

Jean-Charles DESWARTE¹, Christine GIROUSSE², Guillaume BARRAL-BARON³, Gemma MOLERO³, Sylvie DUTRIEZ⁴, Stéphanie THEPOT⁵, Guillaume MELOUX⁵, Julien RATET⁶, Sébastien CUVELIER⁶, Pascal GIRAUDAU⁷, Romain LAMERAND⁷, Auberi AVALLE⁸, Guillaume ROULLET⁸, Pierrick VARENNE⁹, Anne-Valérie DUMAS⁹, Romain DELEMME¹⁰, Anne-Charlotte LOMBARD¹⁰, Thierry MOITTIE¹¹

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

2 - INRAE UMR INRAE/UCA 1095 Génétique, Diversité et Ecophysiologie des Céréales- Site de Crouel, 5 chemin de Beaulieu, 63000 Clermont-Ferrand

3 - KWS-MOMONT – 7 Rue de Martinval, 59246 Mons-en-Pevele

4 - LIDEA – 24 Rue Saint-Pierre, 28150 Reclainville

5 - BASF France SAS - Ferme du Paly, 91490 Milly-la-Forêt

6 - DSV France - 34 Rue de Charette, 28140 Terminiers

7 - SECOBRA Recherches - Le Bois Henry, 78580 Maule

8 - UNISIGMA - 2 Rue du Petit Sorri, 60480 Froissy

9 - LIMAGRAIN Europe – Ferme de l'Étang, 77390 Verneuil-l'Étang

10 - LEMAIRE-DEFFONTAINES SAS - 180 Rue du Rossignol, 59310 Auchy-les-Orchies

11 - ASUR PLANT BREEDING - Pôle Végétal de la Plaine d'Estrées, 6 Rue du Jeu d'Arc, 60190 Estrees-Saint-Denis

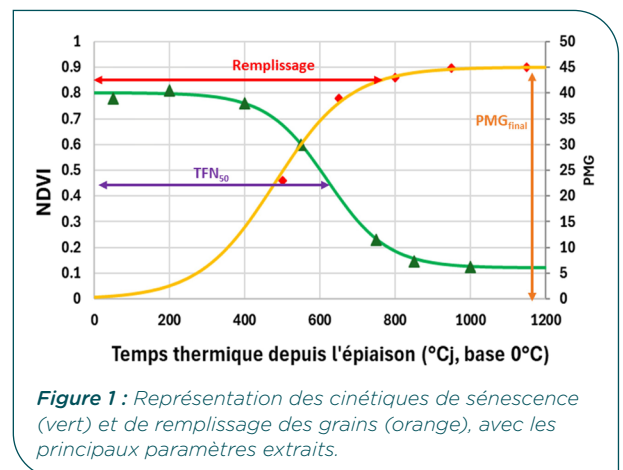
*Coordinateur du projet : Jean-Charles DESWARTE, jc.deswarte@arvalis.fr

CONTEXTE

- Le changement climatique va exposer les céréales à des stress thermiques et hydriques accrus en fin de cycle.
 - Le calage du cycle adéquat est donc identifié comme une réponse à ces contraintes climatiques. La variabilité génétique pour les stades Epi 1cm et Epiaison est bien connue et valorisée pour limiter l'exposition aux stress; par contre, la variabilité génétique de la durée de remplissage est mal cernée et pourrait devenir un levier supplémentaire de raisonnement de la phénologie.
 - Différentes méthodologies sont proposées pour déterminer la date d'arrêt de remplissage des grains. Le suivi dynamique du PMG permet de refléter au sens strict la dynamique des grains, et de s'appuyer sur un échantillonnage large, et une mise en œuvre objective.
 - Le phénotypage à haut débit permet de décrire de manière objective, précise et potentiellement peu coûteuse, certaines variables liées à l'aspect du couvert. La sénescence de la canopée peut être suivie à l'aide d'indices de végétation simples et robustes tels que le NDVI. Sa dynamique a déjà fait l'objet d'études corrélatives avec la performance des variétés. La sénescence tardive des variétés (caractère « Stay-green ») est régulièrement mais pas systématiquement associée à un gain de productivité.
- **Le projet PHEDRE cherche à explorer la variabilité génétique de la durée de remplissage, et un éventuel lien entre durée de remplissage et date de sénescence pour valoriser le phénotypage à haut-débit dans la caractérisation phénologique de variétés de blé plus tolérantes aux stress de fin de cycle**

MATÉRIEL - MÉTHODES

- 9 essais au champ ont été conduits en 2021. 30 variétés commerciales modernes de blé tendre ont été phénotypées pendant la phase de remplissage des grains, avec un suivi de la canopée par NDVI (drone ou Greenseeker). Des cinétiques de type logistique ont été ajustées aux données pour décrire la sénescence à l'aide de 4 paramètres. Une analyse statistique a été réalisée sur les paramètres des cinétiques, suivi d'une classification. 6 variétés contrastées ont été retenues pour des expérimentations complémentaires
- 11 essais au champ regroupant 6 variétés contrastées pour leur cinétique de sénescence ont été menés en 2022 et 2023. Les cinétiques de sénescence (NDVI) et de remplissage des grains ont été déterminées et modélisées; les paramètres des modèles ont été analysés pour déterminer la contribution des facteurs génétiques, environnementaux et GxE, et pour explorer la corrélation entre paramètres.
- Les données de rendement et de phénotypage d'un essai historique (Projet Breedwheat; essai Irrigué vs Pluvial à Gréoux-les-Bains (04) en 2016) ont été réanalysées pour évaluer la diversité génétique de cinétique de sénescence, et la corrélation entre paramètres de sénescence et de rendement. Les cinétiques de sénescence ont été modélisées comme indiqué ci-dessus.



RÉSULTATS

- Des différences variétales significatives ont été observées pour les paramètres TFN_{50} (temporalité de la sénescence) et SR (vitesse de la sénescence). Ces deux paramètres sont indépendants ($r=-0.1$, ns). Il est donc possible de classer les variétés selon une combinaison de ces deux critères.
- Le paramètre de $NDVI_{max}$ ne présente pas de variabilité génétique significative ; cependant, l'indice NDVI sature naturellement lorsque les couverts sont denses. Le paramètre $NDVI_{final}$ est fortement affecté lorsque les suivis de phénotypage sont interrompus trop tôt, comme cela a été le cas dans certains essais.
- Les paramètres de sénescence sont entachés d'une interaction GxE significative ; il est donc délicat d'évaluer le comportement d'une variété à partir d'un nombre restreint d'essais.

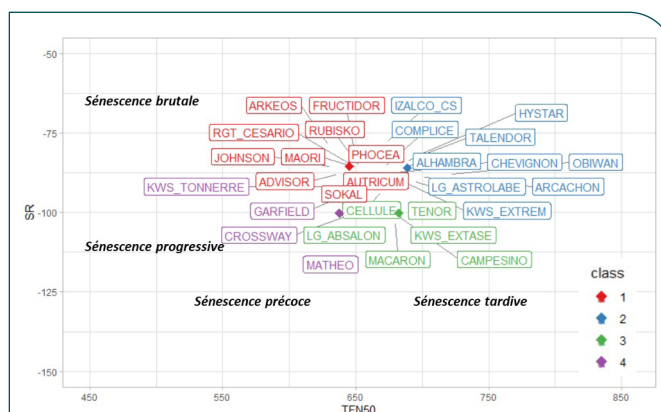


Figure 2 : Diagramme représentant conjointement la date de sénescence (TFN_{50}) et la vitesse de sénescence (SR) de 30 variétés de blé tendre phénotypées via NDVI dans un réseau de 9 essais. Les variétés sont séparées en 4 classes par classification hiérarchique ascendante pour leur combinaison de date et de vitesse de sénescence.

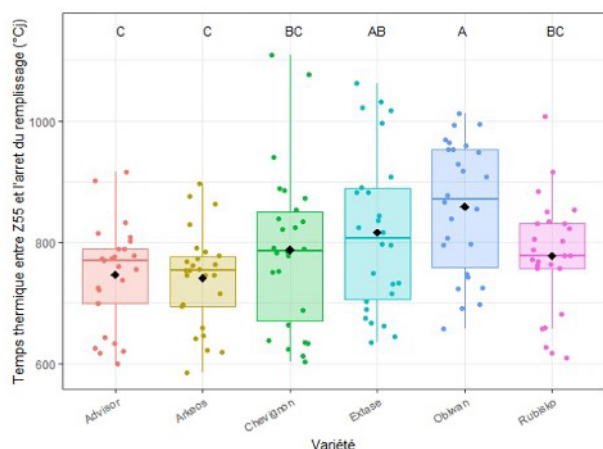


Figure 3 : Boxyplot représentant les durées estimées de remplissage des grains des variétés étudiées dans les 9 essais analysés (1 point par bloc). Les lettres identiques au-dessus des box-plots indiquent des groupes homogènes (test de Tukey).

- Les estimations de date d'arrêt de remplissage des grains indiquent un effet variétal significatif, bien qu'affecté d'une interaction GxE forte. Cependant, les différences entre variétés extrêmes s'élèvent à près de $100^{\circ}Cj$ base $0^{\circ}C$, soit environ 5 jours d'activité au champ.
- Dans les mêmes essais, les différences variétales pour la date de sénescence (estimée à l'aide du TFN_{50}) sont du même ordre de grandeur, avec également une forte interaction GxE.
- Il existe bien une corrélation globale entre la durée moyenne de remplissage des variétés et la date de sénescence ($r=0.94$), même si la première intervient environ $150^{\circ}Cj$ après la seconde. Cette corrélation est confirmée à l'échelle de l'essai dans 5 situations sur 8 (p value <0.1)

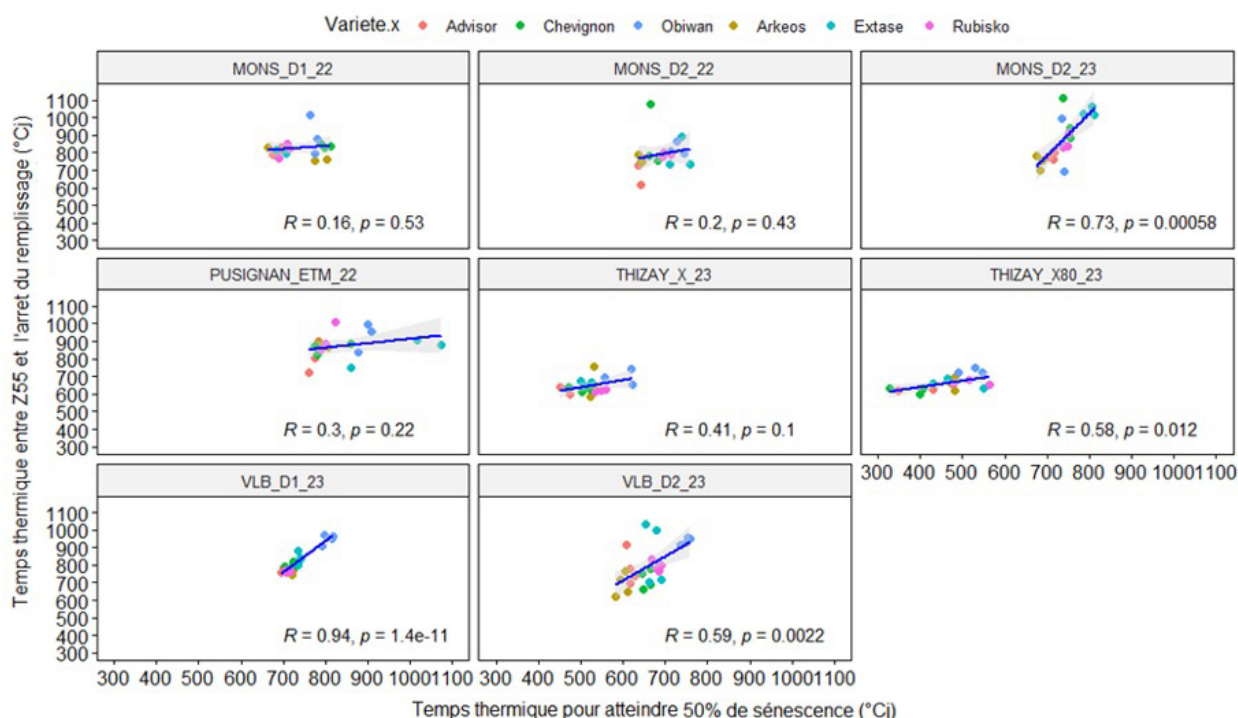
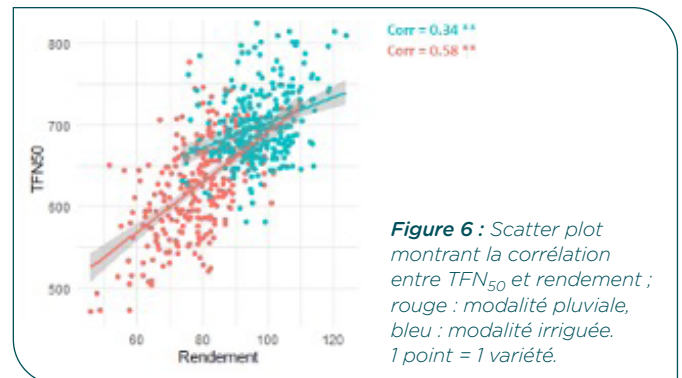
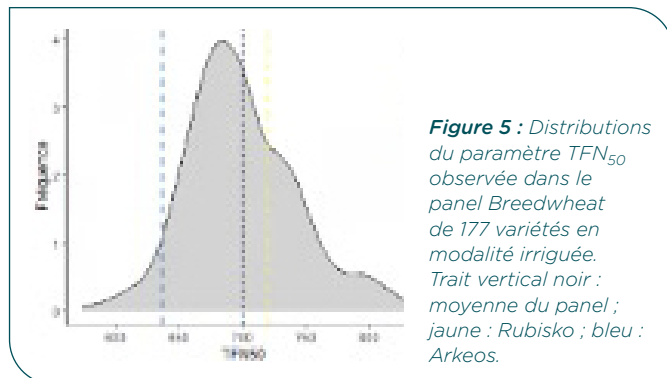


Figure 4 : Graphiques représentant pour chaque environnement les valeurs par variété et par bloc du TFN_{50} (abscisse) et de la durée de remplissage (ordonnée). Une corrélation linéaire est estimée dans chaque environnement.

- L'analyse d'un panel de 177 variétés de blé tendre a confirmé la variabilité génétique pour 3 paramètres de cinétique de sénescence : TFN_{50} , SR et $NDVI_{max}$. En comparant aux variétés communes avec les autres expérimentations: Rubisko et Arkeos, on constate que cette variabilité pour le TFN_{50} dans le panel Breedwheat est au moins aussi étendue que dans l'ensemble des 30 variétés testées en 2021. Cependant, il apparaît cette fois-ci une corrélation entre TFN_{50} et SR ($r=-0.42$). Il n'y a pas de corrélation entre la précocité à épiaison Z55 et TFN_{50} , ce qui laisse supposer une indépendance des 2 indicateurs de précocité.
- Les rendements variétaux sont corrélés à la date de sénescence TFN_{50} (exprimée en temps thermique depuis l'épiaison)



➤ RÉSULTATS

- Des effets variétaux significatifs ont été observés tant pour la durée de remplissage des grains que pour la cinétique de sénescence de la canopée. Ces effets, bien que significatifs, sont très inférieurs aux effets Environnementaux, et sont par ailleurs complétés par une interaction Variété x Environnement significative.
- Une corrélation significative a été établie entre la durée de remplissage (intervalle entre Epiaison et arrêt de la croissance du PMG) et le paramètre TFN_{50} indiquant la date d'atteinte de 50% de la sénescence. Une variété à remplissage long présente donc une canopée plus longtemps verte et fonctionnelle.
- Des corrélations significatives entre paramètres de sénescence du couvert et rendement en grain ont été observées dans un essai Panel du projet BreedWheat (conduites en pluvial et en irrigué): les meilleurs rendements variétaux sont obtenus avec un $NDVI_{max}$ élevé et une sénescence retardée (TFN_{50}). Ces conclusions sont cohérentes avec de précédents travaux académiques.
- Les mesures ponctuelles et le suivi dynamique par NDVI permettent de caractériser le couvert de manière plus objective et étendue que certaines notations visuelles ou manuelles proposées sur les grains ou le pédoncule.

