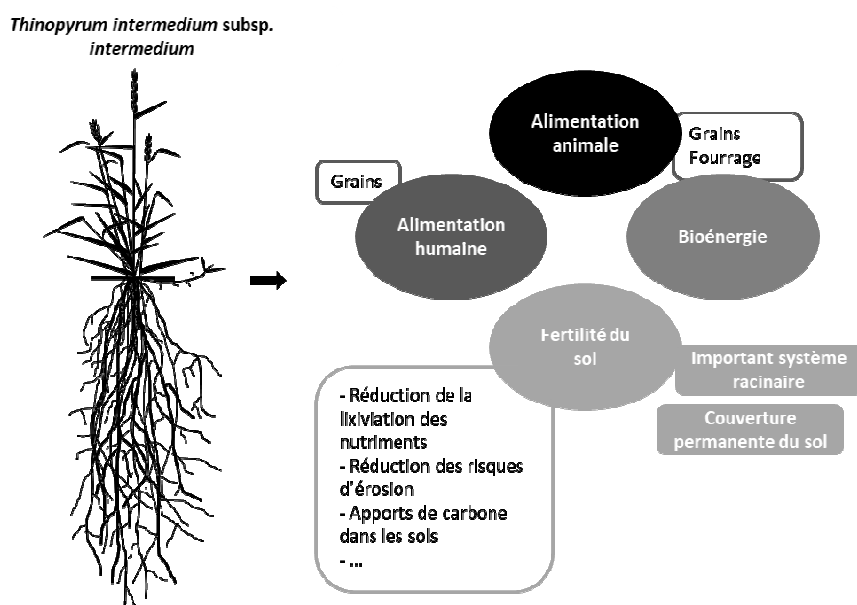


Figure 10.15 – Services rendus par la culture.

3.2 Description de la recherche menée

Bien que les premières valorisations commerciales soient développées en Amérique du nord, la recherche reste essentielle, surtout dans nos régions où l'espèce n'avait encore jamais été implantée. En Belgique, le tout premier champ d'essai a été installé en septembre 2017, sur

les terres de la Faculté de Gembloux. Malgré un grand nombre d'inconnues, cet essai nous a permis d'identifier 2 freins concernant l'intégration de l'espèce dans nos systèmes de culture. Premièrement, son cycle de développement est assez tardif avec une récolte qui a été réalisée, ces deux dernières années, entre le 25 juillet et le 15 août. Cela peut par exemple la rendre plus sensible aux épisodes de sécheresse en été. Deuxièmement, les rendements en grains sont faibles en comparaison à une céréale annuelle, de l'ordre de 1 à 2T/ha.

Avant de promouvoir ou d'adopter ce type de culture dans nos régions, il est primordial d'évaluer ses différentes finalités. En effet, la céréale pérenne devra se démarquer des espèces à hauts rendements utilisées uniquement pour le grain ou le fourrage. Les itinéraires techniques devront également être définis afin d'optimiser les multiples performances de la culture.

Dans ce contexte, une thèse a été lancée au sein de l'Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech. Celle-ci vise à optimiser la double production grain-fourrage de l'espèce via l'utilisation de différents leviers agronomiques. La recherche se concentre autour des 3 facteurs suivants : la fertilisation azotée, l'implantation de la culture et la gestion fourragère de celle-ci.

Actuellement, deux champs d'essais ont été implantés. Le premier, semé en septembre 2017, permet de tester différentes fertilisations azotées dont les doses et les moments d'application varient. La pratique d'une fauche à l'automne est également évaluée. Le deuxième champ d'essais a été semé en 2019 afin d'étudier la date de semis et l'interligne. D'autres essais seront mis en place dans les années à venir.

3.3 Résultats attendus

Différentes mesures sur les rendements et leurs composantes ainsi que sur la qualité des productions sont réalisées (rendements en grains, en matières sèches, valeurs alimentaires du fourrage, taux de protéines dans le grain, etc.). Les possibilités d'utilisation en alimentation humaine sont également explorées. En outre, le développement de l'espèce est étudié afin de décrire son adaptation à nos conditions et ses différents besoins physiologiques (degrés jours, vernalisation, photopériode ou encore nutrition azotée). Concernant la définition d'itinéraires techniques, les différents champs d'essais devraient nous apporter des réponses concernant les leviers agronomiques étudiés :

Implantation : arrangement spatial, densité de plantes, moment d'implantation, etc.

Fertilisation azotée : adaptation de la fumure selon l'année d'implantation, doses et moments d'applications, etc.

Gestion fourragère : moments et nombre de fauches, association avec une légumineuse, etc.

En conclusion, cette recherche se déroulant sur 6 années devrait nous donner une vue globale sur le potentiel de la culture en Belgique et permettre la définition d'itinéraires techniques adaptés à ses multiples performances.

4 Le phénotypage numérique en champs : un outil de caractérisation des cultures

A. Carlier⁸, S. Dandrifosse⁸, A. Bouvry⁸, E. Bustillo Vazquez⁸, B. Dumont⁹, B. Mercatoris⁸

La réduction de l'utilisation des intrants et la demande sociétale poussent à la mise en place d'une agriculture de plus en plus durable en gardant un niveau de productivité suffisant. Une des clés pour arriver à ces fins est l'amélioration variétale. Les avancées des technologies numériques permettent aujourd'hui de mettre en œuvre des outils de caractérisation des cultures pour les chercheurs, les sélectionneurs ainsi que pour les agriculteurs. Dans ce contexte, Gembloux Agro-Bio Tech, en collaboration avec le Centre wallon de Recherches agronomiques et l'Université de Mons, développe un outil pour évaluer de manière non destructive les parcelles d'essais de froment d'hiver. Il s'agit d'une plateforme capable d'enjamber les micro-parcelles et équipée de plusieurs capteurs complémentaires (Figure 10.16). Les données acquises sur les micro-parcelles sont analysées avec des algorithmes d'intelligence artificielle pour obtenir des indicateurs tels que la biomasse, la hauteur du couvert végétal, l'azote contenu dans la plante ou encore le taux de dégâts occasionné par les maladies. Ces indicateurs sont mesurés plusieurs fois au cours de la saison grâce à un système de géoréférencement de précision et enrichissent le travail des sélectionneurs et évaluateurs variétaux. Le projet est actuellement en phase de développement mais les premiers résultats, dont quelques exemples sont présentés ci-dessous, sont déjà très prometteurs.



Figure 10.16 – Plateforme mobile de phénotypage.

⁸ ULiège – GxABT – Biosystems Dynamics and Exchanges

⁹ ULiège – GxABT – Plant Sciences

4.1 Estimation du taux de couverture vert en cours de saison

Grâce à une caméra couleur placée à la verticale au-dessus de la culture, il est possible de quantifier exactement le taux de surface verte ou taux de couverture vert, à savoir la proportion d'éléments (pixels) de couleur verte dans une image. La Figure 10.17 montre par exemple une image comprenant 67 % de surface de plantes vertes et 33 % de sol d'une parcelle de froment. Le taux de surface verte est lié à la surface photo-synthétiquement active des feuilles et est un bon indicateur du développement de la culture, ainsi une parcelle non fertilisée aura une surface verte moins importante qu'une parcelle fortement fertilisée (Figure 10.18). Pour aller plus loin, on observe également sur la Figure 10.19 qu'en présence de maladie non maîtrisée (0 fongicide), la modalité sur-fertilisée a une surface verte davantage réduite par rapport à un froment moins fertilisé. Ce résultat est par ailleurs retranscrit dans les rendements pour cet essai atteint de rouille jaune (Figure 10.20) pour lequel la sur-fertilisation sans protection donne le plus petit rendement.

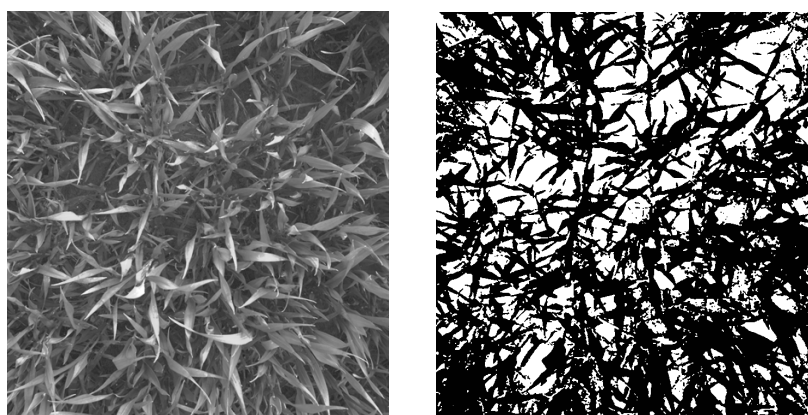


Figure 10.17 – A gauche : Image brute en couleur d'une parcelle de froment. A droite : Image traitée par une méthode de segmentation, les algorithmes ont permis d'identifier les différents éléments, le sol apparaît en blanc et les feuilles en noir.

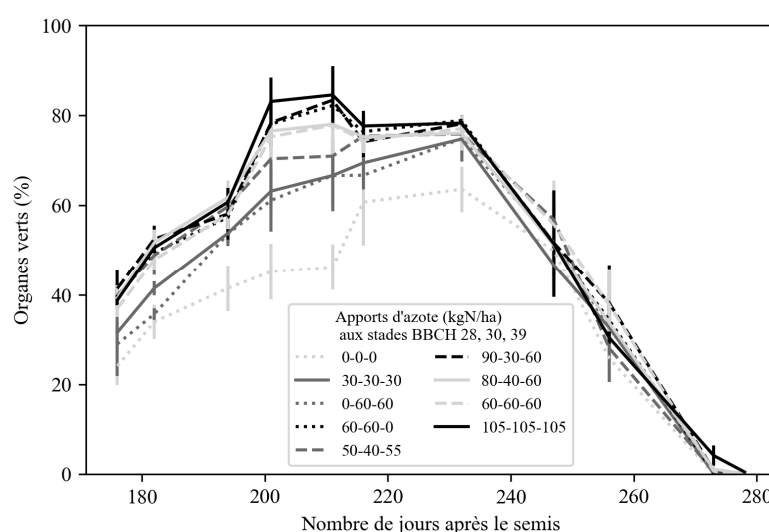


Figure 10.18 – Évolution temporelle du taux de surface verte selon divers modes de fertilisation azotée. Variété Safari.

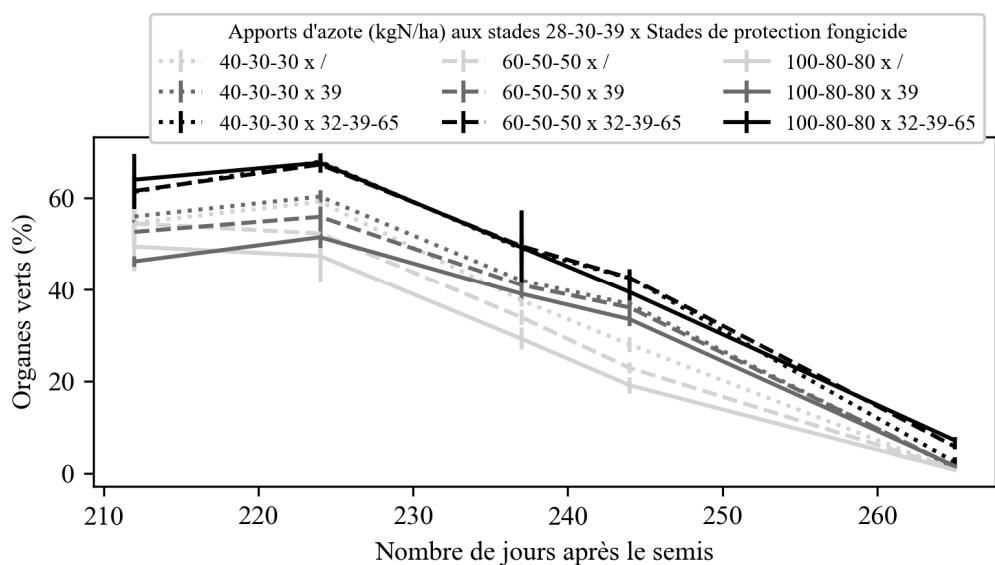


Figure 10.19 – Evolution de la surface verte du froment selon trois modalités de fertilisation soumises à trois modalités de traitement fongicide. Variété KWS Smart.

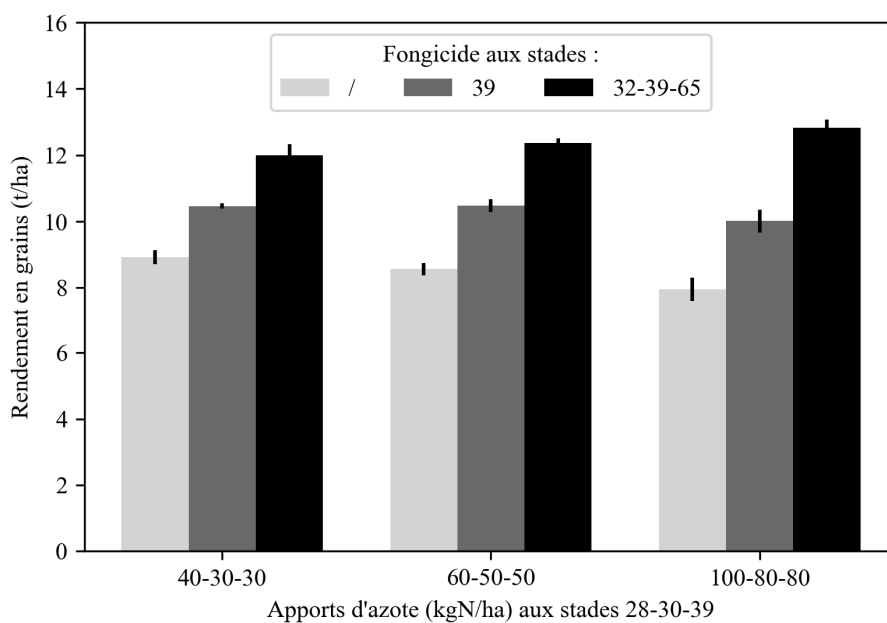


Figure 10.20 – Rendement en t/ha selon trois modalités de fertilisation soumises à trois modalités de traitement fongicide. Variété KWS Smart.

4.2 Estimer la biomasse du froment en cours de saison par vision 3D

A l'instar de la vision humaine, l'utilisation de deux caméras couleur pointant la même scène permet de calculer les distances de profondeur en exploitant le décalage entre les images acquises simultanément par les deux caméras. De cette façon, la hauteur du couvert peut être mesurée en tout point (Figure 10.21). Forts des informations de taux de surface verte et de hauteur, il est possible d'estimer la biomasse de la culture avec une relation estimée à 90% (Figure 10.22).

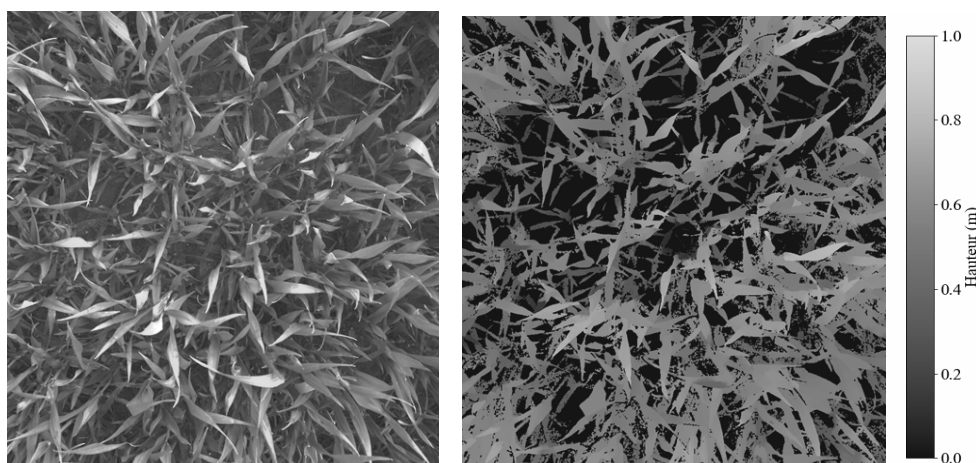


Figure 10.21 – A gauche : Image couleur. A droite : Carte de hauteur et son échelle de couleur (en mètres).

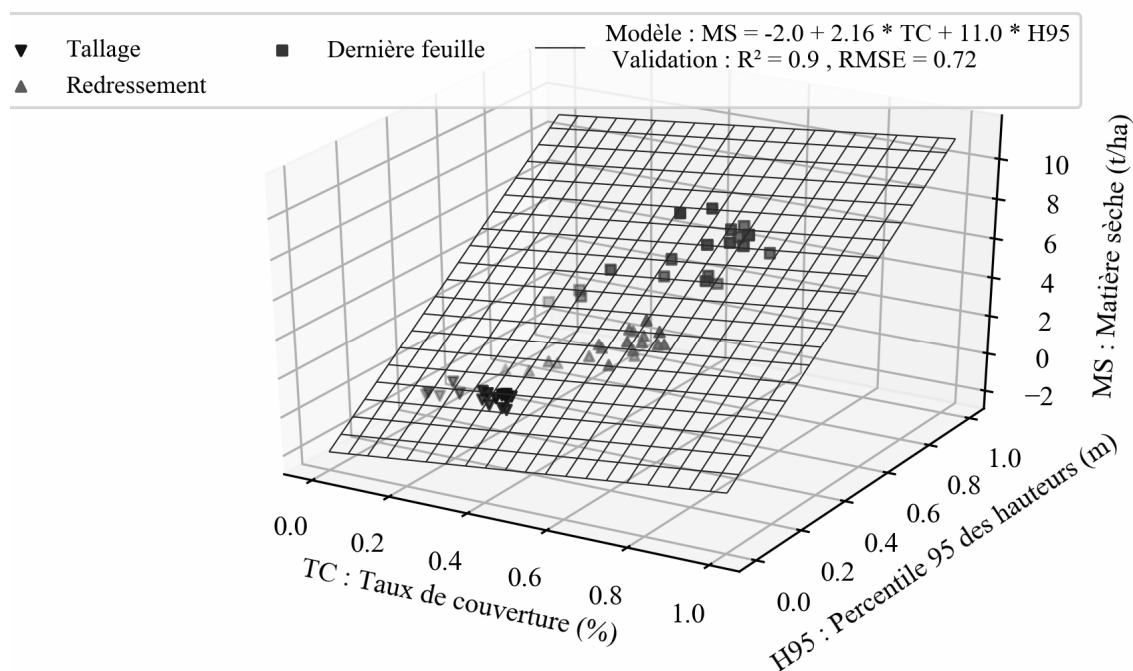


Figure 10.22 – Modèle permettant d'estimer la biomasse sèche du froment à partir de la hauteur et du taux de couverture. Modèle validé pour la variété Safari.

4.3 Quantifier les dégâts foliaires par vision multispectrale

En plaçant des filtres optiques sur une caméra, il est possible d'isoler certaines longueurs d'onde de la lumière réfléchiée par la culture et ainsi mettre en évidence des aspects spécifiques de leur état de santé. Par exemple, en utilisant un filtre optique laissant passer la couleur rouge centrée sur une longueur d'onde de 680 nanomètres, les feuilles de froment endommagées par la rouille jaune ressortent dans l'image filtrée, ce qui permet de quantifier la surface atteinte (Figure 10.23).

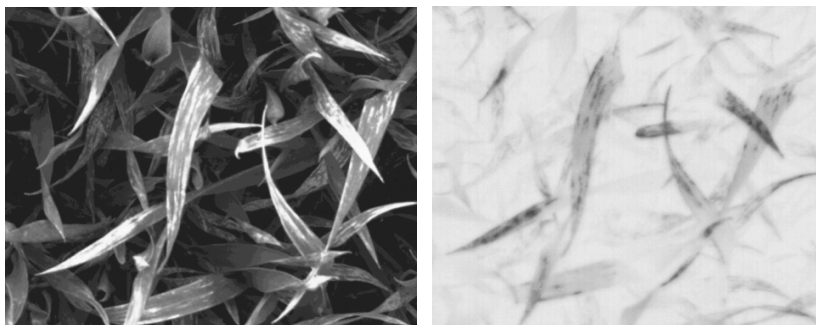


Figure 10.23 – A gauche : Image couleur d'une parcelle de froment atteinte de rouille jaune. A droite : Image filtrée dans laquelle les dégâts dus à la rouille jaune ont été identifiés.

4.4 Conclusions et perspectives

Une première campagne de mesure a permis d'ajuster les réglages de la plateforme et les indicateurs agronomiques extraits des images sont cohérents et très encourageants. Les modèles proposés nécessitent d'être validés sur d'autres saisons culturales et d'autres variétés afin de pouvoir être généralisés. Plusieurs objectifs techniques restent encore à atteindre comme l'implémentation d'autres capteurs tels qu'un système de vision thermographique et l'automatisation complète du système d'acquisition via GPS RTK. D'un point de vue scientifique, les recherches viseront la caractérisation automatique de la dynamique de croissance de cultures céréalières incluant les stress biotiques et abiotiques. De plus, les méthodes d'acquisitions et de traitement de données proposées pourront à moyen terme être adaptées aux engins agricoles et combiner à des outils d'aide à la décision pour agir en temps réel au champ dans un contexte d'agriculture numérique durable.

Remerciements

Financement : Région wallonne : Service public de Wallonie

Direction Générale Opérationnelle Agriculture, Ressources naturelles et Environnement

(DGO3, Projet PHENWHEAT D31-1385).



5 Estimation de l'intensité d'infection de fusariose sur épis de froment d'hiver par imagerie hyperspectrale proche infrarouge

D. Vincke¹⁰, D. Eylenbosch¹¹, G. Jacquemin¹¹, V. Baeten¹⁰, B. Mercatoris¹², P. Vermeulen¹⁰

La fusariose de l'épi est une maladie fongique qui touche différentes espèces de céréales à travers le monde, dont le froment d'hiver. En Wallonie, cette maladie est principalement causée par deux pathogènes à savoir : *Fusarium graminearum* et *Microdochium nivale*. Le développement de la fusariose est favorisé par des conditions climatiques chaudes et humides au stade de floraison des épis. Les symptômes de la maladie sont principalement visibles lorsque les épis sont encore verts. Les lésions sur épis infectés présentent alors une coloration proche de celle des épis à maturité. Par la suite, les symptômes deviennent difficilement distinguables suite au changement de couleur des épis au cours de la maturité.

La fusariose est connue pour entraîner des baisses de rendement et peut engendrer la production de mycotoxines dangereuses pour la santé humaine et animale. L'utilisation de variétés tolérantes constitue une méthode de lutte respectueuse de l'environnement. Actuellement l'évaluation de la tolérance à la fusariose de l'épi est réalisée de manière visuelle par des experts. Ce processus de notation est particulièrement laborieux et chronophage. Le développement d'une méthode d'évaluation automatisée permettrait donc un gain de temps précieux. En outre, différentes études indiquent que l'imagerie hyperspectrale visible et proche infrarouge sont des techniques prometteuses.

5.1 Le projet PhenWheat

Le projet de recherche PhenWheat vise à concevoir une plateforme de proxidtection pour le phénotypage automatisé de cultures de froment d'hiver (*Triticum aestivum*) durant les processus de sélection et d'évaluation variétale en Région wallonne. L'un des traits variétaux étudiés concerne la tolérance à la fusariose de l'épi. Dans ce contexte, une étude a été initiée afin de tester l'imagerie hyperspectrale proche infrarouge pour évaluer l'intensité d'infection par *Fusarium graminearum* sur épis de froment d'hiver à différents stades de développement en laboratoire et au champ.

¹⁰ CRA-W – Département Connaissance et valorisation des produits agricoles – Unité Qualité et authentification des produits agricoles

¹¹ CRA-W – Département Productions agricoles – Unité Productions végétales

¹² ULiège - GxABT – Biosystems Dynamics and Exchanges

5.2 Matériel végétal et acquisition de données

Deux campagnes de mesures ont permis de collecter des données spectrales pour 59 variétés de froment d'hiver en 2018 et 80 variétés en 2019. Les essais ont été menés par le Centre wallon de Recherches Agronomiques (CRA-W) sur le site de Gembloux. Chaque essai a été divisé en deux blocs, un bloc inoculé par *Fusarium graminearum* et l'autre bloc non inoculé. Pour chaque variété, 2 épis ont été collectés au champ chaque semaine dans chaque bloc entre l'inoculation et la maturité des épis. Chaque paire d'épis a ensuite été mesurée en laboratoire au moyen d'une caméra hyperspectrale proche infrarouge. Un total de 1592 images a été collecté sur l'ensemble des deux campagnes de mesure. Ces images hyperspectrales ont ensuite été analysées en utilisant des modèles de discrimination.



Figure 10.24 – Plateforme de mesure d'imagerie hyperspectrale de terrain.

5.3 Librairies spectrales et modèles de discrimination

Préalablement à la conception d'un modèle, il est nécessaire de disposer d'une librairie spectrale. Il s'agit d'un ensemble de spectres typiques des différents objets présents au sein de l'image (ex. : épi fusarié, épi sain, tige, feuille, ...). Cette librairie est ensuite utilisée pour concevoir un modèle permettant de différencier les objets présents au sein de l'image sur base de leur signature spectrale. Une fois le modèle développé, celui-ci peut être appliqué en routine sur de nouvelles images.

Deux librairies spectrales et deux modèles ont été créés pour l'analyse des images acquises en laboratoire, respectivement pour :

- (1) les épis immatures (symptômes visibles à l'œil nu) et
- (2) les épis matures (symptômes invisibles à l'œil nu). Une troisième librairie et un troisième modèle ont été créés sur base d'images collectées directement en parcelles d'essai.

5.4 Résultats de l'analyse d'épis en laboratoire pour la détection de la fusariose

Les modèles développés sur les images acquises au laboratoire en 2018 semblent montrer de bonnes performances pour la détection de la fusariose. L'application de ces modèles à des images de 2019 a permis de valider la qualité des estimations.

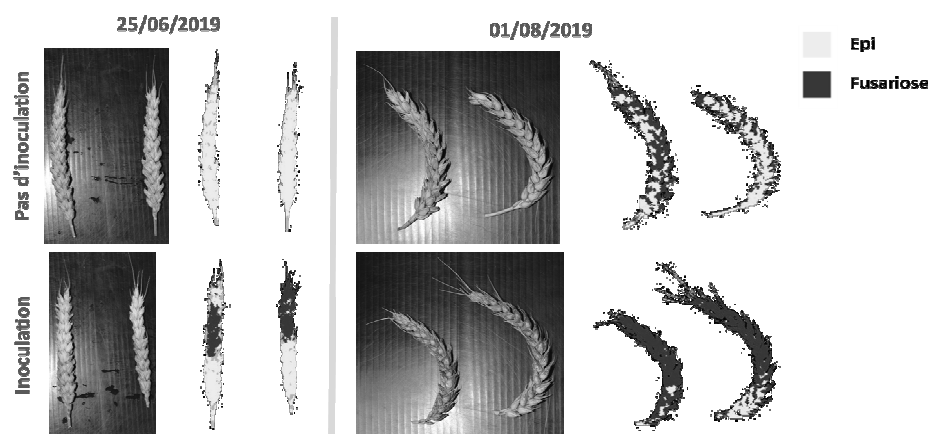


Figure 10.25 – Image RGB et prédite d'épis (a) immatures (symptômes visibles) et (b) matures (symptômes invisibles).

5.5 Résultats de l'acquisition d'images en champ pour la détection d'épis

Le modèle conçu sur base des images collectées en parcelles d'essais semble montrer de bonnes performances pour différencier les épis par rapport aux feuilles. Il est toutefois important de signaler que ces résultats ont été obtenus sur base d'un nombre d'images limité et pour seulement deux dates. Ces résultats encourageants devront donc être confirmés lors des prochaines campagnes de mesures.

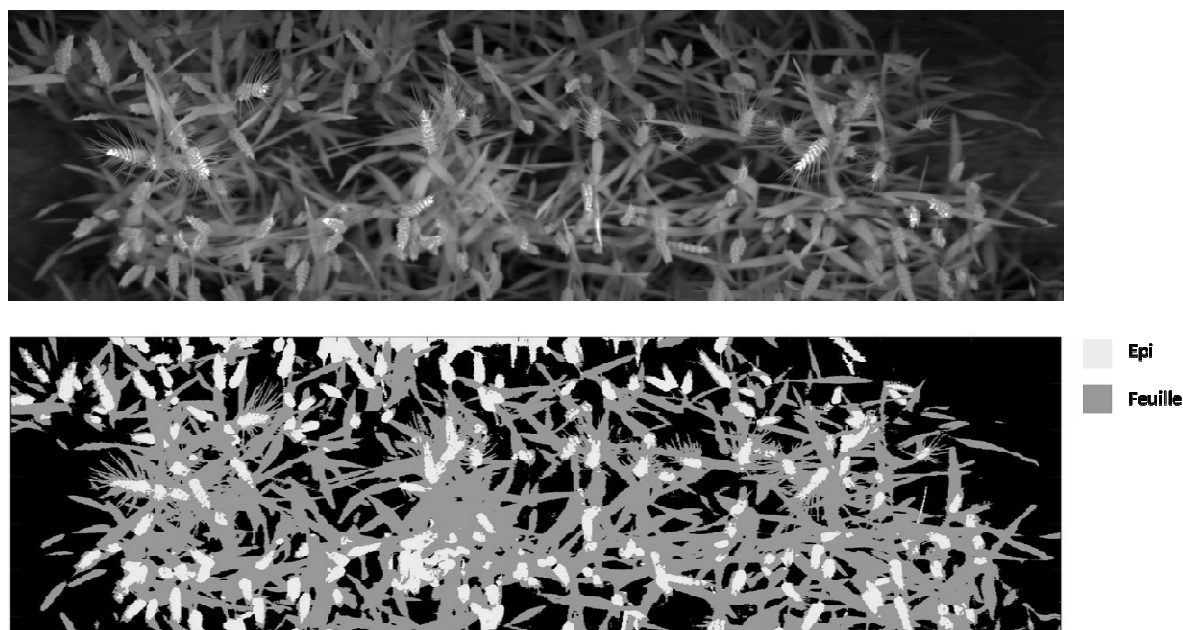


Figure 10.26 – Image hyperspectrale (en haut) et image prédite (en bas) pour la détection d'épis en champs (image acquise le 26/06/2019).

5.6 Conclusion

Les premiers résultats de cette étude semblent donc confirmer le potentiel de l'imagerie hyperspectrale proche infrarouge pour détecter la présence de fusariose de l'épi à différents stades de développement de l'épi, y compris lorsque les symptômes ne sont plus visibles à l'œil nu. De plus, les premières mesures réalisées en parcelles d'essais semblent confirmer la possibilité de détecter les épis directement au champ. La confirmation de ces résultats lors des prochaines campagnes de mesures constituera une étape clé vers la création d'une méthode d'évaluation automatisée de l'intensité d'infection de la fusariose de l'épi sur froment d'hiver.