

# PHENOTOL : Phénotypage variétal de la tolérance et des traits associés en céréales

Jean-Charles DESWARTE<sup>1\*</sup>, Marie-Odile BANCAL<sup>2</sup>, Pierre BANCAL<sup>2</sup>, Mélanie HEERS-MAKAROVSKY<sup>2</sup>, Jérôme AUZANNEAU<sup>3</sup>, Katia BEAUCHENE<sup>4</sup>

1 - ARVALIS - Station de Villiers-le-Bâcle - ZA des Gravieres, Route de Châteaufort, 91190 Villiers-le-Bâcle

2 - UMR 1402 Écosys-AgroParisTech - AgroParisTech - 22 place de l'Agronomie, 91120 Palaiseau

3 - AGRI-OBTENTIONS - Chemin de la Petite Minière, 78280 Guyancourt

4 - ARVALIS - Station d'Ouzouer-le-Marché - 45 voie Romaine, Ouzouer-le-Marché, 41240 Beauce-la-Romaine

\*Coordinateur : Jean-Charles DESWARTE, [jc.deswarte@arvalis.fr](mailto:jc.deswarte@arvalis.fr)

## 1 Introduction

### ► Impact des stress sur le rendement des céréales

Dans le contexte cultural français et européen, les stress biotiques (maladies cryptogamiques notamment) et abiotiques (stress hydrique, azoté ou thermique) peuvent pénaliser lourdement les rendements des céréales sauf intervention culturale des producteurs. Le changement climatique conduit à une augmentation des événements extrêmes de plus en plus imprévisibles aboutissant à des stress qui mettent en danger la durabilité des systèmes de production existants. Parallèlement, les enjeux économiques, environnementaux, sociétaux et réglementaires incitent à réduire l'usage d'intrants (produits phytosanitaires, fertilisants, eau d'irrigation), au risque d'amplifier les impacts négatifs des épisodes de stress sur la production quantitative et qualitative des cultures.

### ► Parades vis-à-vis des stress

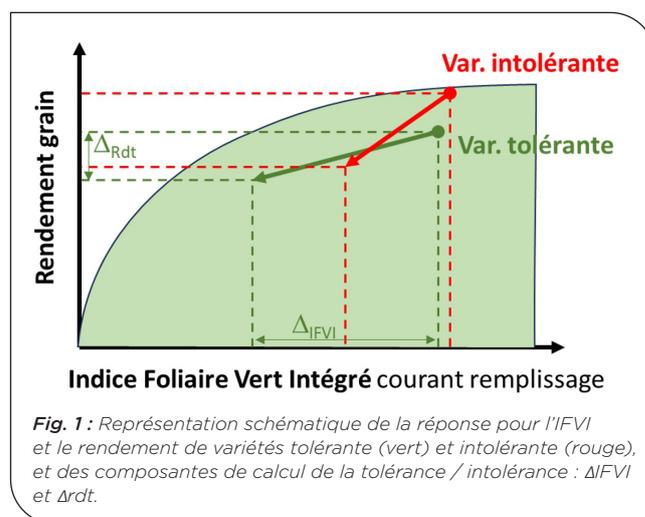
Face aux stress qui affectent les plantes, plusieurs stratégies de réponse permettent de limiter la perte de productivité. Parmi ces stratégies, on peut citer l'échappement (désynchronisation entre le facteur de stress et les périodes sensibles de la plante), la résistance (un ensemble de mécanismes qui empêche la mise en place du facteur de stress) et la tolérance (une aptitude à limiter l'impact sur la production finale malgré l'expression de symptômes).

Ces stratégies peuvent être combinables pour aboutir à des itinéraires techniques à la fois productifs et économes en intrant. Cependant, en fonction des stress envisagés, certaines stratégies sont privilégiées par rapport à d'autres : dans le cas du stress froid (céréales de printemps), les producteurs mettent en œuvre des mécanismes d'échappement, alors que la résistance est privilégiée pour les maladies foliaires, notamment pour sa facilité d'évaluation. La tolérance est particulièrement recherchée en cas de stress multiples mettant en défaut les stratégies ciblées d'échappement et de résistance. Par ailleurs, il est primordial de travailler conjointement sur ces différentes stratégies afin de s'assurer qu'elles ne soient pas antagonistes, dans le cas d'un même stress, et également entre stress.

### ► Définition de la tolérance

La notion de tolérance est donc liée à celle de résultat : la capacité à maintenir un niveau de production (et/ou

de qualité) élevé en présence avérée de stress (Ney *et al.*, 2013). Dans le cas des maladies foliaires des céréales à paille, Paveley *et al.* (2001) estiment la tolérance par le rapport entre perte de rendement et unité de surface symptomatique. Cette approche simplifiée, qui permet d'identifier des comportements tolérants, est généralisable à tout stress passant par une baisse de surface verte. Mais elle suppose implicitement la proportionnalité entre surface verte et rendement, alors que Gate *et al.* (2006) trouvent au contraire une relation curvilinéaire tendant vers un plateau aux fortes valeurs d'Indice Foliaire Vert Intégré (IFVI), résultant notamment de la saturation de l'interception lumineuse pour des valeurs élevées d'indice foliaire (LAI) (fig. 1).



Ainsi, il est possible de caractériser la tolérance d'un couvert à un stress selon 3 critères (Bancal *et al.*, 2022) :

- sensibilité (perte d'IFVI sous stress)
- tolérance « aspécifique », liée au rendement potentiel
- tolérance « spécifique », liée à la réponse propre à chaque culture ou variété.

La tolérance aspécifique indique que, toutes choses égales par ailleurs, un couvert à haut potentiel est plus tolérant (au sens du rendement) qu'un couvert à moindre potentiel. C'est-à-dire qu'il peut sans mécanisme particulier perdre de la surface verte sans impact sur le rendement.

Par contre, la tolérance spécifique exprime l'écart à cette tendance. Elle repose sur différents mécanismes (Ney *et al.*, 2013) dont nombre semblent valables pour

différents stress biotiques et abiotiques (Atkinson and Urwin, 2012) et apparaissent à des échelles anatomiques variables : organe atteint (compensation partielle de la photosynthèse au sein des tissus foliaires -Zuckerman *et al.*, 1997 ; Bingham *et al.*, 2009; Scholes and Rolfe, 2009-) ; plante (compensations entre organes sains et stressés tant fonctionnelles par les réserves - Gaunt and Wright, 1992; Serrago *et al.*, 2011; Bancal *et al.*, 2012- que morphogénétiques par l'émission de nouveaux organes - Pinet *et al.*, 2015-) ; couvert (répartition spatiale des symptômes sur les organes d'acquisition des ressources qui joue directement sur les pertes de croissance -Bancal *et al.*, 2007, 2008-).

La tolérance globale (spécifique + aspécifique) semble donc résulter d'une combinaison de ces très nombreux mécanismes à effets partiels faibles impliqués dans les relations sources x puits à l'échelle du couvert végétal (Parker *et al.*, 2004; Foulkes *et al.*, 2006).

### ► Hypothèses physiologiques derrière la tolérance

Le nombre des mécanismes impliqués, leur effet partiel faible et leur probable interaction interdisent une explication analytique en vue du pilotage de la tolérance. Une démarche corrélative par modélisation statistique a mis en évidence un lien entre l'expression de la tolérance et deux traits majeurs du blé tendre (Bancal *et al.*, 2015): la date de sénescence des parties vertes (S) et le Poids de Mille Grains (PMG). La sénescence S semble particulièrement liée aux stress de fin de cycle (pendant le remplissage) (septoriose -Bancal *et al.*, 2015, sécheresse -Christopher *et al.*, 2016-). Il est intéressant de remarquer que certains de ces traits conférant de la tolérance sont mesurables sur des cultures saines (Collin *et al.*, 2018).

### ► Intérêt en sélection variétale

La tolérance peut être un levier complémentaire en agriculture pour maintenir la production tout en limitant l'usage de produits phytosanitaires. Il a été démontré qu'il n'y avait pas d'antagonisme entre tolérance et potentiel de rendement (Gouache *et al.*, 2014; Van Den Bosch *et al.*, 2022). Cependant, la tolérance n'étant évaluée qu'au regard conjoint de la dynamique des surfaces vertes affectées par les symptômes et du rendement, elle ne peut être aisément prise en compte lors des processus de sélection ou même d'inscription, l'acquisition répétée des données de surface verte étant trop coûteuse en temps.

### ► Nécessité et limites des capteurs et du phénotypage à haut débit

Le développement de combinaisons de vecteurs et de capteurs pour la surveillance des cultures offre désormais de nombreuses opportunités de suivi des stress. Les capteurs disposent le plus souvent de canaux de mesures compatibles avec l'observation de l'état des cultures, à travers le calcul d'indices de végétation. Le recours à des couples vecteurs-capteurs doit pouvoir permettre d'évaluer en routine la dynamique de l'indice foliaire, et donc de fournir l'un des paramètres clés de la tolérance. Cependant, si un lien qualitatif entre télémétrie et indice foliaire a depuis longtemps été mis en évidence, la recherche peine à établir des prédictions quantitatives assez précises pour permettre un calcul de tolérance.

**L'objectif du projet Phénotol est donc de valoriser la description du couvert permise par les outils de phénotypage à haut débit pour permettre une évaluation de la tolérance variétale sur des effectifs accrus de géotypes et d'environnements. Ceci implique de transposer des indices agronomiques issus de mesures manuelles en des combinaisons d'indices de végétation (IV) robustes, et de les acquérir en routine sur des effectifs et des dispositifs compatibles avec les besoins des sélectionneurs et des évaluateurs.**

## 2 Matériel et méthode

Le projet a requis la mise en place d'expérimentations agronomiques au champ au cours des campagnes 2019, 2020 et 2021, conçues pour permettre un calage méthodologique en début de projet avec peu de variétés mais beaucoup de stress différents. Puis on a élargi la diversité variétale dans un cadre méthodologique moins contraignant. Chacune de ces expérimentations a été suivie avec des outils de phénotypage.

### ► Conduite d'essais avec environnements et variétés contrastées

#### Essais de calibration

Deux essais ont été conduits de telle façon à diversifier les conditions de croissance et permettre la calibration des mesures de télémétrie par des mesures de référence manuelles.

Un premier essai a été conduit à Ouzouer-le-Marché (41) sous des abris mobiles en 2018-2019 (identifiant 145482). Il regroupait 8 variétés commerciales de blé tendre, contrastées pour leur précocité à épiaison (Tab. 1), qui ont été exposées à 7 conduites culturales différentes, combinant des dynamiques de nutrition azotée, d'alimentation en eau, et une protection fongicide contre les maladies foliaires (Tab. 2).

| Variété        | Préc. Épiaison |
|----------------|----------------|
| Lear           | 4.5            |
| Soverdo CS     | 5              |
| Anncy          | 5.5            |
| RGT Cyclo      | 6              |
| Rebelde        | 7.5            |
| Hybiza         | 7.5            |
| Hydrock        | 7.5            |
| Montecristo CS | 8              |

Tab. 1 : Variétés de blé tendre d'hiver retenues pour l'essai 145482 en 2018-2019 à Ouzouer-le-Marché.

| Modalité (E) | Fertilisation (N)      | Irrigation           | Traitement fongicide* |
|--------------|------------------------|----------------------|-----------------------|
| 1            | ≥ X                    | ETM                  | T                     |
| 2            | ≥ X                    | ETM                  | NT                    |
| 3            | X-80kg/ha ; Car. Préc. | ETM                  | T                     |
| 4            | X-80kg/ha ; Car. Tard. | ETM                  | T                     |
| 5            | ≥ X                    | Séch. précoce sévère | T                     |
| 6            | ≥ X                    | Séch tardive sévère  | T                     |
| 7            | X-80kg/ha ; Car. Préc. | Sec tardif léger     | T                     |

Tab. 2 : Modalités environnementales mises en œuvre dans l'essai 145482. X : dose X a priori ; ETM : complémentation hydrique par irrigation pour satisfaire les besoins à l'ETM ; T/NT : traité/non traité fongicide (septoriose notamment)

Les mesures ont consisté en la détermination du rendement et de ses composantes, le suivi de la date d'épiaison, et des mesures hebdomadaires à bi-hebdomadaires de la canopée par capteurs de phénotypage haut-débit (Beauchêne *et al.*, 2019; caméras multi-spectrales (300-950nm) et RGB), des mesures manuelles d'indice foliaire repensées pour limiter au maximum l'altération des microparcelles, et de suivi non-destructif de la sénescence des limbes) (voir ci-dessous).

Un second essai conduit à Aubigny-aux-Kaisnes (02) en 2021 (identifiant 149157) s'appuyait sur 20 variétés et 3 conduites combinant la nutrition azotée (X et X-80) et la protection fongicide (avec ou sans protection contre la septoriose) : N+F+, N-F+, N+F-. Les variables mesurées étaient identiques à 2019, en ayant recours simultanément à 2 outils de phénotypage : une arche circulant à 1.5m dessus du couvert (acquisition avec caméra multispectrale), et un drone (caméra 5 canaux). Sur les essais de calibration (Id 145482 et 149157), on a déterminé, pour l'ensemble des modalités sur un seul bloc, l'Indice Foliaire Vert Intégré (IFVI) de référence par une succession de mesures manuelles et de notations visuelles : mesure d'une surface foliaire déployée (en cm<sup>2</sup>/brin), à épiaison, sur un microéchantillon représentatif du couvert, et notations non destructrices d'autre part, de densité épi permettant de passer à l'échelle du m<sup>2</sup> et de progression de la sénescence du feuillage. On obtient ainsi, avec une perturbation minimale du couvert le GLAIO (en m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>), et une dynamique des surfaces vertes pendant le remplissage. Les mesures par télémétrie ont sans difficulté été acquises sur la portion préservée des microparcelles (ensemble des blocs).

### Essais de validation

2 essais ont été conduits en 2020 et 2021 pour permettre la validation des méthodes et proxys calculés sur les données de calibration.

L'expérimentation 2020 basée à Villers-Saint-Christophe (02)(id. 146672) s'appuyait sur 16 variétés (6 communes à 145482 et 5 communes à 149157) et 3 conduites combinant la nutrition azotée (X et X-80) et la protection fongicide (avec ou sans protection contre la septoriose) : N+F+, N-F+, N+F.

L'essai 2021 a été conduit à Orsonville (78)(id. BH-Pheno-Or), avec toutes les variétés et modalités communes à l'essai 149157. En plus de l'observation du stade épiaison, l'essai combinait mesures du rendement et phénotypage hebdomadaire par drone (voir ci-dessous), entre épiaison et maturité.

#### ► Acquisition de données de phénotypage à haut débit, expression d'indices de végétation et estimation des composantes de l'IFVI

Les données de phénotypage haut-débit ont été pour partie acquises avec des caméras multispectrales (démarche prospective de recherche de proxy) et de caméras à 5 longueurs d'ondes (démarche de test et de validation), au plus tard à partir de l'épiaison, avec une fréquence *a minima* hebdomadaire.

| Campagne  | Site                          | Capteur/vecteur  |
|-----------|-------------------------------|--|
| 2018-2019 | Ouzouer-le-Marché (41)        | Caméra multispectrale sur portique de phénotypage  |
| 2019-2020 | Villers-Saint-Christophe (02) | Caméra multispectrale sur arche de phénotypage   |
| 2020-2021 | Aubigny-aux-Kaisnes (02)      | Caméra multispectrale sur arche de phénotypage<br>Caméra DJI P4 (5 canaux) sur drone hexacopteur |
|           | Orsonville (78)               | Caméra Micasense (5 canaux) sur drone hexacopteur  |

Tab. 3 : Couples Capteurs/vecteurs de phénotypage à haut-débit utilisés dans chacune des expérimentations.

Les spectres acquis sur les parcelles par les caméras multispectrales ont été utilisés pour calculer un ensemble de 75 indices de végétation (<https://www.indexdatabase.de/>). Ceux-ci ont fait l'objet de régressions linéaires simples ou multiples pour réestimer les composantes de l'IFVI<sub>manuel</sub> (GLAIO à épiaison, dynamique de sénescence), puis l'IFVI<sub>capteur</sub> lui-même, en comparaison de la référence manuelle mesurée sur un bloc par essai.

Chaque camera véhiculée par drone ayant un nombre limité de bandes de mesure de réflectances, et celles-ci n'étant pas exactement en cohérence avec les longueurs requises pour le calcul d'indices de végétation dans les essais de calibration (Fig. 2), il a été nécessaire de recalculer le meilleur proxy pour chaque appareil. A partir des spécifications de réflectance de chaque capteur et des mesures de réflectance acquises avec des caméras multispectrales dans les essais de calibration, un proxy adapté à chaque drone a été redéfini, et appliqué aux essais de validation pour estimer les IFVI de chaque modalité.

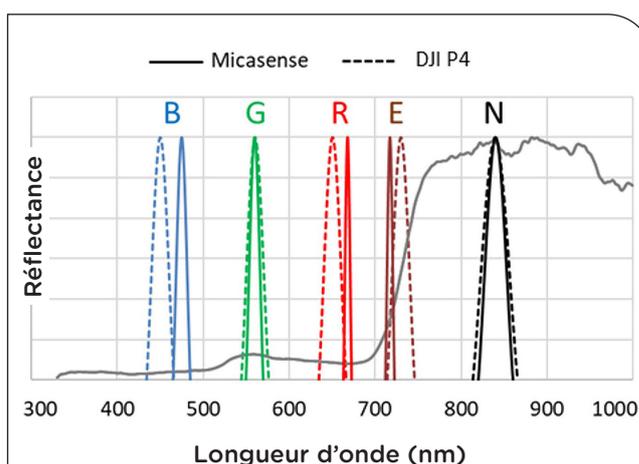


Fig. 2 : Positionnement et largeur des bandes spectrales de mesure de la réflectance pour 2 caméras utilisées pour le phénotypage haut-débit des essais Phénotol.

#### ► Calcul d'indices d'(in)tolérance

La tolérance est définie comme le rapport entre une perte d'IFVI et celle de rendement qui en résulte. Cependant, plus une culture sera tolérante, plus sa perte de rendement sera faible ; dès lors, le calcul de

la tolérance devient délicat. On privilégie donc le calcul de l'intolérance :

$$Intolérance_i = \frac{Rendement_{témoin} - Rendement_i}{IFVI_{témoin} - IFVI_i}$$

Avec Rendement<sub>témoin</sub> (respectivement IFVI<sub>témoin</sub>) la valeur moyenne des répétitions du témoin non stressé, Rendement<sub>i</sub> (respectivement IFVI<sub>i</sub>) la valeur moyenne des répétitions de la modalité stressée d'intérêt, pour une variété considérée. Le rendement est obtenu mécaniquement (moissonneuse-batteuse) à la récolte, et l'IFVI est estimé par utilisation du phénotypage (voir ci-dessus). Si les traitements ont trop peu d'effet dans les essais (ΔIFVI < 5%), l'intolérance n'est pas calculée pour toutes les variétés testées. L'intolérance est exprimée en gMS.dj<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>, elle est d'autant plus faible que la culture est tolérante.

Afin de comparer les intolérances entre variétés et essais, elles sont normalisées essai par essai à l'aide d'un indice de tolérance normalisé (ITN) :

$$ITN_i = \frac{Intolérance_{Max\ essai} - Intolérance_i}{Intolérance_{Max\ essai} - Intolérance_{min\ essai}}$$

L'ITN (sans unité) varie donc entre un, correspondant à la valeur minimale de l'intolérance sur l'essai et zéro, sa valeur maximale. Ainsi, une valeur d'ITN<sub>i</sub> élevée traduit une culture tolérante.

### 3 Résultats

#### ► Génération de situations contrastées pour exprimer des différences de rendement et de structure de couvert

##### Essais de calibration

Les expérimentations 2018-2019 (Id. 145482) et 2020-2021 (149157) visaient en premier lieu à générer des conditions de culture suffisamment contrastées pour induire des pertes de rendement causées par les stress biotiques ou abiotiques, et des dynamiques d'indice foliaire variées.

L'essai 2019 d'Ouzouer-le-Marché sous Phénofield® a effectivement permis d'induire des pertes de rendement significatives (-3 à 28%) et d'exprimer des différences variétales de potentiel, sans interaction G×E. Les IFVI sont également différenciés avec des effets environnementaux et génétiques significatifs (interaction G×E non testée par manque de répétition) ; les IFVI sont issus de dynamiques différences de mise en place et de maintien des surfaces vertes, avec des différenciations sur le GLAI maximal (à Z55) et sur le moment de l'inflexion de la sénescence.

L'essai d'Aubigny-aux-Kaisnes a présenté des nuisibilités rendement très faibles en terme d'ampleur (nuisibilité de 5 q/ha pour la modalité N+F- ; absence d'effet sur le rendement de la modalité N-F+), malgré l'effet statistiquement significatif du facteur environnemental (p < 0.001). Le facteur variétal est nettement différencié (p < 0.001), avec 37 q/ha d'écart entre les variétés extrêmes (80.7 vs 117.9 q/ha). L'interaction G×E est nettement significative.

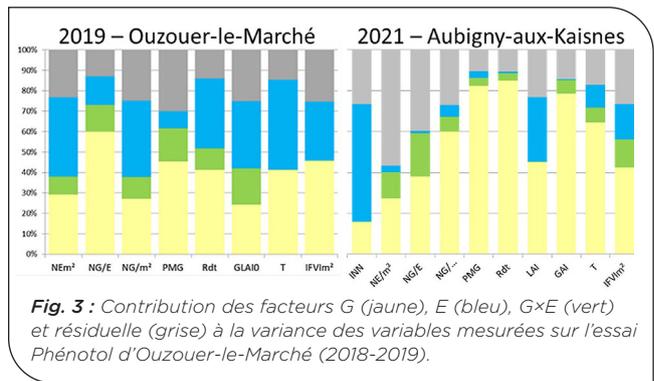


Fig. 3 : Contribution des facteurs G (jaune), E (bleu), G×E (vert) et résiduelle (grise) à la variance des variables mesurées sur l'essai Phénol d'Ouzouer-le-Marché (2018-2019).

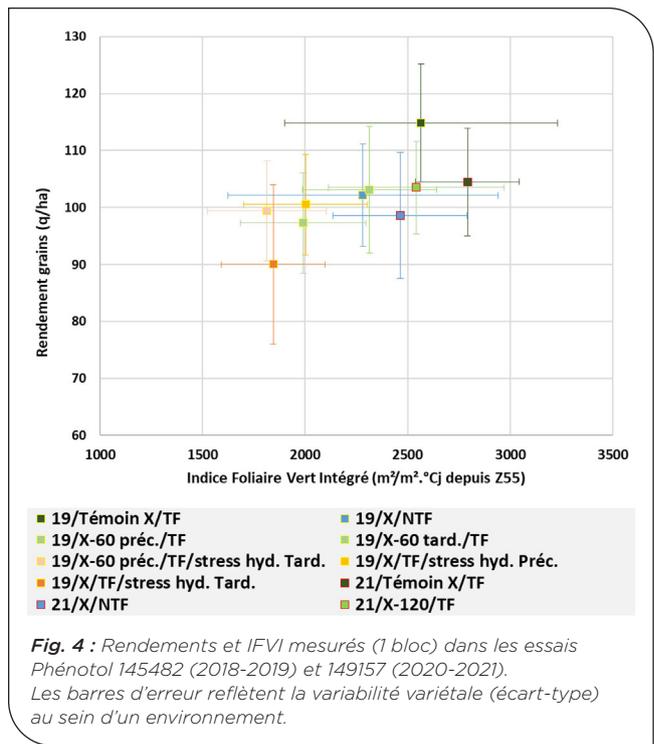


Fig. 4 : Rendements et IFVI mesurés (1 bloc) dans les essais Phénol 145482 (2018-2019) et 149157 (2020-2021). Les barres d'erreur reflètent la variabilité variétale (écart-type) au sein d'un environnement.

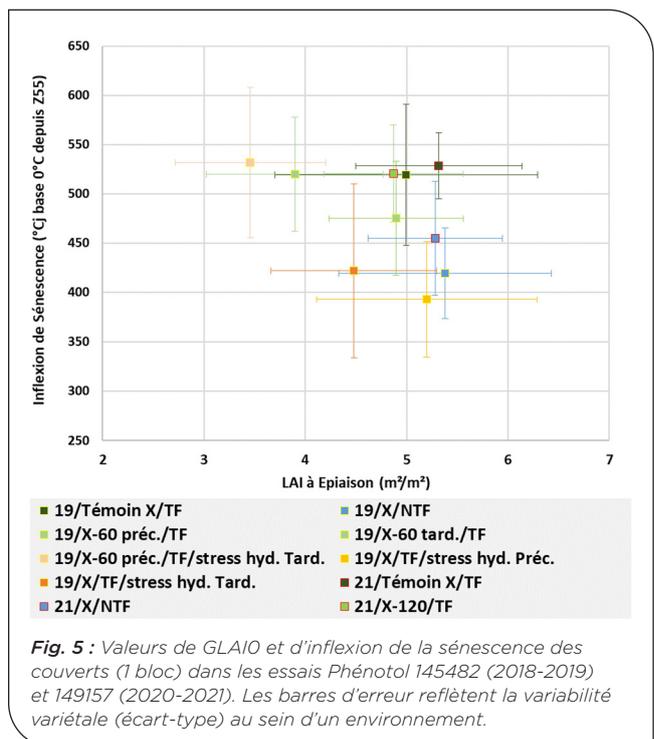


Fig. 5 : Valeurs de GLAI0 et d'inflexion de la sénescence des couverts (1 bloc) dans les essais Phénol 145482 (2018-2019) et 149157 (2020-2021). Les barres d'erreur reflètent la variabilité variétale (écart-type) au sein d'un environnement.

## Essais d'application

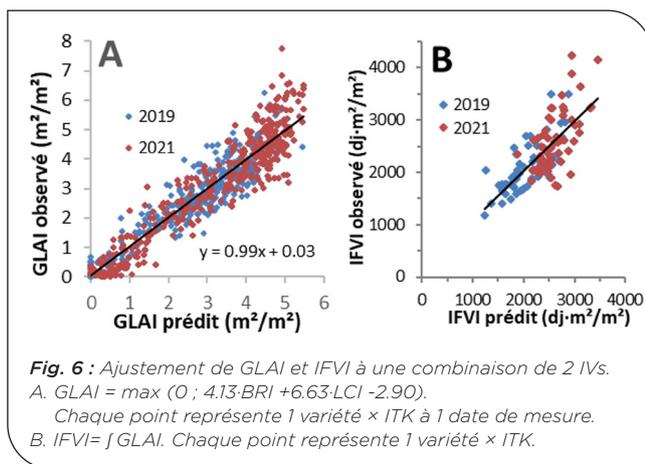
L'essai d'Orsonville (BH-Pheno-Or) a présenté des effets environnementaux très significatifs ( $p < 0.001$ ) avec des nuisibilités de 8 et 19 q/ha respectivement pour les modalités F- et N- par rapport à la modalité N+F+ (95 q/ha en moyenne). Les variétés sont également très discriminantes ( $p < 0.001$ ), avec des rendements moyens en modalité N+F+ s'étalant de 75 à 105 q/ha. L'interaction G×E est faiblement significative ( $p = 0.06$ ).

L'expérimentation 2019-2020 conduite à Villers-Saint-Christophe (146672) a atteint de très hauts potentiels de rendement (témoin N+F+ à 130 q/ha en moyenne) mais s'est avérée très peu discriminante sur le rendement entre environnements ( $p < 0.05$ ) avec moins de 2 q/ha en moyenne de nuisibilité des modalités N- et F- (très faible pression maladie, fortes fournitures d'azote du sol). L'effet variétal (16 variétés) est par contre très net ( $p < 0.001$ ) avec une gamme de rendement s'étalant de 115 à 143 q/ha en modalité Témoin N+F+). Aucune interaction G×E n'a été détectée pour le rendement.

## Calibration d'une relation $IFVI_{réf} - IFVI_{capteurs}$

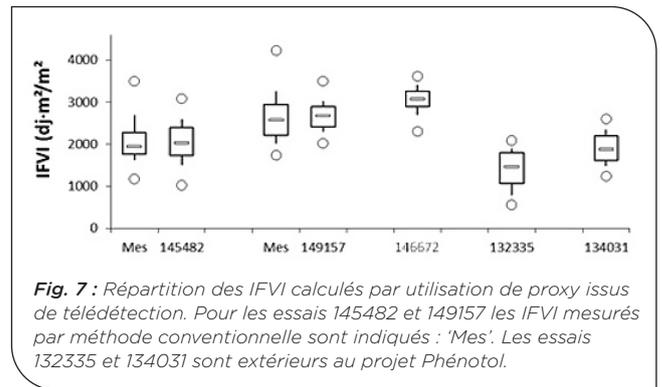
L'estimation de l'IFVI par une description dynamique de la surface foliaire verte par régression (modèles de régression testés : régression simple linéaire, simple exponentielle, multiple, multiple exponentielle) à partir d'indices de végétation connus a été réalisée. Il apparaît que GLAI corrèle assez mal à un IV unique, mais qu'une bonne linéarité peut être obtenue en combinant plusieurs IVs.

Les résultats d'identification d'un proxy du GLAI obtenus sont présentés dans la Fig. 6A. Les indices de végétation retenus sont BRI (Blue Red Pigment Index) et le LCI (Leaf Chlorophyll Index). On constate que ce proxy couvre une large gamme de GLAI, notamment les faibles GLAI impactées par la sénescence ( $GLAI < 3$ ) ; seules les très fortes valeurs s'avèrent moins bien estimées. L'intégration du GLAI au cours du temps permet d'estimer l'IFVI. (Fig. 6B)

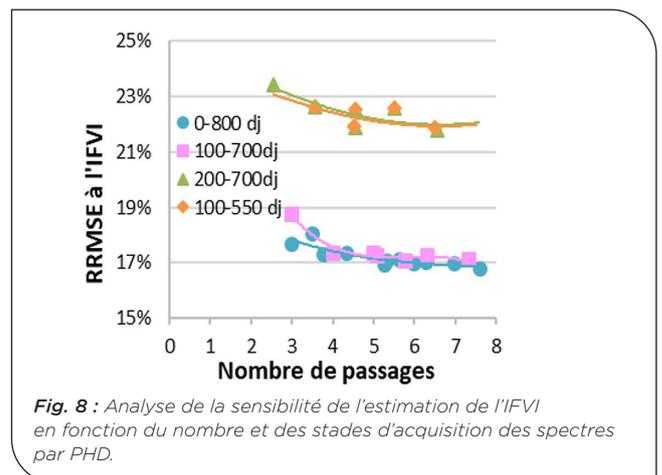


On peut noter que différentes combinaisons d'indices de végétation sont utilisables pour décrire le GLAI et l'IFVI, avec des performances comparables. Pour la suite des travaux, et l'application du proxy à différents essais suivis par des capteurs aux spécifications variées, une combinaison linéaire de 8 indices de végétation a été retenue ; l'objectif est de gagner en robustesse.

L'application de l'équation sur les essais du projet et des données externes (essais 132335, 134031) fournit des valeurs d'IFVI cohérentes avec les références existantes (Fig. 7).



Pour assurer une bonne description dynamique du développement de la sénescence et donc de l'évolution de l'IFVI, une analyse de sensibilité au nombre et à la période d'acquisitions par télémétrie a été réalisée. En effet, des acquisitions décalées dans le temps peuvent masquer le LAI maximum (autour d'épiaison-floraison), ou le maintien de la surface verte jusqu'à maturité.



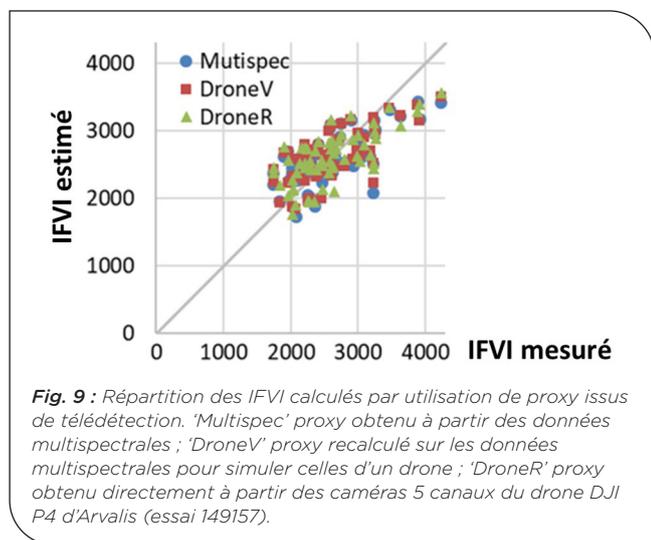
Les niveaux minima de RRMSE pour l'IFVI sont atteints pour un nombre d'acquisitions supérieur à 6, étalées à minima sur la période Epiaison - Epiaison +800°C de chaque variété (Fig. 8). Réduire la fenêtre d'acquisition devient préjudiciable si le LAI maximum n'est pas capté (fenêtre 200-700°Cj) ou la sénescence mal décrite (100-550°Cj). La densité temporelle d'acquisitions semble moins impactante que leur étalement, et 4 à 5 mesures bien positionnées suffisent à estimer l'IFVI par télémétrie.

## ► Transposition vers des essais suivis avec des caméras à 5 canaux

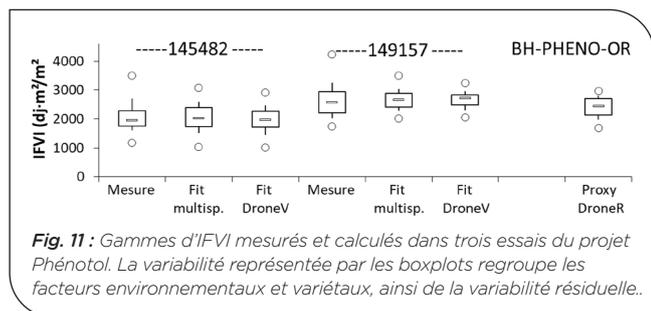
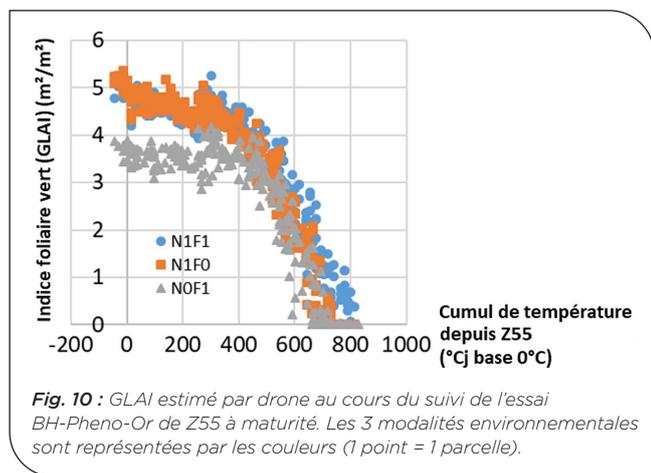
Les proxys établis sur les essais d'Ouzouer-le-Marché en 2019 et Aubigny-aux-Kaisnes en 2021 ont valorisé la richesse des signaux d'une caméra multispectrale (256 canaux), et ont donc pu s'appuyer sur les indices de végétation les plus appropriés. Une adaptation du travail présenté ci-dessus est donc requise pour valoriser les outils de phénotypage s'appuyant sur un nombre restreint de canaux. Ainsi, une réestimation des meilleurs proxys (combinaisons multiples d'IVs

accessibles à partir des longueurs d'ondes mesurées par les capteurs) a été réalisée à partir de la gamme de réflectance mesurée par caméra multispectrale.

En appliquant la méthode à l'essai d'Aubigny-Aux-Kaisnes en 2021, où la référence manuelle, les acquisitions multispectrales et le survol par un drone 5 canaux ont été réalisés, il est possible de valider la cohérence de l'approche (Fig 9).



Ainsi, il est possible d'identifier à l'aide d'un drone virtuel et d'une base de données de terrain (observations à Aubigny-aux-Kaisnes, 2021 et Ouzouer-le-Marché, 2019) la meilleure combinaison d'IVs autorisés par les spécifications de chaque appareil pour estimer l'IFVI<sub>capteur</sub>. Appliquée à l'essai d'Orsonville, où il n'y avait pas de mesures de référence, la méthode permet d'estimer le GLAI de chaque parcelle (Fig 10) et de calculer l'IFVI des différentes modalités (Fig 11).

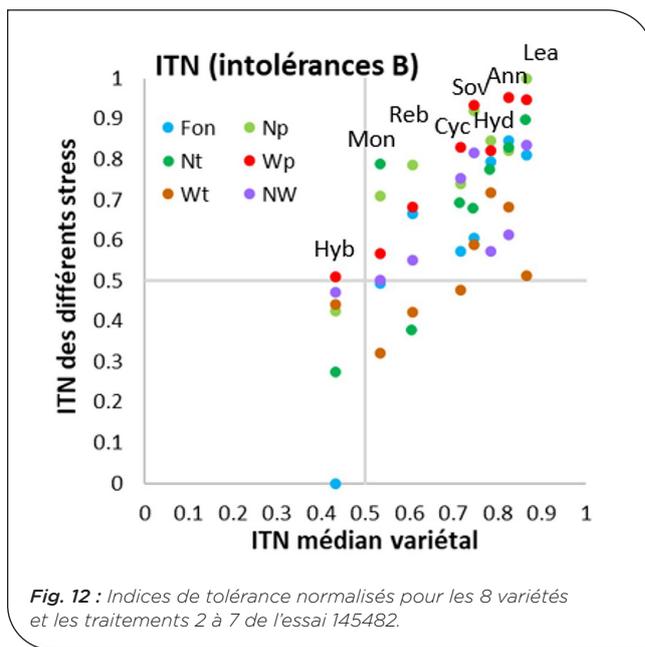


### ► Calculs d'indices de tolérance

On utilisera des proxys d'IFVI calculés d'après les IVs dans les essais 145482 et 149157 (où on a vérifié la validité du proxy), mais aussi 146672 et BH-PHENO-OR. Dans ces deux derniers cas, la validité du proxy n'est pas vérifiée mais paraît vraisemblable au vu de la répartition et de l'ordre de grandeur des valeurs calculées. Il est toutefois possible que les IFVI ainsi obtenus soient biaisés, ce qui jouera forcément sur la valeur d'intolérance. Par précaution, pour les comparaisons entre essais, on utilisera les valeurs d'indice de tolérance normalisé (ITN).

### Variabilité inter-variétés et inter-stress de la tolérance

L'essai 145482 comprenait sept traitements et par conséquent l'ITN peut être calculé six fois par comparaison au témoin (Fig. 12).



L'ITN de la variété la plus tolérante, Lear, est plus fort que celui de la moins tolérante, Hybiza, pour tous les stress. Bien que nettement plus sensible ( $\Delta_{IFVI}$  de 824 vs 465  $g \cdot m^2/m^2$ , tous traitements confondus) Lear présente ainsi un  $\Delta_{Rdt}$  moyen de 97  $g/m^2$  quand Hybiza accuse  $\Delta_{Rdt} = 252 g/m^2$ , ce qui gomme les hautes performances de cet hybride en milieu stressant. La tolérance présente donc une claire composante génétique mais aussi un certain degré de génécité inter-stress. En effet, bien que l'ITN varie selon les stress pour une même variété, cette variabilité n'est sans doute pas significative puisque l'intolérance est déterminée avec une forte variabilité (son coefficient de variation entre blocs atteint 58%, ce qui correspond à une barre d'erreur d'environ 0.3 pour l'ITN). Réciproquement, le  $r^2$  entre ITN de deux stress atteint 0.44 en moyenne ( $P = 0.07$ ).

### Étude de la variabilité génétique

Les essais 2020 et 2021 ont exposés des listes variétales étendues à des modalités modulant la protection fongicide et la nutrition azotée. On notera cependant que si 32 variétés en tout ont été testées, seulement trois étaient présentes partout. De plus l'ITN n'est

calculable que si la nuisibilité est suffisante (plus de 5% de perte d'IFVI), ce qui exclut certaines modalités trop peu différenciées (voir plus haut). Le tableau 4 ci-dessous montre que la plupart des variétés ne sont finalement caractérisées que par une ou deux valeurs d'ITN.

| Nbre d'ITN         | 0 ITN | 1 ITN | 2 ITN | 3 ITN | 4 ITN | Total |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Sous-fertilisation | 1     | 10    | 16    | 3     | 2     | 32    |
| Fongicide absent   | 5     | 11    | 14    | 2     | 0     | 32    |

Tab. 4 : Nombre de variétés caractérisées par 0 à 4 ITN vis-à-vis du stress sous-fertilisation et du stress biotique lié à l'absence de protection fongicide.

La figure 13 permet de repérer des variétés tolérantes aux deux stress (en haut à droite) et d'autres systématiquement intolérantes (en bas à gauche). Compte tenu du grand nombre de variétés, la génécité inter-stress est significative, mais plutôt faible : le  $r^2$  entre les deux ITN est de 0.18 ( $P = 0.03$ ).

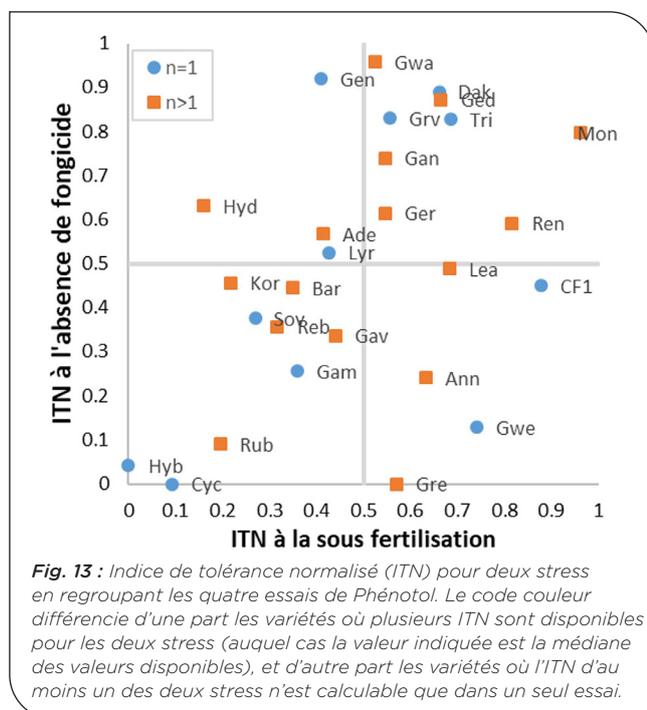


Fig. 13 : Indice de tolérance normalisé (ITN) pour deux stress en regroupant les quatre essais de Phénol. Le code couleur différencie d'une part les variétés où plusieurs ITN sont disponibles pour les deux stress (auquel cas la valeur indiquée est la médiane des valeurs disponibles), et d'autre part les variétés où l'ITN d'au moins un des deux stress n'est calculable que dans un seul essai.

### Corrélation de la tolérance avec des traits variétaux

Nos travaux antérieurs avaient mis en évidence une corrélation positive entre la tolérance et deux traits du couvert mesurables en parcelle témoin : l'IFVI et le temps de sénescence des surfaces vertes (S). Dans un modèle complexe, une corrélation négative entre tolérance et Poids de Mille Grains (PMG) était suggérée. A vrai dire, ces corrélations, établies dans une très large base de données étaient faibles. Dans la base Phénol, bien plus restreinte, aucune corrélation n'est significative ni avec les traits du couvert témoin ni avec des notes de caractérisation variétale.

Cette étude mériterait d'être reprise en comparant notamment l'ITN à l'absence de fongicide avec la note de résistance au STB, ou bien l'ITN à la sous-fertilisation tardive avec la note de GPD (puisque la GPD est liée à l'absorption tardive). En effet nos travaux antérieurs avaient bien mis en évidence l'absence de corrélation

entre tolérance et rendement potentiel. Mais ils suggéraient aussi qu'une corrélation négative pourrait exister entre résistance et tolérance, non par principe mais par dérive du fait que la tolérance n'a jamais été prise en compte par les processus de sélection jusqu'ici.

|                    | Note PMG | Note Précocité | Note STB | Note GPD | IFVI Tém | LAI Tém | S Tém |
|--------------------|----------|----------------|----------|----------|----------|---------|-------|
| Sous-fertilisation | 0.01     | 0.07           | 0.07     | -0.35    | -0.03    | -0.09   | 0.10  |
|                    | 97%      | 71%            | 74%      | 7%       | 87%      | 63%     | 60%   |
| Fongicide absent   | 0.33     | -0.03          | 0.09     | 0.00     | 0.16     | 0.05    | 0.14  |
|                    | 9%       | 89%            | 65%      | 98%      | 43%      | 80%     | 48%   |

Tab. 5 : Coefficient de corrélation et probabilité d'hypothèse nulle entre ITN et notes de caractérisation variétale ou traits du couvert mesurés en parcelles témoins.

## 4 Discussion

### ► La tolérance : une forme supplémentaire d'adaptation aux stress

La tolérance constitue, en complément de la résistance et de l'échappement ou de l'évitement, une forme supplémentaire d'adaptation variétale aux stress, qu'ils soient biotiques ou abiotiques. A la différence de la résistance -qui évite l'apparition des symptômes à l'aide de différentes barrières génétiques ou physiologiques- ou de l'échappement, qui esquisse une période à risque en décalant le cycle, la tolérance sous-entend que le facteur de stress entraîne effectivement une contamination ou des symptômes dans la plante, mais une décorrélation (partielle du moins) entre symptômes et conséquences finales sur le rendement. Ce mécanisme est donc peu valorisé dans la sélection variétale pour deux raisons : il ne sous-entend pas une absence de symptômes, qui est souvent recherchée pour garantir une culture saine et résiliente, et il requiert une double différence de mesures, entre un témoin sain et une situation stressée : une mesure de rendement, et une quantification des symptômes.

La tolérance -ou plus exactement l'intolérance- travaillée dans le projet Phénol cible plus particulièrement des symptômes foliaires tels qu'ils s'expriment avec une contamination de septoriose, ou un stress azoté ou hydrique, à savoir une perte de surface verte ; elle requiert donc une quantification objective des dégradations foliaires, intégrées dans le temps (Indice Foliaire Vert Intégré), et si possible avec une méthode aisée et à haut débit.

On a pu observer des différences variétales significatives dans les essais mis en place (fig. 12 et 13), différences non explicables par la précocité ou la résistance à la septoriose. La tolérance semble donc bien être complémentaire aux autres stratégies d'adaptation aux stress.

### ► Estimer la tolérance : des dispositifs exigeants

Les dispositifs mis en place dans le projet Phénol ont tenté d'induire des niveaux et des séquences de stress différenciés (en nature, intensité et période d'expression), en comparaison locale avec un témoin de référence, peu ou pas stressé. Plusieurs situations n'ont cependant pas donné satisfaction compte-tenu de la faible intensité

des symptômes et des pertes de rendement. En effet, le calcul de l'intolérance nécessitant de calculer le ratio entre une différence de rendements et une différence de perte de surface verte, il est nécessaire que l'impact des facteurs environnementaux aient des effets nettement supérieurs à l'incertitude méthodologique ou la variabilité spatiale. Ainsi, nous avons fixé arbitrairement la nécessité d'observer au moins 5% d'écart d'IFVI entre modalités comparées, et un impact rendement minimal de 5 q/ha semble également souhaitable. Dans nos expérimentations, certaines intolérances n'ont pu être calculées faute d'expression suffisante des carences minérales ou de contamination par un pathogène.

Outre la nécessité de pouvoir générer sur un même site des modalités contrastées à comparer (facteurs Maladie, Nutrition Azotée ou Alimentation Hydrique), il est nécessaire de pouvoir mesurer finement la perte de surface foliaire verte au cours du temps ; le Phénotypage Haut Débit par capteur, véhiculé quelques mètres au-dessus de la canopée, présente à ce titre une promesse de mesure rapide, objective et répétable, indispensable pour estimer un IFVI sur de grands effectifs et de manière répétable.

### ► Estimation de l'IFVI par capteur

Nos travaux ont permis de valoriser les outils de phénotypage à haut débit disponibles sur les parcelles ; cependant, la valorisation des sorties de capteurs n'est pas directe.

En premier lieu, il est important de rappeler que la quantification de référence de l'IFVI (surface foliaire par unité de surface, intégrée dans le temps) ne peut être effectivement mesurée par un IV mesuré par capteur : celui-ci intègrera systématiquement les autres organes verts du couvert : les épis et les tiges.

Ensuite, aucun indice de végétation (IV) ne permet, seul, de quantifier précisément l'indice foliaire maximal autour d'épiaison/floraison ou son évolution dans le temps. Un ensemble d'indices de végétation précédemment référencés ont été testés, et une combinaison linéaire de 8 d'entre eux a finalement été retenue comme proxy robuste pour le GLAI<sub>0</sub>. Cependant, ce proxy étalonné sur les essais Phénotol, n'a pas pu faire l'objet d'une validation externe indépendante faute de jeux de données adaptés. Il est possible que les conditions de croissance des cultures (ratio feuilles/tiges, glaucescence des tissus, conditions d'éclairage) affecte la qualité d'estimation de l'IFVI dans d'autres expérimentations.

Par ailleurs, la nécessité de s'appuyer sur plusieurs indices de végétation, de manière répétée dans le temps requiert une mise en œuvre rigoureuse de l'étalonnage des capteurs, à chaque acquisition : les conditions d'éclairage peuvent en effet impacter les mesures. Chaque capteur requiert son étalonnage propre pour estimer l'IFVI<sub>capteur</sub> ; ainsi, si plusieurs appareils sont utilisés sans précaution pour monitorer un réseau, toute la procédure peut être invalidée.

### ► Spécificités des caméras embarquées sur drones, et impacts sur les indices de végétation.

La comparaison de différents capteurs (caméra multispectrale, caméras 5 canaux) a mis en évidence la complexité de chercher à utiliser les mêmes indices de végétation (et donc les mêmes approximations de variables biologiques). En effet, chaque capteur peut

potentiellement avoir des spécificités propres, et en particulier des plages de mesure des longueurs d'ondes différentes. Il a ainsi pu être constaté que les deux caméras véhiculées par drone utilisées par le projet Phenotol n'exploraient pas les mêmes longueurs d'onde (Fig. 2).

Ainsi, pour certains canaux, les mesures des deux capteurs peuvent diverger fortement (Fig. 14). En fonction des longueurs d'ondes utilisées, l'impact sur les indices de végétation peut être très variable : ainsi, le NDVI apparaît très stable (même si peu sensible pour les couverts très denses), et donc assez comparable entre capteurs, à l'opposé du CCCi (Fig. 15). La méthode mise au point pour l'apprentissage des drones 'virtuels' est généralisable, et permet de diagnostiquer et de lever ce problème.

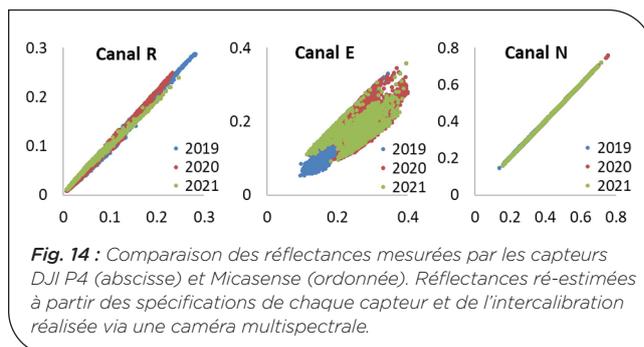


Fig. 14 : Comparaison des réflectances mesurées par les capteurs DJI P4 (abscisse) et Micasense (ordonnée). Réflectances ré-estimées à partir des spécifications de chaque capteur et de l'intercalibration réalisée via une caméra multispectrale.

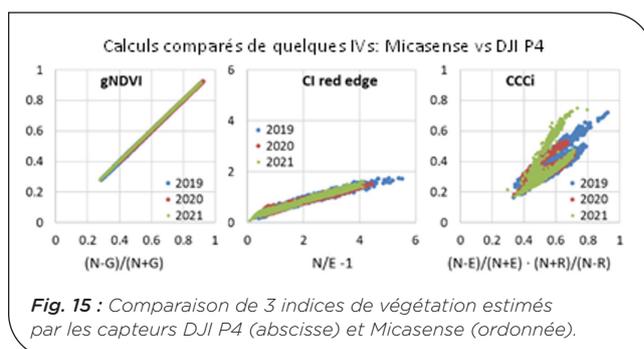


Fig. 15 : Comparaison de 3 indices de végétation estimés par les capteurs DJI P4 (abscisse) et Micasense (ordonnée).

### ► Dépasser les IVs : estimer le GLAIO, la sénescence ou le fIPAR à l'aide d'une représentation architecturée du couvert ?

Le concept d'IFVI tel que présenté en méthode de référence dans ce travail repose sur une mesure manuelle de l'indice foliaire et de la sénescence, ainsi qu'une mesure mécanique du rendement. A travers l'IFVI, on cherche donc à approximer le potentiel de photosynthèse et donc de croissance du couvert post-floraison. Cependant, outre des limitations expérimentales liées à l'échantillonnage, l'IFVI utilisé ici et le référentiel historique de relation IFVI-Rendement présentent des limites physiologiques. En effet, la photosynthèse n'est pas uniquement réalisée par les feuilles, mais également et de manière substantielle par les gaines et les épis ; de plus la structure du couvert et notamment le port foliaire peut modifier significativement le lien entre l'indice foliaire et l'interception lumineuse. Ainsi, le recours à des capteurs qui décrivent l'ensemble des organes photosynthétiques peut permettre de consolider la méthode de référence.

De plus, l'expression de l'IFVI par une durée thermique de la surface foliaire ne permet pas intrinsèquement d'intégrer des différences marquées de rayonnement incident ou intercepté, moteur de la photosynthèse.

Ainsi, la courbe-enveloppe historique dressée à l'aide de nombreuses données a pu être mise en défaut en 2020 avec l'atteinte de très hauts rendements, vraisemblablement atteints par des rayonnements très élevés (+10%) et un quotient photothermique favorable. Ainsi, l'approche conceptuelle de la tolérance pourrait être consolidée en exprimant un différentiel de rendement par rapport à un différentiel de rayonnement intercepté (fiPAR). Cette variable intégrant la densité du couvert, sa structure et sa dynamique ne peut être approchée par le seul usage des indices de végétation, tels qu'utilisés ici. Le recours à des interprétations plus poussées, architecturées, d'outils de phénotypage à haut débit, permettrait donc à terme d'aboutir une estimation plus intégrative de la dynamique de la canopée et donc de l'estimation de la tolérance.

### ► Généricité de la tolérance

Une hypothèse initiale du projet portait sur la généricité inter-stress de la tolérance. Sur la base de l'essai 145482 qui a permis d'étudier 7 environnements différents, la tolérance variétale semble bien s'exprimer de manière cohérente pour divers stress (abiotiques et biotique) (fig 12 et 13). Le mécanisme physiologique derrière cette généricité n'a pas pu être exploré ; on peut émettre l'hypothèse que les équilibres entre les sources et puits sont en jeu, permettant le maintien de la croissance et du fonctionnement des puits malgré une défaillance des sources. Cette hypothèse d'équilibre source/puits pourrait par ailleurs être explorée au cours du cycle de la culture, en fonction des différents puits en cours de formation (épi pendant la montaison, grain courant remplissage).

## Références bibliographiques

- Atkinson, N. J., and Urwin, P. E.** (2012). The interaction of plant biotic and abiotic stresses: from genes to the field. *J. Exp. Bot.* 63, 3523–3543. doi: 10.1093/jxb/ers100
- Bancal, M.-O., Hansart, A., Sache, I., and Bancal, P.** (2012). Modelling fungal sink competitiveness with grains for assimilates in wheat infected by a biotrophic pathogen. *Ann. Bot.* 110, 113–123. doi: 10.1093/aob/mcs094
- Bancal, M.-O., Robert, C., and Ney, B.** (2007). Modelling Wheat Growth and Yield Losses from Late Epidemics of Foliar Diseases using Loss of Green Leaf Area per Layer and Pre-anthesis Reserves. *Ann. Bot.* 100, 777–789. doi: 10.1093/aob/mcm163
- Bancal, M.-O., Roche, R., and Bancal, P.** (2008). Late Foliar Diseases in Wheat Crops Decrease Nitrogen Yield Through N Uptake Rather than Through Variations in N Remobilization. *Ann. Bot.* 102, 579–590. doi: 10.1093/aob/mcn124
- Bancal, M. O., Collin, F., Gate, P., Gouache, D., and Bancal, P.** (2022). Towards a global characterization of winter wheat cultivars behavior in response to stressful environments during grain-filling. *Eur. J. Agron.* 133, 126421. doi: 10.1016/j.eja.2021.126421
- Bancal, P., Bancal, M. O., Collin, F., and Gouache, D.** (2015). Identifying traits leading to tolerance of wheat to *Septoria tritici blotch*. *Field Crops Res.* 180, 176–185. doi: 10.1016/j.fcr.2015.05.006
- Beauchêne, K., Leroy, F., Fournier, A., Huet, C., Bonnefoy, M., Lorgeou, J., et al.** (2019). Management and Characterization of Abiotic Stress via PhenoField®, a High-Throughput Field Phenotyping Platform. *Front. Plant Sci.* 10, 904. doi: 10.3389/fpls.2019.00904
- Bingham, I. J., Walters, D. R., Foulkes, M. J., and Paveley, N. D.** (2009). Crop traits and the tolerance of wheat and barley to foliar disease. *Ann. Appl. Biol.* 154, 159–173. doi: 10.1111/j.1744-7348.2008.00291.x
- Christopher, J. T., Christopher, M. J., Borrell, A. K., Fletcher, S., and Chenu, K.** (2016). Stay-green traits to improve wheat adaptation in well-watered and water-limited environments. *J. Exp. Bot.* 67, 5159–5172. doi: 10.1093/jxb/erw276
- Collin, F., Bancal, P., Spink, J., Appelgren, P. K., Smith, J., Paveley, N. D., et al.** (2018). Wheat lines exhibiting variation in tolerance of *Septoria tritici blotch* differentiated by grain source limitation. *Field Crops Res.* 217, 1–10. doi: 10.1016/j.fcr.2017.11.022
- Foulkes, M. J., Paveley, N. D., Worland, A., Welham, S. J., Thomas, J., and Snape, J. W.** (2006). Major Genetic Changes in Wheat with Potential to Affect Disease Tolerance. *Phytopathology*® 96, 680–688. doi: 10.1094/PHYTO-96-0680
- Gate, P., Gouache, D., Robert, C., Bancal, M. O., Lannou, C., and Ney, B.** (2006). What plant variable to account for loss due to septoria leaf blotch in winter wheat?, (Tours, France: AFPP).
- Gaunt, R. E., and Wright, A. C.** (1992). Disease-yield relationship in barley. II. Contribution of stored stem reserves to grain filling. *Plant Pathol.* 41, 688–701. doi: 10.1111/j.1365-3059.1992.tb02552.x
- Gouache, D., Bancal, M. O., Bancal, P., De Solan, B., and Gate, P.** (2014). Tolérance du blé tendre aux stress biotiques et abiotiques. *Innov. Agron.*, 75–87.
- Ney, B., Bancal, M. O., Bancal, P., Bingham, I. J., Foulkes, J., Gouache, D., et al.** (2013). Crop architecture and crop tolerance to fungal diseases and insect herbivory. Mechanisms to limit crop losses. *Eur. J. Plant Pathol.* 135, 561–580. doi: 10.1007/s10658-012-0125-z
- Parker, S. R., Welham, S., Paveley, N. D., Foulkes, J., and Scott, R. K.** (2004). Tolerance of septoria leaf blotch in winter wheat. *Plant Pathol.* 53, 1–10. doi: 10.1111/j.1365-3059.2004.00951.x
- Paveley, N. D., Sylvester-Bradley, R., Scott, R. K., Craigon, J., and Day, W.** (2001). Steps in Predicting the Relationship of Yield on Fungicide Dose. *Phytopathology*® 91, 708–716. doi: 10.1094/PHYTO.2001.91.7.708
- Scholes, J. D., and Rolfe, S. A.** (2009). Chlorophyll fluorescence imaging as tool for understanding the impact of fungal diseases on plant performance: a phenomics perspective. *Funct. Plant Biol.* 36, 880. doi: 10.1071/FP09145
- Serrago, R. A., Carretero, R., Bancal, M. O., and Miralles, D. J.** (2011). Grain weight response to foliar diseases control in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Field Crops Res.* 120, 352–359. doi: 10.1016/j.fcr.2010.11.004
- Van Den Bosch, F., Smith, J., Wright, P., Milne, A., Van Den Berg, F., Kock-Appelgren, P., et al.** (2022). Maximizing realized yield by breeding for disease tolerance: A case study for *Septoria tritici blotch*. *Plant Pathol.* 71, 535–543. doi: 10.1111/ppa.13509
- Zuckerman, E., Eshel, A., and Eyal, Z.** (1997). Physiological Aspects Related to Tolerance of Spring Wheat Cultivars to *Septoria tritici blotch*. *Phytopathology*® 87, 60–65. doi: 10.1094/PHYTO.1997.87.1.60

# PHENOTOL : Phénotypage variétal de la tolérance et des traits associés en céréales

Jean-Charles DESWARTE<sup>1\*</sup>, Marie-Odile BANCAL<sup>2</sup>, Pierre BANCAL<sup>2</sup>, Mélanie HEERS-MAKAROVSKY<sup>2</sup>, Jérôme AUZANNEAU<sup>3</sup>, Katia BEAUCHENE<sup>4</sup>

1 - ARVALIS - Station de Villiers-le-Bâcle - ZA des Gravieres, Route de Châteaufort, 91190 Villiers-le-Bâcle  
 2 - UMR 1402 Écosys-AgroParisTech - AgroParisTech - 22 place de l'Agronomie, 91120 Palaiseau

3 - AGRI-OBTENTIONS - Chemin de la Petite Minière, 78280 Guyancourt  
 4 - ARVALIS - Station d'Ouzouer-le-Marché - 45 voie Romaine, Ouzouer-le-Marché, 41240 Beauce-la-Romaine

\*Coordinateur : Jean-Charles DESWARTE, jc.deswarte@arvalis.fr

## Résumé

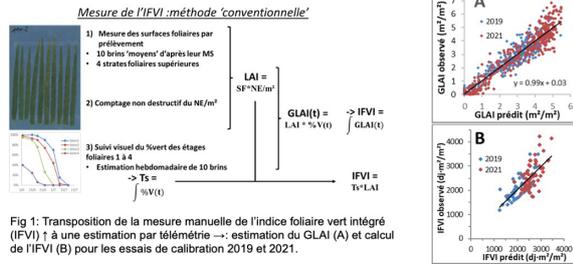
- L'intolérance (inverse de la tolérance) est définie comme le ratio d'une perte de rendement relativement à une perte de surface foliaire. Elle constitue une forme d'adaptation et de réponse aux stress, complémentaire à la résistance et à l'échappement/évitement.
- La mesure de l'intolérance requiert l'évaluation de la perte de surface verte (IFVI) des couverts, idéalement à l'aide d'outils de phénotypage à haut-débit, sur des plateformes permettant l'expression des stress d'intérêt.
- L'estimation de l'IFVI par des Indices de Végétation (IV) a été calibrée sur des essais (2019 à 2021) avec mesures de référence au champ; seules des combinaisons multiples d'IVs permettent de retranscrire les IFVI. En fonction des spécifications des capteurs, les mesures d'IV peuvent être altérées; ainsi, l'estimation des IFVI par télémétrie dans un réseau d'essais nécessite des précautions de mise en œuvre.
- Les variétés testées ont montré des différences de tolérance vis-à-vis des stress; cette tolérance semble d'ailleurs présenter une part de généralité: la tolérance vis-à-vis d'un stress donné peut également se manifester vis-à-vis d'un autre
- Les mécanismes sous-jacents ne sont pas élucidés. L'équilibre entre les sources et les puits pourrait être en jeu et expliquer pour partie la généralité de la tolérance pour une phase donnée du cycle

## Matériel - méthodes

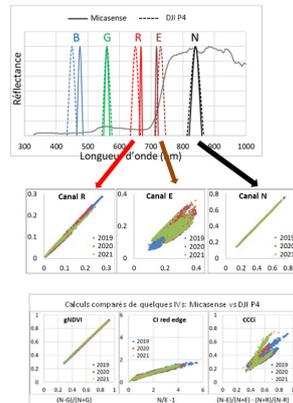
- 2 essais de calibration (mesures de référence manuelles et caméras multispectrales) croisant génotypes (6 à 20 variétés) et conditions de croissance a priori contrastées (3 à 7 environnements, impliquant la fertilisation azotée et/ou l'alimentation hydrique et/ou la protection fongicide) ont été conduits en 2018-2019 (Ouzouer-le-Marché -41) et 2020-2021 (Aubigny-aux-Kaisnes -02). Ils ont permis de relier des mesures de télémétrie à des critères anatomiques.
- 2 essais supplémentaires (Villers-Saint-Christophe -02-, 2019-2020 et Orsonville -78-, 2020-2021) ainsi que des essais externes au projet ont été utilisés pour valider les proxys: des drones avec caméras à 5 capteurs ont été mobilisés.
- Une bibliothèque de 75 IVs a été utilisée pour décrire les caractéristiques du couvert: GLAI<sub>0</sub> et dynamique de sénescence. Des modèles de combinaison linéaires IV ont été construits et évalués selon leur RRMSE (évaluation par essai et globale inter-essai).
- Pour comparer et corriger les mesures de réflectances et les calculs d'IVs de capteurs aux spécifications hétérogènes, une démarche de « drone virtuel » a été développée à partir d'une caméra de référence multispectrale
- Les intolérances des variétés ont été calculées en écart à la modalité environnementale témoin, pour les situations où les différences d'IFVI étaient supérieures à 5%. Pour comparer les variétés et les essais, des Indices de Tolérance Normalisés sont calculés.

## Résultats

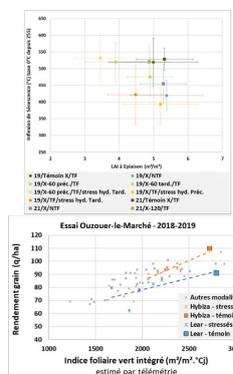
- Un proxy du GLAI entre épaisseur et maturité a été élaboré à partir de mesures de référence et de 75 IVs mesurés par télémétrie. Les meilleurs proxys développés permettent d'estimer l'IFVI sans mesure destructive pour les 2 essais utilisés. Une validation externe est néanmoins requise pour asseoir sa validité.



- Les capteurs les plus fréquents ne mesurent que quelques longueurs d'onde (5 canaux pour les drones utilisés dans Phénol); leurs spécifications sont différentes, ce qui impacte l'estimation de certains IVs qui s'appuient sur plusieurs canaux. Ainsi, certains IVs sont robustes tels le NDVI; d'autres peuvent être fortement affectés par un décalage de la longueur d'onde effectivement mesurée.



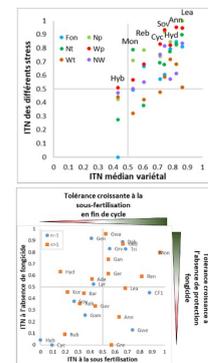
→ Fig 2: Positionnement et largeur des canaux de mesure de réflectance des caméras Micasense et DJI P4 (haut), et comparaison des réflectances mesurées (milieu) et 3 IVs calculés (bas)



- L'expression et la mesure de la tolérance requiert des dispositifs qui génèrent des stress et des symptômes. Les expérimentations Phénol ont permis de générer une diversité de stress, notamment sous Phénol. En impactant à la fois la surface verte des couverts (mise en place du GLAI, sénescence) et le rendement, elles ont permis d'exposer des différences variétales de tolérance. Par exemple, la variété Hybiza a présenté un fort potentiel sans stress, mais l'application de stress variés a déclenché une forte perte de rendement au regard des symptômes sur feuilles; à l'inverse, Lear a présenté des pertes d'IFVI élevées pour une nuisibilité de rendement faible.

↑ Fig 3: Diversité environnementale et variétale des composantes de l'IFVI: LAI à épaisseur et délai de sénescence, pour les essais de calibration en 2019 et 2021 (mesures manuelles). Les barres d'erreur illustrent l'écart-type inter-variétés au sein d'un environnement.  
 ← Fig 4: Réponses des rendements aux variations d'IFVI des variétés Lear et Hybiza dans l'essai d'Ouzouer-le-Marché en 2019.

- Lorsqu'on compare les intolérances entre variétés en fonction des stress, par l'intermédiaire d'un Indice de Tolérance Normalisé, on constate que les réponses aux différentes natures de stress ne sont pas totalement indépendantes. Il semble donc qu'il y ait une certaine généralité inter-stress, qui permet aux variétés d'être tolérantes à différentes natures de stress qui s'expriment sur la même phase phénologique.



↑ Fig 5: Indices de Tolérance Normalisés mesurés pour chaque variété dans les 6 environnements stressés de l'essai d'Ouzouer-le-Marché en 2019. Une valeur d'ITN proche de 1 indique une tolérance élevée.  
 → Fig 6: ITN variétaux calculés en situations de carence azotée (abscisse) ou d'absence de protection fongicide sur l'ensemble des essais Phénol. Le code couleur renseigne sur le nombre d'essais mobilisés pour le calcul de la valeur variétale d'ITN

## Conclusions

- La tolérance variétale, exprimée comme une réduction de la nuisibilité Rendement d'un stress affectant la surface verte, a pu être redémontrée au cours du projet Phénol.
- Elle est indépendante, et donc cumulable, aux stratégies de résistance ou d'échappement aux autres stress; à ce titre, elle peut contribuer à des cultures plus résilientes. Elle semble également générique à différents stress.
- Son expression et sa mesure restent délicates: elles requièrent des conditions de croissance nettement différenciées, et une mesure dynamique de l'impact des stress sur l'état de la canopée.
- Le projet Phénol a permis de tester la mise en œuvre du phénotypage à haut-débit pour assurer ce suivi de canopée. Il a mis en lumière la faisabilité théorique de l'estimation de l'IFVI à l'aide d'IVs multiples, mais il a également mis en évidence la sensibilité de mise en œuvre de ces outils et d'interprétation de leurs sorties.

Financé par:

