

Blé-Adventices-III : Amélioration de la compétitivité des variétés de blé tendre vis-à-vis des adventices pour l'agriculture biologique

Rémi PERRONNE^{1*}, Laëtitia LEVER¹, Frédéric HENRY¹, Patrice SENELLART², Pascal GIRAudeau², Romain DELEMME², Sylvie DUTRIEZ², Sébastien CUVELIER², Edouard PENEZ², Bruno CHAUVEL³, Nathalie COLBACH³, Delphine MOREAU³, Stéphane CORDEAU³, Pierre LEBRETON³, Arnaud GAUFFRETEAU⁴, Julie GUGUIN⁴, Clotilde BLANCFENE⁵, Laure DUCHALAIS⁶, Philippe Du CHEYRON⁷, Julie GOMBERT⁷, Bernard ROLLAND¹

1 - IGEPP, INRAE, Institut Agro, Univ Rennes, 35653, Le Rheu, FRANCE

2 - CETAC, 7 rue Coq Heron, 75030, Paris, FRANCE

3 - Agroécologie, INRAE, Institut Agro, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, F-21000 Dijon, FRANCE

4 - UMR Agronomie, Université Paris-Saclay - AgroParisTech - INRAE, 91120, Palaiseau, FRANCE

5 - Unité Expérimentale de La Motte, La Motte, 35653, Le Rheu, FRANCE

6 - Agri-Obtentions, 78660 Orsonville, FRANCE

7 - Arvalis-Institut du Végétal, Villiers-le-Bâcle, FRANCE

8 - GEVES, Domaine de l'Anjouère, La Pouëze, 49370, Erdre-en-Anjou, FRANCE

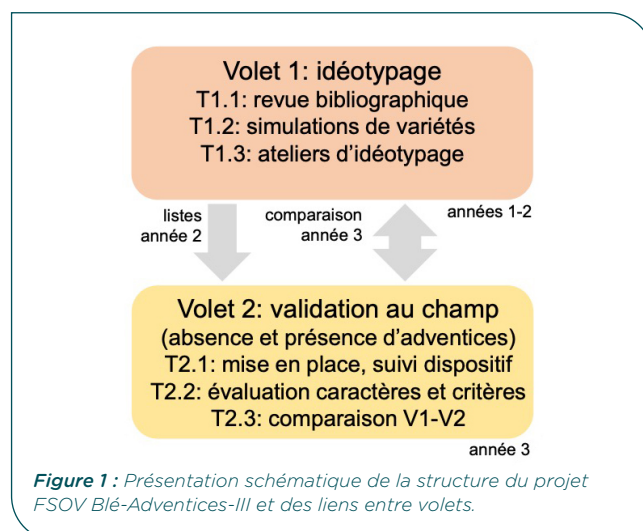
*Coordinateur du projet : Rémi PERRONNE, remi.perronne@inrae.fr

INTRODUCTION

La gestion des adventices est une problématique majeure en céréales à paille où elles peuvent engendrer des pertes de rendement importantes. Les herbicides de synthèse sont actuellement le levier le plus utilisé à travers le monde, permettant une gestion efficace et peu coûteuse des adventices avec des interventions possibles en pré-levée et en post-levée de la culture. Cependant, le développement de résistances aux herbicides chez de nombreuses espèces adventices (273 recensées à ce jour au niveau mondial) a mis en avant la limite de la gestion de la flore via ce levier. La réduction importante des autorisations de mises en marché de nouvelles molécules depuis plusieurs décennies (Chauvel *et al.*, 2022) a conduit à réduire le nombre de substances actives disponibles et a abouti à des impasses techniques et à la sélection de résistances au sein des populations d'adventices liée à l'application répétée des mêmes programmes herbicides. Par ailleurs, le modèle de production agricole intensif basé sur un usage important et récurrent d'intrants de synthèse et une simplification des rotations est actuellement mis en débat concernant ses effets sur la qualité de l'eau, la santé publique et l'environnement, ainsi que sa durabilité agronomique et socio-économique. Dans ce contexte de recherche de solutions pour réduire l'usage des herbicides, le choix de variétés ayant une capacité compétitive ou/et de tolérance plus élevée vis-à-vis des adventices constitue l'une des pistes n'induisant pas de coût supplémentaire pour l'agriculteur dans la gestion des adventices.

Dans le cadre de cette démarche, nous caractérisons le comportement d'une variété vis-à-vis des adventices par sa compétitivité et sa tolérance. La compétitivité correspond à la capacité de la variété à réduire, voire arrêter, la croissance et le développement des adventices, se traduisant par une réduction de leur biomasse et/ou de leur production de graines. La tolérance correspond à la capacité de la variété à limiter les pertes induites par la présence d'adventices, voire à maintenir son rendement. L'objectif principal du projet FSOV Blé-Adventices-III était d'explorer des voies

d'amélioration de la compétitivité des variétés de blé tendre vis-à-vis des adventices. Pour ce faire, le projet a été structuré en deux volets (Figure 1).



Dans cette partie introductive, nous précisons d'abord les principaux messages de la revue bibliographique réalisée dans le cadre du projet (Lever *et al.*, 2022a) avant de développer les autres travaux conduits dans le projet.

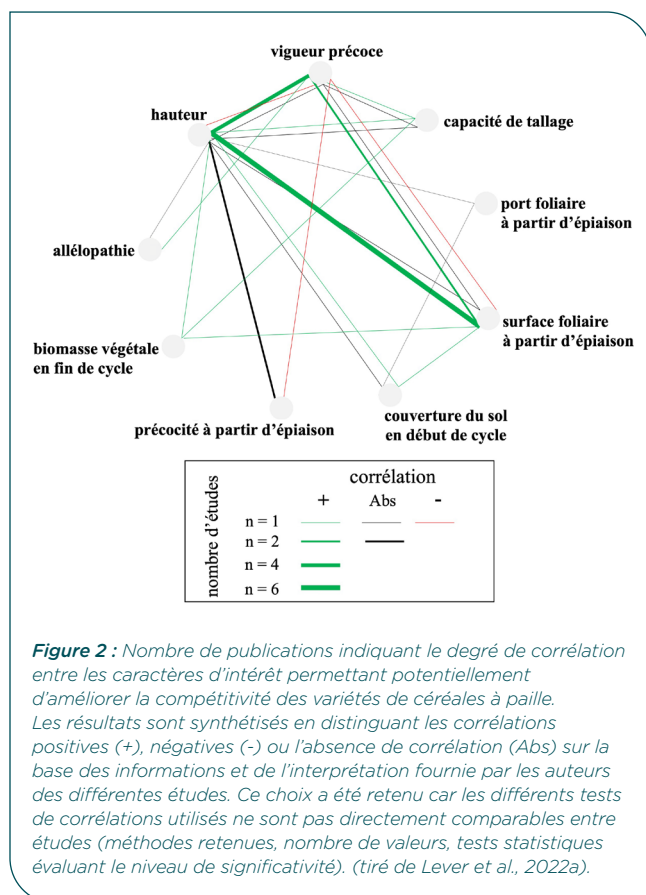
► Revue bibliographique

La revue avait pour objectif d'identifier les différents caractères d'intérêt pouvant améliorer la capacité de compétition des variétés de céréales à paille et s'est basée sur un corpus de 45 publications.

► Liste des caractères d'intérêt

Dans un premier temps, nous avons synthétisé les résultats portant sur les différents caractères d'intérêt identifiés dans la littérature. L'étude de la capacité de compétition d'une variété s'est focalisée sur la hauteur en fin de cycle, généralement corrélée positivement à la compétitivité. Une croissance rapide en hauteur procure généralement un avantage compétitif important. La hauteur en fin de cycle présente cependant une variabilité inter-variétale relativement réduite parmi les variétés de blé tendre

disponibles. Différentes mesures ont également été proposées afin d'approximer la vigueur des variétés en début de cycle, une vigueur élevée pouvant permettre d'améliorer la compétitivité des variétés et présentant par ailleurs une variabilité inter-variétale élevée. Différentes études suggèrent qu'une hauteur élevée en fin de cycle combinée à une vigueur élevée en début de cycle pourraient constituer les principaux caractères influençant la compétitivité des variétés de céréales à paille vis-à-vis des adventices. D'autres caractères ont été moins étudiés dans la littérature, mais présentent également des résultats intéressants, à savoir (1) la capacité de tallage (qui favorise la compétitivité mais est fortement dépendante de l'environnement), (2) les caractéristiques foliaires (les génotypes caractérisés par une surface foliaire individuelle élevée et un port semi-érigé à horizontal semblent présenter une meilleure compétitivité vis-à-vis des adventices), (3) la capacité de couverture du sol (augmentant l'interception lumineuse par la canopée de la plante cultivée, pouvant être approximée par l'indice foliaire ou LAI en anglais) et (4) la phénologie (une date d'épiaison ou de maturité plus précoce semblait plus fréquemment réduire la biomasse adventice sur la base du corpus de textes étudié). Les caractères racinaires n'ont pas été étudiés, et les mécanismes d'allélopathie ont fait l'objet d'autres synthèses (voir Mahé *et al.*, 2022 pour des propositions afin d'évaluer la capacité allélopathique d'un génotype au champ). Enfin, différents travaux ont mis en évidence l'importance de la biomasse végétale pour améliorer la compétitivité, celle-ci présentant une forte variabilité génotypique et environnementale à différents stades du cycle cultural. La littérature a ainsi identifié différentes pistes d'amélioration de la compétitivité des variétés de céréales à paille.



► Corrélations entre caractères d'intérêt

Dans un second temps, les principales corrélations deux à deux entre caractères ou groupes de caractères ont été recherchées afin d'identifier les caractères potentiellement complémentaires (Figure 2). Ces informations sont cependant disponibles uniquement dans 25 % des publications du corpus, limitant l'interprétation de ces résultats. Les principales tendances montrent (1) que la hauteur en fin de cycle semble être corrélée positivement à la vigueur en début de cycle dans la plupart des études ayant testé cette corrélation, même si de récents travaux (Aharon *et al.*, 2021) mettent en évidence qu'il est possible de sélectionner des génotypes courts présentant une vigueur précoce élevée et (2) qu'il existe une relation importante entre la mesure dynamique de la hauteur (à partir de l'élongation de la tige jusqu'à la fin du cycle) et la mesure du LAI au stade épiaison. Les autres corrélations n'ont été étudiées que sur un nombre très restreint de publications, limitant leur pertinence.

► Propositions pour les sélectionneurs

Dans un troisième temps, sur la base de ces résultats, des propositions ont été développées afin d'intégrer cet objectif d'amélioration de la compétitivité des variétés de céréales à paille dans de futurs schémas de sélection. L'article de Lever *et al.*, (2022a) précise d'abord les limites de nombreux travaux antérieurs et propose une méthodologie pour mieux caractériser la compétitivité et la tolérance des variétés vis-à-vis des adventices. Dans la suite, nous nous focaliserons plutôt sur les pistes d'amélioration des schémas de sélection. Cette revue a permis de préciser qu'à court terme (1) il est préférable de se focaliser sur la compétitivité plutôt que la tolérance et l'allélopathie, (2) il est utile de distinguer deux ensembles de caractères durant le cycle cultural : (a) les caractères pré-épiaison, évalués entre l'émergence de la culture et le début de l'épiaison, et (b) les caractères post-épiaison, évalués à partir de l'épiaison et jusqu'à la fin du cycle cultural, et de se focaliser sur l'amélioration des caractères pré-épiaison, ceux-ci pouvant être évalués via des démarches pour partie automatisables (notamment via l'analyse d'images obtenues par drone), (3) il est utile de mesurer les différents caractères séparément et non dans le cadre d'un indicateur synthétique, car chaque caractère apporte une information non strictement redondante. Cette revue a également proposé de premiers idéotypes variétaux (qui seront abordés par la suite), notamment en agriculture biologique (AB) en fonction des pratiques culturales et de la valorisation de la culture (ex. élevage ou culture de vente).

En conclusion de cette étude, afin d'améliorer la compétitivité des variétés de blé tendre vis-à-vis des adventices, il apparaissait important d'adapter les schémas de sélection actuels qui, pour la plupart, n'intègrent pas ou peu les mesures de caractères pré-épiaison. Un autre article synthétique sur la base de cette revue a été publié dans la revue Phytoma (Lever *et al.*, 2022b).

► MATÉRIEL ET MÉTHODE

Sur la base des résultats de la revue bibliographique, deux démarches ont été conduites en parallèle afin d'identifier des idéotypes adaptés de variétés de blé

tendre : (1) des simulations via le modèle mécaniste FLORSYS et (2) des ateliers d'idéotypage en présence de malherbologues et de sélectionneurs.

Une expérimentation au champ a ensuite été mise en place durant la dernière année du projet dans le but de comparer les résultats obtenus au champ aux résultats des travaux d'idéotypage.

► **Simulations à l'aide du modèle mécaniste FLORSYS**

Des simulations ont été réalisées avec le modèle mécaniste FLORSYS (Colbach *et al.*, 2021) afin d'évaluer des variétés de blé tendre existantes et virtuelles in silico. FLORSYS simule la levée, la croissance et la reproduction des cultures et des adventices dans les systèmes de culture, et les conséquences pour la production agricole et la biodiversité. L'approche se base sur la méthodologie développée pour identifier des idéotypes de variétés de pois pour la gestion agroécologique des adventices (Colbach *et al.*, 2022). Les simulations ont nécessité le paramétrage de trois variétés réelles (Caphorn, Cézanne, Orvantis, ce paramétrage avait été réalisé en amont du projet FSOV), la création de 20 variétés virtuelles, la définition de contextes de production et de systèmes de culture pour chaque contexte de production, conduisant à la simulation de 3600 systèmes de culture sur 30 ans et pour 10 séries météorologiques bourguignonnes différentes. L'importante quantité de données a été synthétisée grâce à des analyses statistiques, notamment de fouille de données. Compte tenu de la complexité de la démarche, il est pertinent de se référer à l'article qui a été publié sur ce travail réalisé dans le cadre du projet (Lebreton *et al.*, 2025).

► **Ateliers d'idéotypage**

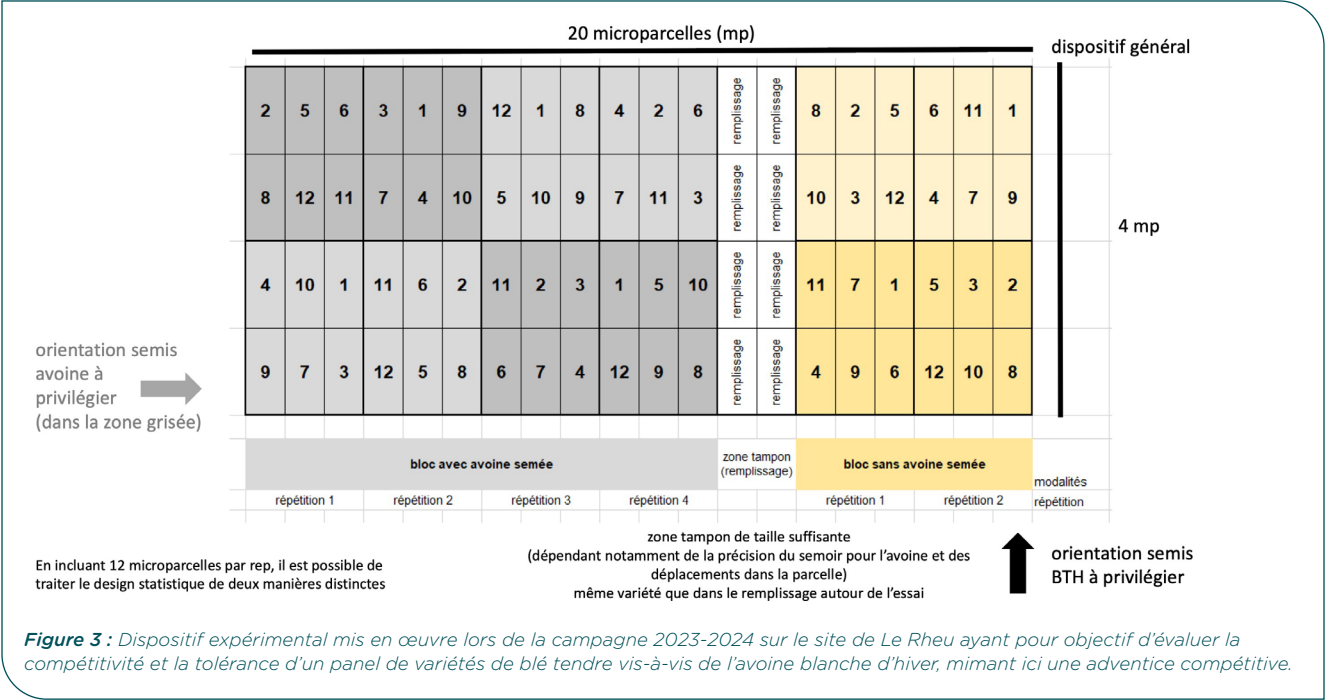
L'objectif général de cette démarche était de proposer des idéotypes variétaux visant à une meilleure gestion des adventices dans les SdC en AB. Nous nous sommes basés sur la définition proposée par Debaeke et Quilot-Turion (2014), qui définissent un idéotype variétal comme

une combinaison optimale de caractères (ou traits) morphologiques, phénologiques et physiologiques ou de leurs déterminants génétiques conférant à un matériel végétal une adéquation satisfaisante à un environnement, à un mode de production et d'utilisation donnés. Nous avons réfléchi cette gestion des adventices à l'échelle du SdC et cherché à définir des stratégies de gestion des adventices combinant pratiques culturales et caractéristiques variétales d'intérêt. Pour concevoir un idéotype, Durel et Gauffreteau (2014) proposent une démarche en 3 étapes, à savoir (1) la définition d'un cahier des charges (objectifs hiérarchisés correspondant aux attentes des utilisateurs et aux contraintes de production et d'utilisation des variétés), (2) la conception d'idéotypes de plantes (combinaisons de caractères permettant de répondre aux objectifs du cahier des charges) et (3) l'évaluation des idéotypes produits. Dans le cadre de cette tâche nous avons travaillé principalement à la réalisation des deux premières étapes de cette méthode. Ce travail a été réalisé en 2023 avec l'organisation de deux ateliers et d'une enquête auprès de malherbologues et d'agronomes experts dans la gestion des adventices en AB. Sur cette base, les sélectionneurs ont proposé des stratégies et des idéotypes en réponse à différents scénarios.

► **Expérimentation au champ**

Une expérimentation au champ a été réalisée lors de la campagne 2023-2024 sur quatre sites (Le Rheu, Allonnes, Maule et Orsonville).

Sur la base des connaissances associées à ce type d'expérimentation, une des contraintes majeures de l'évaluation expérimentale de différents caractères morphologiques et phénologiques, en absence et présence d'adventices, porte sur la mise en place (semis, levée) et le maintien (désherbage localisé) d'une densité homogène d'adventices. Dans ce projet, comme dans d'autres travaux antérieurs, tenant compte de cette contrainte, nous avons retenu l'avoine blanche d'hiver (*Avena sativa* L.) semée à 20 grains/m² afin de mimer



la compétition adventice. Une parcelle à faible densité d'adventices de la flore spontanée a été privilégiée. Un objectif de 20% de perte de rendement a été recherché sur la base des connaissances de la littérature et d'avis d'experts. La procédure de semis a varié selon les sites suivant le matériel disponible. La Figure 3 présente l'option mise en œuvre sur le site de Le Rheu. Suite à cette campagne, deux limites sont apparues concernant la mise en place du dispositif : (1) compte tenu des conditions météorologiques automnales, l'avoine a été semée trop tardivement (courant novembre) et sa levée a été retardée par rapport au blé tendre, (2) cette levée tardive a compliqué son identification dans les microparcelles en début de cycle cultural du blé tendre. Au cours de la campagne culturale, une conduite faibles intrants, incluant absence de fongicides, absence d'insecticides, absence de raccourcisseurs de croissance, réduction de la dose d'azote minéral (suppression de l'apport sortie d'hiver, ½ apport à épi 1cm, ½ apport entre 2 nœuds et épiaison avec un objectif de réduire de 60 unités d'azote sur l'ensemble du cycle) et absence de désherbage si la flore adventice spontanée était limitée, a été privilégiée. L'interprétation des variables observées a été affectée par les conditions de la campagne culturale 2023-2024 qui présentait une très forte pression des maladies foliaires, par ailleurs différente entre sites. Le dispositif mis en œuvre incluait 12 variétés et 2 modalités (avec et sans avoine, incluant 2 répétitions sans avoine et 4 répétitions avec avoine). La liste des variétés incluait des variétés jugées compétitives par les sélectionneurs et d'autres non compétitives. Les variétés présentaient une variabilité en termes de précocité, de pouvoir couvrant et de hauteur en fin de cycle. Une variété a été exclue des analyses du fait d'une faible faculté germinative constatée après semis. De nombreux caractères ont été mesurés au cours du cycle, incluant (1) la précocité à épi 1cm et à épiaison, (2) le taux de couverture du sol, (3) la hauteur, (4) la surface foliaire individuelle, (5) le port foliaire, (6) l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI en anglais) à épi 1cm, 2 nœuds et épiaison de la variété témoin KWS Eternel, (7) la biomasse sèche des adventices, de l'avoine et de la culture à floraison, (8) le nombre d'inflorescences d'avoine avant récolte, (9) un relevé de flore adventice, ainsi que différentes notations standard du schéma de sélection (pression maladie, verse, rendement, caractères post-récolte). Certaines notations n'ont pas pu être réalisées sur certains sites et modalités du fait d'une levée faible et hétérogène sur le site d'Orsonville. Concernant la liste des notations à réaliser, le déclenchement d'une série de notations à un stade donné d'une variété témoin a permis de capter différentes composantes de la compétitivité en une journée par le notateur présent sur site. Concernant les protocoles associés aux notations, certains se sont avérés trop peu précis. C'est le cas pour la notation de port foliaire et la notation de surface foliaire individuelle. Selon les stades, il apparaissait très difficile de discriminer les génotypes sur certains sites. Des mises à jour ont été réfléchies suite à cette campagne. Différentes analyses statistiques ont été conduites, mais certaines présentent des limites inhérentes aux contraintes expérimentales de la campagne 2023-2024. Dans la suite, nous ne présenterons qu'une partie des résultats, considérés comme les plus fiables statistiquement.

➤ RÉSULTATS

► Simulations à l'aide du modèle mécaniste FLORSYS

Les résultats obtenus sur la base des simulations FLORSYS sont très riches. Nous nous focaliserons sur l'usage direct des résultats dans la démarche de sélection. L'ensemble des résultats sont disponibles dans Lebreton *et al.* (2025).

Les simulations ont comparé 4 objectifs de sélection (1) maximisation du rendement potentiel (en absence d'adventices), (2) maximisation du rendement réel (en présence d'une forte pression d'adventices), (3) maximisation de la tolérance vis-à-vis des adventices ou (4) maximisation de la compétitivité vis-à-vis des adventices (évaluation de la suppression de celles-ci). L'objectif de maximisation du rendement réel a donné les meilleurs résultats également pour maximiser la tolérance et la compétitivité vis-à-vis des adventices.

Deux idéotypes distincts maximisent le rendement en présence d'une forte pression d'adventices. Ils se distinguent des 3 variétés existantes notamment par un faible taux de perte en pré-levée, une couverture du sol post-levée rapide, une floraison tardive et une taille plus réduite. Mais ces deux idéotypes conduisent à des objectifs de sélection antagonistes sur d'autres paramètres. Le premier idéotype est par exemple très tolérant au froid mais avec une photosynthèse limitée en cas de forte chaleur, le deuxième présente les caractéristiques opposées. Ces paramètres sont discutés dans l'article, mais ne seront pas abordés dans ce document. Cependant, la plupart des paramètres du modèle FLORSYS sont trop compliqués à mesurer en routine dans les essais variétaux et il reste à développer des indicateurs de ces paramètres mesurables au champ.

Nous nous focalisons ici sur deux paramètres importants et accessibles en sélection (1) la vitesse de couverture du sol post-émergence (une rapidité de couverture étant à privilégier) et (2) la hauteur à floraison (une hauteur faible à moyenne étant à privilégier, Figure 4). Concernant la vitesse de couverture du sol en début de cycle, deux récents travaux ont montré l'intérêt de sélectionner sur la vigueur en début de cycle (notamment caractérisée par la couverture du sol, Aharon *et al.*, 2011 ; Hendriks *et al.*, 2022), ceci étant cohérent avec notre étude (Lebreton *et al.*, 2025). Cette cible permettrait en effet, en présence d'adventices, de réduire la biomasse adventice et d'augmenter le rendement, tout en ne pénalisant pas le rendement en absence d'adventices. Concernant la hauteur à floraison, largement corrélée à la hauteur finale, les résultats des simulations sont moins cohérents, la hauteur en fin de cycle étant souvent un caractère associé à une meilleure compétitivité sur le terrain. Cependant, le lien avec le rendement est plus indirect, et l'objectif de sélection visant à obtenir des variétés de blé tendre hautes est antagoniste à d'autres objectifs (indice de récolte, tolérance à la verse).

Il est à noter que dans les simulations, aucune des variétés paramétrées (Caphorn, Cézanne, Orvantis) ne répond de manière optimale à aucun des objectifs de sélection, qu'il s'agisse de rendement en absence ou en présence d'adventices, de tolérance ou de compétitivité vis-à-vis des adventices.

Résultats basés sur les simulations FLORSYS

Paramètres du blé associés avec... le meilleur rendement en condition avec adventices		Idéotypes	Résultats de la littérature portant sur le rendement en condition avec adventices
Germination et émergence			
Couverture du sol post-émergence (début de cycle cultural)	rapide	iY1 iY2 iY3 iC2 iN1 iN2 iN3 iH1 iH2	Une comparaison d'une lignée compétitive quasi-isogénique (near isogenic line, NIL) avec son parent récurrent caractérisé par un niveau de couverture du sol différent n'a pas montré de différence de rendement et de PMG (Aharon <i>et al.</i> , 2021). Une comparaison de lignées à « vigueur précoce élevée » (high vigour lines, HV lines) avec des variétés commerciales de blé utilisées comme parents a montré seulement une légère réduction ou aucune différence de rendement en conditions d'infestation d'adventices (Hendriks <i>et al.</i> , 2022)
	lente	iC3	
Architecture aérienne			
Hauteur (floraison)	petite à moyenne	iY1 iY2 iY3 iN1 iN2 iH1 iH2 iH3	Une comparaison entre des lignées quasi-isogéniques (near isogenic lines, NIL) grandes et semi-naines a montré à la fois une capacité de suppression plus élevée des adventices et une perte de rendement plus faible pour lignées quasi-isogéniques de grande taille (Zerner <i>et al.</i> , 2008). Cette tendance a déjà été observée pour le blé d'hiver, bien que la lignée isogénique la plus haute ne présentait pas toujours le rendement le plus élevé et que la lignée isogénique la plus courte ne présentait pas toujours le rendement le plus faible (Seefeldt <i>et al.</i> 1999)
	haute	iN3	

Figure 4 : Deux paramètres du blé tendre associés à l'objectif de maximisation du rendement réel (forte pression d'adventices), les idéotypes retenus selon l'orientation de la sélection, ainsi que la cohérence avec les informations disponibles dans la littérature. Les informations disponibles sur la tolérance et la compétitivité des vis-à-vis des adventices sont basées sur une revue de la littérature sur les céréales à paille semées en hiver et au printemps dans le monde entier (Lever *et al.*, 2022a). Idéotypes de blé : iY1 iY2 iY3 = agriculture biologique incluant l'usage du labour, iN1 iN2 iN3 = agriculture biologique en semis direct, iH1 iH2 iH3 = agriculture conventionnelle incluant l'usage des herbicides, iC1 iC2 iC3 = agriculture biologique avec le blé tendre semé dans un couvert de trèfle, iT1 iT2 iT3 = objectifs de tolérance aux adventices (faible perte de rendement en présence d'adventices), iS1 iS2 iS3 = objectifs de compétitivité vis-à-vis des adventices (faible biomasse d'adventices au champ). (tiré de Lebreton *et al.*, 2025).

Par ailleurs, Lebreton *et al.* (2025) présentent les résultats pour des systèmes de culture distincts, chacun s'appuyant sur différents leviers de gestion des adventices, et pas uniquement la variété, qui ne présente ici qu'un poids limité dans leur gestion. Dans ces systèmes, les leviers de gestion les plus influents incluent le travail du sol (fréquence, type, date), le semis (date, densité, taille de l'inter-rang), le désherbage mécanique (fréquence, date, vitesse, taille de l'inter-rang désherbée), l'usage des herbicides s'il est autorisé dans le système. Les relations ne sont pas toujours directes, ces choix affectant également l'objectif de rendement visé, les levées d'adventices et le stock semencier du sol, les simulations étant effectuées sur 30 ans.

► Ateliers d'idéotypage

Le premier atelier a permis de mieux comprendre l'importance de la gestion des adventices en AB, une problématique prioritaire à l'échelle du SdC. Ceci a justifié la définition de scénarios contrastés, incluant des scénarios plus ou moins éloignés des pratiques majoritaires mises en œuvre. Le constat partagé par ailleurs est que la compétitivité n'est pas le critère prioritaire d'un agriculteur pour choisir sa variété, celui-ci priorisant le rendement, la précocité adaptée à sa zone de production, la qualité et la tolérance aux maladies. Il est donc nécessaire de définir des idéotypes tenant compte des autres pratiques de gestion des adventices mises en œuvre en AB, ainsi que des objectifs prioritaires

de l'agriculteur pour sa culture de blé tendre d'hiver. En se basant sur un schéma résumant les principaux leviers de gestion des adventices en AB (Figure 5, issue d'un précédent projet CASABIO 2017-2019), nous avons détaillé les leviers pouvant avoir un lien avec la variété, et donc la définition de nouveaux idéotypes plus adaptés.

Sur cette base, 3 scénarios contrastés ont été définis, à savoir (1) mécanisation durant tout le cycle (labour, faux semis, semis tardif, herse-étrille, écimage), (2) mécanisation avant l'hiver (semis précoce et régulier, désherbage mécanique avant levée, herse-étrille uniquement avant l'hiver), (3) semis dans une luzerne fauchée en phase dormante (semis tardif en rangs espacés pour fauche de la luzerne, tri après récolte). La définition des idéotypes s'est centrée sur les caractères de début de cycle, la gestion de la flore adventice devant être réalisée tôt dans le cycle du blé tendre d'hiver. Cependant, certains objectifs de sélection peuvent s'opposer en partiellement à la maximisation de l'indice de récolte et à la limitation d'un microclimat favorable aux maladies. Pour chacun des scénarios ci-dessus, différents caractères ont été identifiés. Certains objectifs sont communs aux différents scénarios. Ainsi, avant le stade épi 1cm, il serait intéressant de rechercher une croissance précoce en biomasse et une couverture rapide de l'espace, ceci pouvant être associé à des caractères de (1) vitesse de croissance à la levée, (2) capacité de tallage, (3) surface foliaire élevée, (4) précocité à épi 1cm, (5) dynamique de hauteur, (6) production importante de biomasse en début de cycle. D'autres objectifs sont antagonistes, notamment entre les

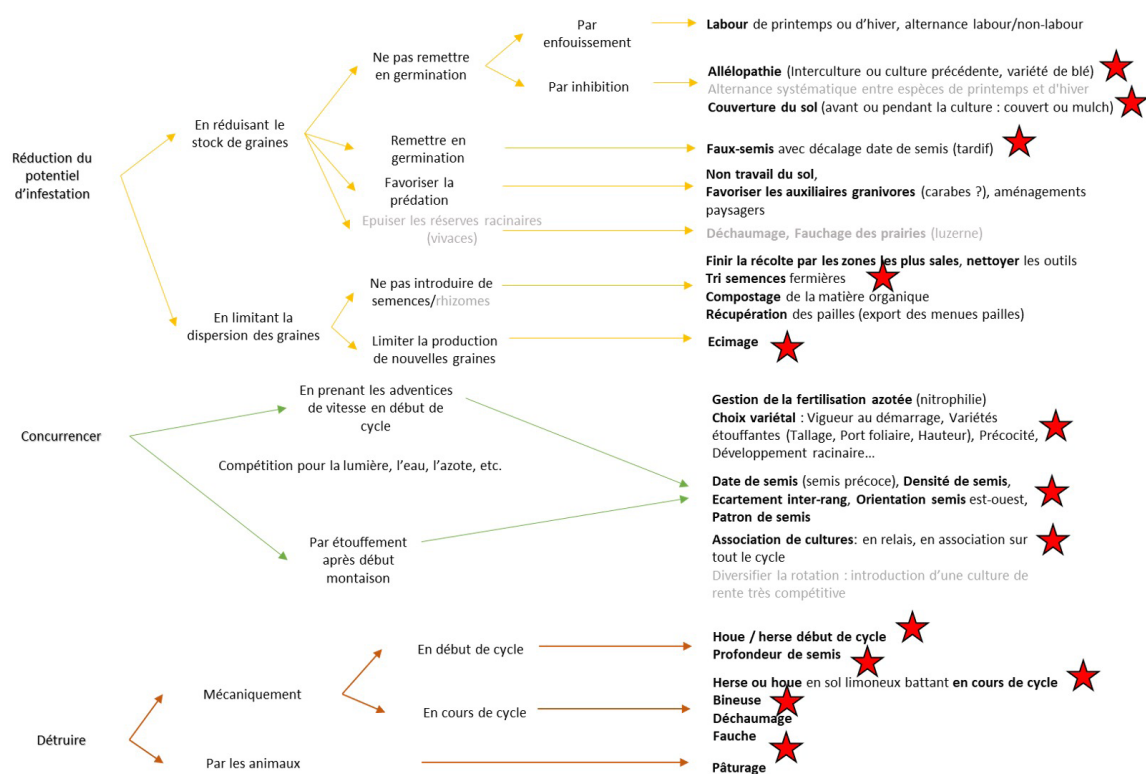


Figure 5 : Classification des grandes pratiques de gestion des adventices. Ce schéma est inspiré de travaux menés dans le cadre du projet CASABIO (2017-2019) et d'un groupe de travail de l'Association pour la Promotion d'une Agriculture Durable (APAD) sur les adventices. Les pratiques qui ne s'appliquent pas sur blé sont grisées, les pratiques pouvant être impactées de manière plus ou moins importante par le choix de la variété sont repérées par une étoile rouge à droite.

Allonnes - avec avoine							
	% couv épi 1cm	hauteur épi 1cm	% couv épiaison	hauteur épiaison	nb inflo avoine	MS avoine	MS adventice
épiaison	-0.110	-0.686	0.013	-0.376	-0.194	0.167	-0.312
% couv épi 1cm		-0.285	0.653	-0.255	0.066	0.035	-0.300
hauteur épi 1cm			0.105	0.565	-0.035	0.073	0.498
% couv épiaison				0.293	-0.525	-0.191	-0.172
hauteur épiaison					-0.533	-0.428	0.256
nb inflo avoine						0.436	0.243
MS avoine							0.043
Maule - avec avoine							
	% couv épi 1cm	hauteur épi 1cm	% couv épiaison	hauteur épiaison	nb inflo avoine	MS avoine	MS adventice
épiaison	-0.247	-0.715	0.096	-0.365	0.633	0.516	0.180
% couv épi 1cm		0.050	0.507	-0.133	-0.712	-0.438	0.117
hauteur épi 1cm			0.297	0.731	-0.450	-0.497	-0.089
% couv épiaison				0.420	-0.240	-0.131	0.122
hauteur épiaison					-0.320	-0.493	-0.025
nb inflo avoine						0.882	-0.100
MS avoine							-0.258
Le Rheu - avec avoine							
	% couv épi 1cm	hauteur épi 1cm	% couv épiaison	hauteur épiaison	nb inflo avoine	MS avoine	MS adventice
épiaison	0.423	-0.841	-0.101	-0.469	-0.092	-0.015	0.028
% couv épi 1cm		-0.456	0.539	-0.439	-0.334	-0.287	-0.070
hauteur épi 1cm			0.328	0.692	0.261	0.069	0.061
% couv épiaison				0.388	-0.181	-0.043	0.119
hauteur épiaison					-0.200	-0.055	0.177
nb inflo avoine						0.672	-0.341
MS avoine							-0.308

Figure 6 : Analyses de corrélations réalisées site par site pour la modalité en présence d'avoine sur la base des valeurs moyennes de cette modalité via un test de Pearson. Les résultats sont comparables pour la modalité sans avoine, et confirmés via un test de rang de Kendall. En jaune, corrélation intermédiaire (> 0.5 ou < -0.5). En vert, corrélation élevée (> 0.7 ou < -0.7). épiaison : date d'épiaison, % couv épi 1cm : taux de couverture au stade épi 1cm de la variété témoin (idem pour le stade épiaison), hauteur épi 1cm : hauteur en cm au stade épi 1cm de la variété témoin (idem pour le stade épiaison), nb inflo avoine : nombre d'inflorescences d'avoine avant récolte, MS avoine : biomasse sèche d'avoine à floraison, MS adventice : biomasse sèche d'adventices de la flore spontanée à floraison. A noter, la biomasse sèche d'adventices de la flore spontanée à floraison est très réduite par rapport à la biomasse d'avoine, n'induisant pas de biais dans l'interprétation de la compétition blé - avoine.

stades épi 1cm et 2 nœuds, tels que le port foliaire et la capacité de couverture de l'inter-rang (à limiter pour le scénario privilégiant la mécanisation durant tout le cycle, tandis que les autres scénarios visent à une fermeture du couvert la plus rapide possible incluant hauteur importante et port foliaire étalé). L'exercice a permis de définir des priorités parmi l'ensemble des caractères discutés.

► **Expérimentation au champ**

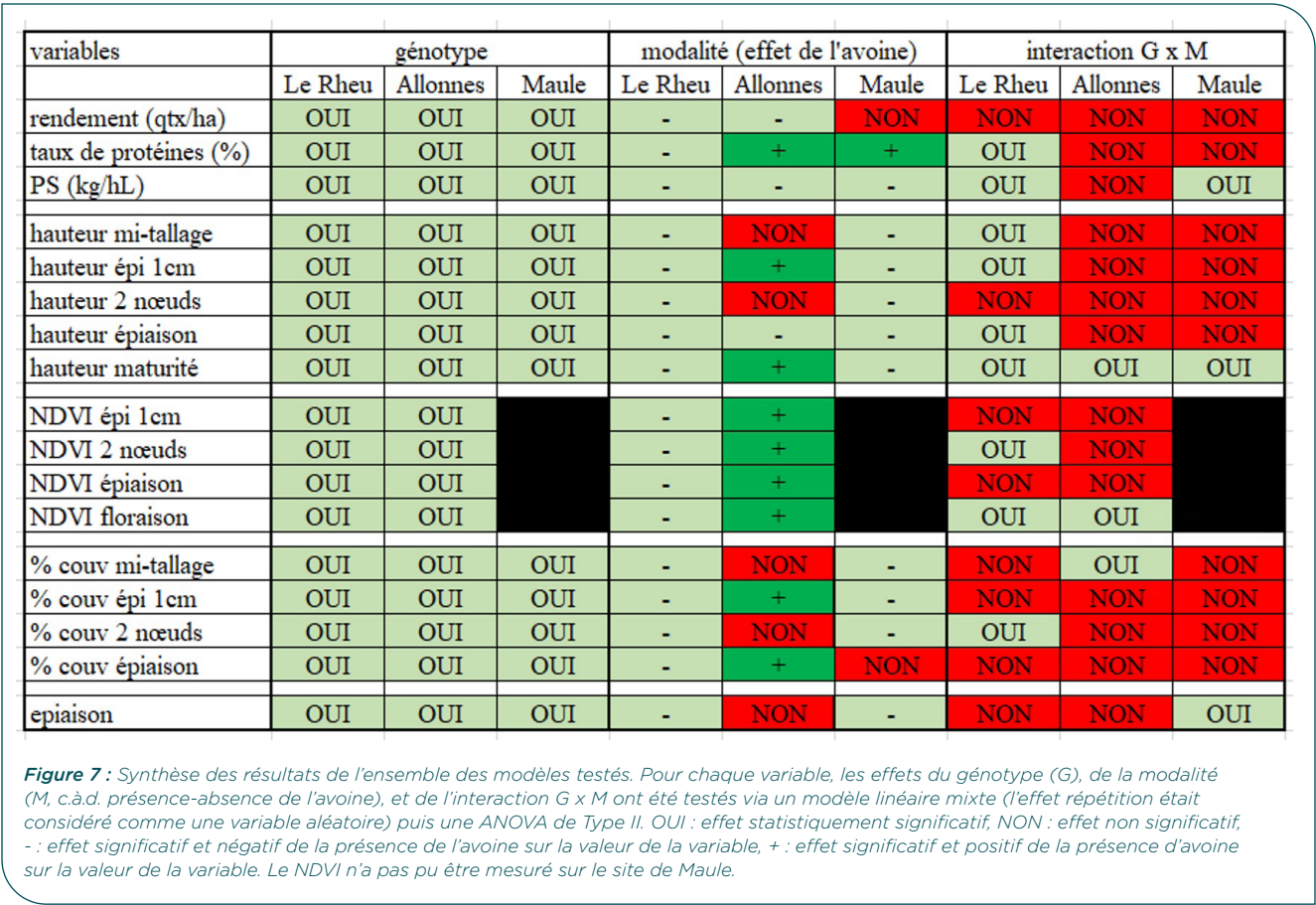
Pour rappel, les résultats ne se basent que sur la campagne 2023-2024, principalement trois sites et 11 variétés, limitant de fait la portée de certaines conclusions.

L'analyse des corrélations de différentes mesures a été réalisée site par site et modalité par modalité via un test de Pearson, et confirmé par un test de rang de Kendall (résultats non détaillés dans cet article). Pour la hauteur, en comparant entre les stades phénologiques, le résultat est proche entre les modalités, et il est possible de conclure que deux mesures de hauteur (à épi 1cm et fin de cycle) apporteraient des informations complémentaires et que ces mesures sont à conduire dans un dispositif expérimental standard (en absence d'avoine). Pour le taux de couverture et le NDVI, il est possible de conclure qu'il n'est pas nécessaire de mesurer à la fois le taux de couverture et le NDVI à un même stade (et qu'à partir d'épiaison la mesure de NDVI présente un biais lié au niveau de pression de maladies et n'est donc pas conseillée), que deux mesures de taux de couverture (à épi 1cm et à épiaison) apporteraient des informations complémentaires et que ces mesures sont à conduire dans un dispositif expérimental en absence d'avoine. Les caractéristiques

de port foliaire et de surface foliaire apparaissent peu discriminantes.

L'analyse des corrélations a également été réalisée ensuite en incluant un sous-ensemble de caractères peu corrélés entre eux (résultats présentés plus haut) et d'autres variables, notamment associées à la production, afin d'identifier des tendances entre sites. Ces analyses de corrélations ont également été réalisées site par site et modalité par modalité sur la base des valeurs moyennes par modalité via un test de Pearson (Figure 6). Les résultats suggèrent que le protocole de notations pourrait être simplifié au stade épiaison pour au moins certains caractères, l'importance des notations en début de cycle pour bien caractériser les variétés (notamment au stade épi 1cm), la pertinence du comptage du nombre d'inflorescences en fin de cycle pour traduire le degré de compétition avec l'avoine et que la hauteur à épi 1cm capte partiellement la précocité à épiaison. On notera que la corrélation est encore plus forte entre la précocité à épi 1cm et la hauteur à épi 1cm (Allonnes = -0.736, Maule = -0.683, Le Rheu = -0.606), la hauteur traduisant pour partie la précocité à montaison du génotype, suggérant que cette notation de hauteur pourrait être un bon proxy de la notation de la date épi 1cm pour suivre cette information sur des panels variétaux plus larges. Des mesures complémentaires conduites après la fin du projet ont observé, sur des panels différents et plus larges, une tendance similaire.

Les effets du génotype (G), de la modalité (M), ainsi que de l'interaction G x M ont été testés sur un ensemble de variables via un modèle linéaire mixte (effet



répétition comme variable aléatoire) puis une ANOVA de Type II. La synthèse de l'ensemble des résultats est présentée en Figure 7. Il est possible de conclure (1) quel que soit la variable ou le site considéré, que l'effet génotype est toujours statistiquement significatif, (2) que la présence de l'avoine affecte négativement l'ensemble des variables sur le site de Le Rheu et la plupart des variables sur le site de Maule (à l'exception du taux de protéines) mais que la présence d'avoine affecte positivement de nombreuses variables sur le site d'Allonnes, dont le taux de protéines et de nombreuses variables associées à la compétitivité, (3) que l'interaction est souvent non significative, et rarement très significative. Ces résultats confirment la possibilité de sélectionner pour les caractères associés à la compétitivité. Par ailleurs, ils mettent en lumière la difficulté d'interprétation de l'effet de la présence de l'avoine sur les variables associées à la production.

Sur ce dernier point, l'hypothèse privilégiée est que l'ordre des facteurs affectant le cycle cultural du blé diffèrait entre les sites, et que ces différences ont partiellement affecté la compétitivité des génotypes vis-à-vis de l'avoine. A Le Rheu, l'hydromorphie en début de cycle associée à une ressource lumineuse peu limitante, puis une campagne marquée par différentes maladies se succédant, affectant les génotypes dans un ordre précis, pourrait justifier des nutriments potentiellement plus limitants que la lumière dans un premier temps, puis la réduction de la capacité photosynthétique. A Maule, la ressource lumineuse semblait également peu limitante, la campagne a été marquée par une forte pression de rouille brune puis de septoriose. A Allonnes, la ressource lumineuse semblait plus limitante, la campagne a été marquée par une très forte pression de septoriose, suggérant que la lumière a d'abord été le facteur limitant, puis la réduction de la capacité photosynthétique, et enfin la verse. Ceci expliquerait le classement différent des variétés sur les variables associées à la production. Des pistes ont été identifiées afin d'affiner les protocoles de mesure de certains caractères et de modifier le dispositif expérimental pour réduire l'effet des facteurs confondants.

DISCUSSION

L'objectif principal du projet Blé-Adventices-III était d'explorer des voies d'amélioration de la compétitivité des variétés de blé tendre vis-à-vis des adventices pour l'agriculture biologique. Pour y parvenir, le projet s'est focalisé largement sur les cibles de sélection à prioriser via des démarches complémentaires basées sur une revue exhaustive de la littérature, des simulations avec le modèle FLORSYS et des ateliers d'idéotypage à dire d'experts. Ces trois démarches, de natures différentes, ont présenté différents résultats contradictoires, mais également quelques tendances communes sur lesquelles nous nous focaliserons dans cette discussion. En effet, tous les travaux du Volet 1 ont confirmé l'importance des caractères associés à la compétitivité en début de cycle pour améliorer la capacité compétitive globale du blé tendre d'hiver. Ces résultats sont cohérents avec de récents travaux suggérant que cette piste d'amélioration n'affecterait

pas le rendement, même en absence d'adventices (Aharon *et al.*, 2011 ; Hendriks *et al.*, 2022), ce qui n'est pas nécessairement le cas pour d'autres caractères, davantage étudiés dans la littérature, comme la hauteur en fin de cycle, pour laquelle les résultats ne concordent pas. Cette piste nous semble par ailleurs cohérente avec une stratégie globale de gestion des adventices, et n'a été que peu travaillée encore par les sélectionneurs de blé tendre d'hiver.

L'année d'expérimentation 2023-2024, malgré des limitations précisées plus haut, permet de confirmer l'intérêt des caractères de début de cycle, notamment les notations effectuées à épi 1cm. Elle a permis, entre autres, de confirmer qu'il existe une variabilité inter-variétale élevée pour les différents caractères de début de cycle (précocité à épi 1cm, hauteur, port et surface foliaire individuelle, taux de couverture à épi 1cm d'une variété témoin), un effet du génotype significatif, des corrélations assez marquées entre stades précoces (ne justifiant pas nécessairement de mesures répétées entre épi 1cm et 2 nœuds) et deux axes potentiellement complémentaires de sélection à un stade précoce. En effet, si la précocité à épi 1cm apparaît fortement corrélée à la hauteur en début de cycle et au port foliaire (souvent plus redressé pour des variétés plus précoces à montaison), le taux de couverture et, dans une moindre mesure, la surface foliaire individuelle semble relativement indépendants de la précocité. Ces deux axes, associés (1) à la vitesse de développement et (2) à la capacité de couverture du sol, pourraient ainsi être sélectionnés séparément. Parmi le panel étudié, aucune variété ne présentait en effet une combinaison optimale sur ces deux axes, permettant une marge d'amélioration. De plus, sélectionner séparément sur ces deux axes permettra de répondre aux demandes distinctes des agriculteurs, les scénarios discutés dans le cadre des ateliers d'idéotypage ne nécessitant pas tous une capacité de couverture du sol maximale à épi 1cm. Le projet ne conclut pas à l'inintérêt d'une sélection sur des caractères de fin de cycle, mais le gain sera potentiellement moindre et les compromis avec d'autres caractères sous sélection plus fréquents. De même, le projet ne conclut pas à l'inintérêt des caractères entre la levée et le stade épi 1cm, mais ceux-ci sont plus difficilement quantifiables au champ, et souvent plus dépendants de l'environnement. Pour information, des mesures ont été effectuées à épi 1cm de la variété la plus précoce du panel, soit au moins deux semaines avant le stade épi 1cm de la variété témoin, mais elles s'avéraient fortement corrélées et moins à même de distinguer entre les génotypes.

Plusieurs limitations ont été identifiées dans les deux volets du projet et ont été discutées dans les articles publiés (Lever *et al.*, 2022a, Lever *et al.*, 2022b, Lebreton *et al.*, 2025), les rapports annuels, ainsi que le présent document. Des mises à jour sont prévues dans le cadre d'un projet complémentaire PARSADA PARAD (2025-2030) concernant notamment la revue bibliographique, le dispositif expérimental et les protocoles de notations, en s'appuyant sur les acquis de ce projet FSOV. Une synthèse récente multi-espèces a par ailleurs été réalisée concernant les traits à cibler en sélection pour gérer les adventices en absence d'usage d'herbicides (Debaeke *et al.*, 2024).



REMERCIEMENTS

Les rédacteurs du document tiennent à remercier chaleureusement l'ensemble des collègues INRAE, d'Agri-Obtentions et du CETAC pour leurs implications

dans les différents travaux réalisés, ainsi que les nombreux collègues non permanents impliqués dans le projet (CDD, stagiaires, mains-d'œuvre occasionnelles), et les collègues du GEVES et d'Arvalis - Institut du Végétal pour leurs participations à des discussions constructives.

Références bibliographiques

Aharon, S., Fadida-Myers, A., Nashef, K., Ben-David, R., Lati, R.N., Peleg, Z. (2021) Genetic improvement of wheat early vigor promote weed-competitiveness under Mediterranean climate. *Plant Science*, 303, 110785.

Chauvel, B., Gauvrit, C., Guillemin, J-P. (2022) From sea salt to glyphosate salt: a history of herbicide use in France. *Advances in Weed Science*. 40: e02022001.

Colbach, N., Felten, E., Gée, C., Klein, A., Lannuzel, L., Lecomte, C., Maillot, T., Strbik, F., Villerd, J., Moreau, D. (2022) Tracking ideal varieties and cropping techniques for agroecological weed management: a simulation-based study on pea. *Frontiers in Plant Science* 13, 809056.

Colbach, N., Colas, F., Cordeau, S., Maillot, T., Queyrel, W., Villerd, J., Moreau, D. (2021) The FLORSYS crop-weed canopy model, a tool to investigate and promote agroecological weed management. *Field Crops Research* 261, 108006.

Debaeke, P. & Quilot-Turion, B. (2014) Conception d'idéotypes de plantes pour une agriculture durable. Collection Ecole-chercheurs INRA, FormaSciences, FPN, INRA-CIRAD.

Durel C.E., Gauffreteau A. (2014) Une démarche théorique de conception d'idéotypes. In Debaeke P. & Quilot-Turion,

B. (eds). Conception d'idéotypes de plantes pour une agriculture durable. Collection Ecole-chercheurs INRA, FormaSciences, FPN, INRA-CIRAD, pp 73-79.

Hendriks, P.W., Gurusinge, S., Ryan, P.R., Rebetzke, G.J., Weston, L.A. (2022) Competitiveness of early vigour wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes is established at early growth stages. *Agronomy*, 12(2): 377.

Lebreton, P., Moreau, D., Perronne, R., Colbach, N. (2025) Tracking ideal varieties for agroecological weed management in organic wheat. A simulation study. *European Journal of Agronomy*. 164: 127501.

Lever, L., Rolland, B., Chauvel, B., Cordeau, S., Perronne, R. (2022a) Caractères variétaux associés à la compétition des génotypes de céréales à paille vis-à-vis des adventices et pistes pour leur sélection : une revue bibliographique. *Agronomie, Environnement & Sociétés* 12-1: 1-16.

Lever, L., Rolland, B., Chauvel, B., Cordeau, S. Perronne, R. (2022b) Des céréales à paille compétitives vis-à-vis des adventices. *Phytoma* 757: 48-51.

Mahé, I., Chauvel, B., Colbach, N., Cordeau, S., Gfeller, A., Reiss, A., Moreau, D. (2022) Deciphering field-based evidences for crop allelopathy in weed regulation. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42, 1-20.