



HAL
open science

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

Laetitia Lever, Bernard Rolland, Bruno Chauvel, Stéphane Cordeau, Rémi Perronne

► To cite this version:

Laetitia Lever, Bernard Rolland, Bruno Chauvel, Stéphane Cordeau, Rémi Perronne. 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*, 2022, 12 (1), pp.art. 18. 10.54800/cgp267 . hal-03952929

HAL Id: hal-03952929

<https://hal.inrae.fr/hal-03952929>

Submitted on 23 Jan 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Revue AE&S 12-1 Gestion des adventices : quelles opportunités et quels effets des couverts végétaux - juin 2022

Revue à comité de lecture et en accès libre éditée par l'Association Française d'Agronomie sous le numéro ISSN 1775-4240. Plus d'informations www.agronomie.asso.fr/aes

L'AFA est une association à but non lucratif qui publie des travaux en accès libre.

Pour soutenir cette démarche, faites connaître AE&S, adhérez à l'association et faites adhérer votre organisme et vos collègues !



ARTICLE

Caractères variétaux associés à la compétition des géotypes de céréales à paille vis-à-vis des adventices et pistes pour leur sélection : une revue bibliographique

Laëtitia LEVER¹, Bernard ROLLAND¹, Bruno CHAUVEL², Stéphane CORDEAU², Rémi PERRONNE^{1*}

¹IGEPP, INRAE, Institut Agro, Univ Rennes, 35653, Le Rheu, France

²Agroécologie, INRAE, Institut Agro, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, F-21000 Dijon, France

Email contact auteurs* : remi.perronne@inrae.fr

Résumé

La gestion des adventices constitue une problématique majeure en céréales à paille afin de mener la transition agroécologique de l'agriculture française. Le choix de variétés ayant une capacité de compétition élevée vis-à-vis des adventices a fait l'objet de peu d'investissements et généré peu de résultats probants, notamment du fait de difficultés méthodologiques. Sur la base d'une revue exhaustive de la littérature, notre étude (1) précise les principaux caractères d'intérêt (synonyme de traits en écologie fonctionnelle) associés à la capacité de compétition des variétés et les corrélations existantes entre eux, (2) identifie les principales limites à l'évaluation de ces caractères, et (3) propose quelques pistes d'amélioration du schéma de sélection, en tenant compte de la notion d'idéotypes incluant ces caractères.

Mots-clés : adventices, compétition, céréales à paille, caractères variétaux, traits fonctionnels, schéma de sélection, revue bibliographique

Summary

Weed management is a major issue in straw cereals in order to transition the French agriculture towards agroecology. The choice of varieties with a high ability to outcompete weeds has been the subject of little investment and produced few convincing results, especially due to methodological difficulties. Based on an exhaustive review of the literature, our study (1) specifies the main characters of interest (synonym of traits in functional ecology) associated with the competitive capacity of varieties and the existing correlations between them, (2) identifies the main limits to the evaluation of these characters, and (3) suggests some ways to improve the breeding scheme, taking into account the notion of ideotypes including these characters.

Keywords: arable weeds, weed-crop competition, straw cereal, varietal characters, functional traits, breeding scheme, literature review

Introduction

La gestion des adventices constitue une problématique majeure en céréales à paille, la compétition induite pouvant engendrer des pertes de rendements importantes en l'absence de pratiques mises en œuvre pour les gérer (Cordeau *et al.*, 2016 ; Bonin & Vuillemin, 2017 ; Adeux *et al.*, 2019). Depuis le développement des premiers herbicides de synthèse, ce levier a été largement utilisé à travers le monde, permettant une gestion efficace et peu coûteuse des adventices. Cependant, le développement de résistances aux herbicides chez de nombreuses espèces adventices a mis en

avant la limite de la gestion de la flore adventice par désherbage chimique, ces résistances étant actuellement recensées chez plus de 260 espèces (Heap, 2022). 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 en raison des questionnements concernant la santé publique, l'environnement, ainsi que sa pertinence agronomique et socio-économique (van der Werf, 1996 ; Bourguet & Guillemaud, 2016). Une 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, aboutissant à des impasses techniques et à la sélection de résistances au sein des populations adventices liée à l'application répétée des mêmes programmes herbicides. Ce phénomène est à associer à la simplification des rotations qui s'opère dans les paysages agricoles depuis des décennies (Mignolet et al., 2012), ce dernier levier étant pourtant essentiel pour une gestion intégrée de la flore adventice (Weisberger et al., 2019). De plus, dans le but d'accélérer la transition agroécologique, les réglementations mises en place aux échelles nationales et européennes ont pour volonté de réduire l'usage des intrants de synthèse (plan Ecophyto II+, stratégie Pacte vert européen). Dans ce contexte, le choix de variétés ayant une capacité de compétition ou/et de tolérance plus élevée vis-à-vis des adventices constitue l'une des pistes permettant de réduire l'usage des herbicides tout en n'induisant pas de coût supplémentaire dans la gestion des adventices. Ce levier variétal, pour lequel peu d'investissements ont été consacrés et peu de résultats probants ont été obtenus jusqu'à présent comparativement à d'autres leviers de gestion de la flore adventice (ex. désherbages chimique et mécanique, rotations), nécessite l'identification de critères de sélection précis afin d'améliorer les variétés futures. Ces critères de sélection doivent être définis en lien étroit avec les systèmes de culture associés, et adaptés dans le cadre d'une gestion intégrée de la flore adventice afin de répondre aux différents enjeux selon les différents modes de conduite concernés.

La capacité de compétition d'une variété peut être déclinée en deux composantes : la compétitivité et la 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. La tolérance correspond à la capacité de la culture à limiter les pertes induites par la présence d'adventices, voire à maintenir le rendement de la variété (Goldberg, 1990 ; Lemerle et al., 2006 ; Zerner et al., 2016). D'importantes différences entre espèces cultivées ont été observées concernant la capacité de compétition vis-à-vis des adventices, avec généralement une compétitivité plus faible pour les légumineuses par rapport aux céréales (Lemerle et al., 1995 ; Beres et al., 2010). De plus, la compétitivité et la tolérance des variétés vis-à-vis des adventices apparaissent parfois corrélées positivement (Watson et al., 2006 ; Zerner et al., 2016), même si certains travaux ont montré une absence de corrélation entre ces deux composantes (Dhima et al., 2010 ; Mahajan et al., 2020). Compte tenu de cette incertitude, il semble préférable de distinguer ces deux composantes lors de l'étude de la compétition entre plantes cultivées et plantes adventices (Andrew et al., 2015). Même en absence de corrélation, ces composantes peuvent être affectées par un même caractère, ce dernier étant également à même d'influencer d'autres objectifs de sélection. Jusqu'à présent, il a été observé une plus grande variabilité inter-variétale pour la compétitivité que pour la tolérance (Zerner et al., 2016), aussi les méthodes de sélection se sont-elles davantage focalisées sur les caractères associés à la compétitivité qui, par ailleurs, conduit à réduire la banque de graines du sol et aura ainsi une influence favorable sur la flore adventice à plus long terme (Zerner et al., 2016).

L'amélioration de la compétitivité des variétés de céréales à paille nécessite de s'appuyer sur l'identification de caractères morphologiques et phénologiques pertinents (également qualifiés de traits en écologie fonctionnelle et agroécologie) dans le cadre d'un schéma de sélection. Les caractères d'intérêt devront notamment préférentiellement présenter une certaine stabilité dans des conditions environnementales diversifiées représentatives des régions agricoles concernées, une variabilité génotypique inter-variétale, et une indépendance ou une corrélation positive avec d'autres caractères d'intérêt déjà sous sélection. En l'absence de cette dernière spécificité, des

compromis entre caractères d'intérêt devront être recherchés par le sélectionneur. Par ailleurs, d'un point de vue pratique, il apparaît préférable de privilégier des caractères quantifiables au champ via des mesures rapides, peu sujettes aux biais de mesure et, autant que possible, partiellement ou totalement automatisables.

Cette étude a pour objectif d'identifier les différents caractères d'intérêt pouvant améliorer la capacité de compétition des variétés de céréales à paille en se basant sur une revue bibliographique des différents travaux réalisés jusqu'à présent, soit 45 publications retenues. Dans un premier temps, les principaux résultats portant sur les différents caractères d'intérêt identifiés dans la littérature scientifique seront présentés. Dans un second temps, les principales corrélations connues entre ces caractères seront précisées afin d'identifier les caractères potentiellement complémentaires. Dans un troisième temps, des propositions seront développées afin d'intégrer cet objectif d'amélioration de la capacité de compétition des variétés de céréales à paille dans de futurs schémas de sélection. Ces travaux s'intègrent au projet de recherche FSOV Q - Blé-Adventices-III (2021-2024) visant à améliorer la compétitivité des variétés de blé tendre vis-à-vis des adventices en agriculture biologique.

Caractères d'intérêt associés à la capacité de compétition des variétés de céréales à paille

L'étude de la capacité de compétition d'une variété de céréales à paille vis-à-vis des adventices s'est d'abord focalisée sur la hauteur en fin de cycle de la plante cultivée, ce caractère, considéré dans la plupart des études, étant généralement corrélé positivement à la compétitivité, conduisant à une réduction de la biomasse adventice (Huel & Hucl, 1996 ; Lemerle *et al.*, 1996 ; Korres & Froud-Williams, 2002 ; Zerner *et al.*, 2008 ; Fontaine *et al.*, 2009 ; Zerner *et al.*, 2016). Cependant, certains travaux n'ont pas observé de corrélation entre ce caractère et la biomasse adventice produite (Dhima *et al.*, 2010 ; Kucek *et al.*, 2021), la hauteur en fin de cycle n'affectant parfois que la tolérance de la variété à la compétition des plantes adventices (Fradgley *et al.*, 2017). La mesure de la hauteur, lorsqu'elle était réalisée à différents stades de la culture, a également permis de mettre en évidence une variabilité inter-variétale plus élevée en fin de cycle (Cosser *et al.*, 1997) ainsi qu'une faible influence de la variabilité environnementale, en particulier de la présence d'adventices, sur le classement en hauteur des variétés (Reid *et al.*, 2009). Généralement, plus la hauteur de la culture est mesurée tardivement durant le cycle cultural, plus elle est explicative de la réduction de biomasse adventice (Zerner *et al.*, 2008), même si certaines études n'observent pas cette tendance (Piliksere *et al.*, 2013). Ceci peut s'expliquer par le fait que la hauteur en fin de cycle est un substitut de la compétition pour la lumière dont l'intensité de compétition augmente à mesure que les plantes se développent (Adeux *et al.*, 2019). De plus, croître rapidement en hauteur semble également procurer un avantage compétitif important (Ogg & Seefeldt, 1999 ; Worthington *et al.*, 2015a). Cependant, la hauteur en fin de cycle présente une variabilité inter-variétale relativement réduite parmi les variétés de blé tendre disponibles, étant dépendante de la présence de gènes de nanisme à effet majeur sur ce caractère (Coleman *et al.*, 2001 ; Lazzaro *et al.*, 2019) dans la plupart des génotypes depuis les années 1980 (Trottet & Doussinault, 2002).

Différentes mesures ont été proposées afin d'approximer la vigueur des variétés en début de cycle, portant sur différents caractères, tels que la vitesse d'émergence et de croissance de la plantule, la hauteur au tallage et en début de phase de redressement, la surface foliaire, la couverture du sol et la biomasse de la culture à différents stades phénologiques en début de cycle. Une vigueur élevée en début de cycle semble permettre d'améliorer la compétitivité des variétés et ainsi réduire la biomasse adventice produite au cours du cycle cultural, présentant par ailleurs une variabilité inter-variétale élevée (Huel & Hucl, 1996 ; Lemerle *et al.*, 1996 ; Acciaresi *et al.*, 2001 ; Coleman *et al.*, 2001 ; Bertholdsson, 2005 ; Piliksere *et al.*, 2013 ; Benaragama *et al.*, 2014 ; Worthington *et al.*, 2015a ; Zerner *et al.*, 2016 ; Fradgley *et al.*, 2017 ; Shabi *et al.*, 2018 ; Mwenda *et al.*, 2020 ; Kucek *et al.*, 2021). De plus, la tolérance des variétés de blé tendre vis-à-vis des adventices semble également être améliorée en cas de vigueur élevée en début de cycle (Zerner *et al.*, 2016 ; Kucek *et al.*, 2021). 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 (Huel & Hucl, 1996 ; Lemerle *et al.*, 1996 ; Worthington *et al.*, 2015a ; Zerner *et al.*, 2016 ; Mwenda *et al.*, 2020 ; Kucek *et al.*, 2021).

La capacité de tallage est également un caractère régulièrement mis en avant pour améliorer la compétitivité des variétés de blé, d'orge et d'avoine. En effet, une capacité de tallage élevée, se traduisant en partie par un nombre important de talles productives, semble réduire la production de biomasse adventice (Lemerle *et al.*, 1996 ; Coleman *et al.*, 2001 ; Korres & Froud-Williams, 2002 ; Piliksere *et al.*, 2013 ; Fradgley *et al.*, 2017). Cependant, d'autres résultats ne confirment pas cette tendance (Huel & Hucl, 1996 ; Didon & Boström, 2003 ; Feledyn-Szewczyk 2013). Une forte variabilité de l'effet de la capacité de tallage a été observée en fonction des conditions environnementales, en particulier la présence et la densité d'adventices, ce qui pourrait en partie expliquer les résultats contrastés pour ce caractère (Huel & Hucl, 1996 ; Mason *et al.*, 2007 ; Dhima *et al.*, 2010).

Les caractéristiques foliaires des étages de la canopée situés le plus haut à partir du stade épiaison, incluant le port foliaire et la surface foliaire, semblent également fortement affecter le niveau de compétitivité du blé et du triticale vis-à-vis des adventices. Les génotypes caractérisés par une surface foliaire importante et un port semi-érigé à horizontal semblent notamment présenter une meilleure compétitivité vis-à-vis des adventices par rapport aux génotypes présentant une surface foliaire plus faible et des feuilles érigées (Huel & Hucl, 1996 ; Lemerle *et al.*, 1996 ; Fontaine *et al.*, 2009, Bogale *et al.*, 2011). De plus, la longueur de la feuille drapeau (Huel & Hucl, 1996 ; Lemerle *et al.*, 1996) ainsi que son port foliaire (Huel & Hucl, 1996) semblent affecter la compétitivité ou/et la tolérance des variétés vis-à-vis des adventices. De fait, ces caractéristiques foliaires influencent la couverture du sol et l'interception lumineuse, présentant un intérêt tout au long du cycle de développement des céréales à paille dans le cadre d'itinéraires techniques ne s'appuyant que peu ou pas sur le travail du sol et le désherbage mécanique. Différents travaux ont ainsi mis en évidence l'importance d'une couverture du sol élevée afin de réduire la biomasse adventice produite (Huel & Hucl, 1996 ; Coleman *et al.*, 2001 ; Drews *et al.*, 2009), ceci s'expliquant par l'augmentation de l'interception lumineuse par la canopée de la plante cultivée conduisant à réduire la croissance des adventices (Didon & Böstrom, 2003 ; Drews *et al.*, 2009). L'efficacité de l'absorption du rayonnement lumineux est fonction des propriétés géométriques de la culture et de son indice foliaire (LAI, *Leaf Area Index en anglais*), ce dernier traduisant la surface cumulée ou densité de feuilles par unité de surface au sol. Cette efficacité sera ainsi plus importante pour une culture ayant une accumulation foliaire élevée à un stade donné et un port foliaire horizontal. Ces éléments apparaissent cohérents avec les résultats indiquant l'importance d'un LAI élevé lors de l'élongation de la tige comme caractère permettant d'améliorer la compétitivité des variétés de céréales à paille vis-à-vis des adventices (Coleman *et al.*, 2001 ; Worthington *et al.*, 2015a ; Lazzaro *et al.*, 2018).

Au-delà des caractères architecturaux, la phénologie du génotype, c.à.d. le degré de précocité ou de tardiveté à différents stades phénologiques de la plante, constitue également un caractère clé affectant le degré de compétitivité d'un génotype. Une date d'épiaison plus précoce (Mason *et al.*, 2008 ; Piliksere *et al.*, 2013 ; Zerner *et al.*, 2016) ou de maturité plus précoce (Huel & Hucl, 1996 ; Bertholdsson, 2005 ; Mason *et al.*, 2007 ; Reid *et al.*, 2009 ; Piliksere *et al.*, 2013) semble ainsi plus fréquemment réduire la biomasse adventice, même si certaines études ont mis en évidence une meilleure compétitivité des génotypes tardifs (Coleman *et al.*, 2001).

Les caractères racinaires, non étudiés jusqu'à présent du fait de difficultés de mesure, peuvent également avoir une influence sur la capacité de compétition des espèces de céréales à paille vis-à-vis des adventices. Dans les systèmes bas intrants et en agriculture biologique, les plantes sont davantage soumises à des carences en certains nutriments, rendant intéressante la sélection de variétés plus compétitives au niveau racinaire. L'amélioration variétale depuis plus d'un siècle a cependant conduit à réduire la profondeur d'enracinement des variétés de blé tendre dans des conditions non limitantes en eau (Friedli *et al.*, 2019).

En complément des précédents caractères portant sur la compétition, plusieurs travaux ont porté sur le mécanisme d'allélopathie comme levier de réduction de la biomasse adventice. L'allélopathie,

dans notre cas d'étude, peut être définie comme l'ensemble des effets directs et indirects d'une plante sur la survie, la croissance et la reproduction d'une autre plante via la libération de composés allélochimiques, c.à.d. de métabolites secondaires, dans l'environnement (Zeng, 2014). Cette régulation, fréquemment évaluée en conditions contrôlées en laboratoire sur une espèce modèle présente une variabilité inter-variétale élevée (Wu *et al.*, 2000 ; Bertholdsson, 2005 ; Bertholdsson, 2011 ; Worthington *et al.*, 2015b), et apparaît influencer la biomasse adventice produite dans ces conditions. Jusqu'à présent, peu d'études ont étudié les corrélations entre la capacité allélopathique d'un génotype et les autres caractères associés à sa compétitivité ou/et tolérance vis-à-vis des adventices, et les résultats s'avèrent contrastés (Bertholdsson, 2005 ; Worthington *et al.* 2015b). Par ailleurs, seules de rares études ont été réalisées jusqu'à présent au champ du fait de la difficulté de mise en œuvre de l'évaluation du mécanisme d'allélopathie dans ces conditions (Bertholdsson, 2010 ; Reiss *et al.*, 2018a, b). Il apparaît en effet très difficile de décorrélérer les effets des composés allélochimiques produits des autres effets liés à la compétitivité des génotypes sur la production de biomasse adventice (Worthington & Reberg-Horton, 2013 ; voir Mahé *et al.*, 2022 pour des propositions afin d'évaluer de manière adaptée la capacité allélopathique d'un génotype au champ).

Enfin, contrairement aux caractères ou groupes de caractères présentés ci-dessus, correspondant à la définition d'un trait fonctionnel en écologie et agroécologie, la biomasse végétative de la culture est l'équivalent d'un trait de performance, c.à.d. la résultante d'un ensemble de caractères (Violle *et al.*, 2007). 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 (Mwenda *et al.*, 2020). Ce caractère synthétisant la performance de la variété semble être important en fin de cycle (Feledyn-Szewczyk, 2013 ; Feledyn-Szewczyk *et al.*, 2013 ; Feledyn-Szewczyk & Jonczyk, 2015), mais aussi lors de l'élongation de la tige (Lazzaro *et al.*, 2018).

Corrélations entre les caractères

Les principales corrélations entre caractères ou groupes de caractères ont été recherchées dans les études du corpus bibliographique ayant permis de réaliser cette revue. Ces informations sont disponibles sur la base d'une évaluation statistique uniquement dans 25 % des publications concernées. Nous avons classé les résultats par groupes de caractères, et avons distingué les corrélations positives, négatives et l'absence de corrélation, c.à.d. une relative indépendance statistique entre les caractères, entre ces groupes, la synthèse étant présentée dans la Figure 1. L'étude des corrélations entre caractères ou groupes de caractères apparaît particulièrement importante dans un objectif d'amélioration variétale, permettant de faire évoluer les schémas de sélection des espèces cultivées considérées, notamment afin d'intégrer l'ensemble des caractères pertinents associés à la compétitivité ou/et la tolérance des variétés de céréales à paille vis-à-vis des adventices.

Selon les caractères considérés pour décrire la vigueur en début de cycle, il semble y avoir une corrélation négative avec la capacité de tallage ou une absence de corrélation (Lazzaro *et al.*, 2018). En effet, une hauteur élevée en début et milieu de cycle cultural semble corrélée négativement avec la capacité de tallage (Lazzaro *et al.*, 2018), indiquant qu'une initiation précoce de l'élongation de la tige aurait pour conséquence potentielle d'arrêter le tallage en mobilisant les assimilats vers d'autres organes sources. Par ailleurs, la biomasse en début de cycle semble être indépendante du nombre de talles produites. La vigueur en début de cycle semblerait corrélée positivement avec la surface foliaire en milieu de cycle, évaluée via la mesure du LAI (Murphy *et al.*, 2008 ; Lazzaro *et al.*, 2018). Cette corrélation suppose qu'un développement foliaire rapide et important aux stades précoces favoriserait un LAI élevé lors des stades plus tardifs de la culture. Par ailleurs, un LAI élevé au stade précoce, aurait pour conséquence d'augmenter la vitesse d'élongation de la tige, ainsi que la biomasse produite.

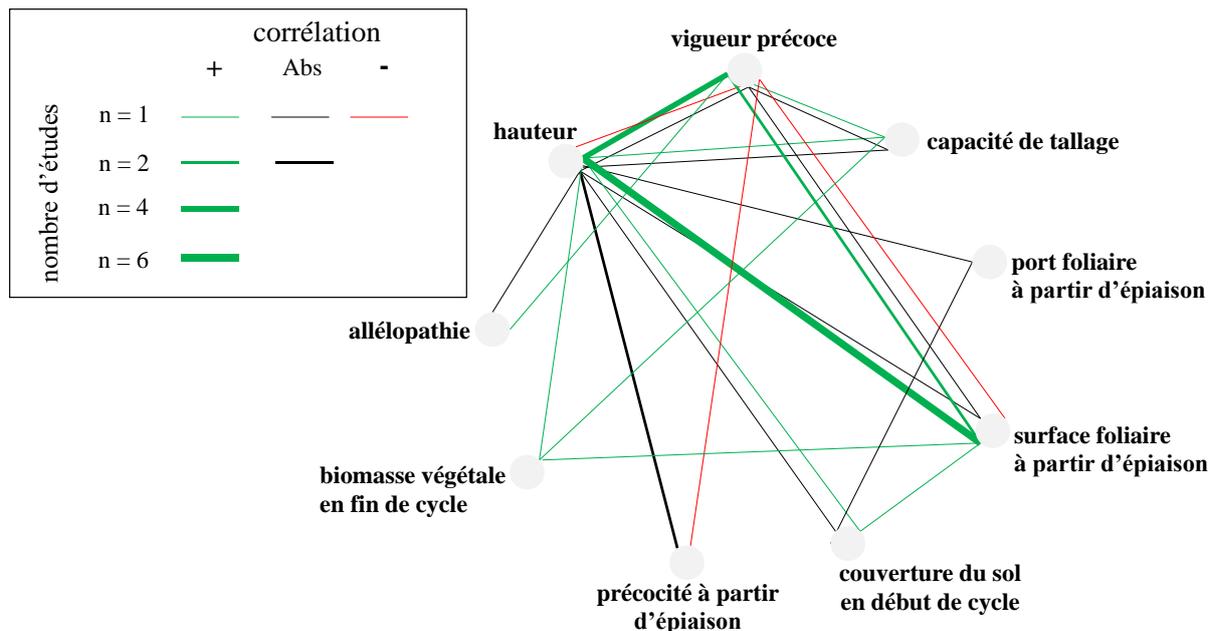


Figure 1 : Nombre de publications indiquant le degré de corrélation entre les caractères d'intérêt permettant potentiellement d'améliorer la compétitivité des variétés de céréales à paille. Les résultats sont synthétisés en distinguant les corrélations positives (+), négatives (-) ou l'absence de corrélation (Abs) sur la base des informations et de l'interprétation fournie par les auteurs des différentes études. Ce choix a été retenu car les différents tests de corrélations utilisés ne sont pas directement comparables entre études (méthodes retenues, nombre de valeurs, tests statistique évaluant le niveau de significativité).

La hauteur en fin de cycle semble être corrélée positivement à la vigueur en début de cycle (Murphy *et al.*, 2008 ; Bertholdsson, 2011 ; Benaragama *et al.*, 2014 ; Zerner *et al.*, 2016). Cependant, cette corrélation positive n'a pas été observée dans l'ensemble des travaux (Wicks *et al.*, 2004 ; Lazzaro *et al.*, 2018). De récents travaux d'Aharon *et al.* (2021) mettent en évidence qu'il est possible de développer des génotypes courts présentant cependant une vigueur précoce élevée. Concernant la capacité de tallage, la corrélation avec la hauteur en fin de cycle ne semble pas certaine, des corrélations positives ou une absence de corrélation étant observées selon les études (Feledyn-Szewczyk & Jonczyk, 2015 ; Lazzaro *et al.*, 2018). Par ailleurs, contrairement à la hauteur au stade végétatif, la hauteur en fin de cycle varie peu, les variétés conservant généralement leurs classements relatifs (Reid *et al.*, 2009). En effet, cette hauteur est souvent dépendante de la présence de gènes de nanisme (Coleman *et al.*, 2001 ; Lazzaro *et al.*, 2019). La hauteur en fin de cycle semble corrélée positivement à la surface foliaire (Benaragama *et al.*, 2014 ; Lazzaro *et al.*, 2018), et une relation importante a été observée entre la mesure dynamique de la hauteur (à partir de l'élongation de la tige jusqu'à la fin du cycle cultural) et la mesure de l'indice foliaire (LAI) au stade épiaison (Rasmussen *et al.*, 2004 ; Vlasek *et al.*, 2016 ; Fradgley *et al.*, 2017 ; Lazzaro *et al.*, 2018). Cette relation reflète de nouveau l'importance du mécanisme d'interception lumineuse par la culture au cours du temps, influençant sa dynamique de développement et sa compétitivité vis-à-vis des adventices. En effet, un indice foliaire élevé permet d'améliorer l'efficacité de l'interception lumineuse, ayant pour conséquence d'augmenter la biomasse de la culture tout en améliorant la couverture du sol et la capacité d'ombrage des adventices par les plantes cultivées (Didon & Boström, 2003). Cependant, certains travaux n'ont pas mis en évidence de relation entre la hauteur et la couverture végétale (Fontaine *et al.*, 2009), contrairement à la biomasse à maturité qui est liée à la hauteur en fin de cycle (Feledyn-Szewczyk & Jonczyk, 2015). Cette dernière relation semble s'expliquer notamment par le fait qu'une variété plus haute aura tendance à produire davantage

de biomasse afin d'atteindre sa hauteur en fin de cycle via un investissement plus important de ressources dans la production de tissus de support (paille de la tige et col de l'épi).

Par ailleurs, la phénologie ainsi que le port foliaire à partir du stade épiaison, dont les corrélations ont été moins étudiées que pour les précédents caractères, semblent être relativement indépendants des caractères portant sur la croissance et l'architecture générale de la plante. En effet, aucune relation significative n'a été identifiée entre le port foliaire de la feuille drapeau et la couverture du sol en début de cycle, ni avec la mesure dynamique de la hauteur au cours du cycle cultural (Vlasek *et al.*, 2016). La phénologie semble également être indépendante de la mesure dynamique de la hauteur.

Lien entre les caractères d'intérêt et le rendement

Bien que la plupart des études portant sur la compétitivité ou/et la tolérance des variétés de céréales à paille vis-à-vis des adventices s'intéressent également au rendement des variétés, il n'apparaît pas exister de relation claire entre le rendement en absence d'adventices et la compétitivité ou/et de tolérance vis-à-vis des adventices (Christensen *et al.*, 1995 ; Huel & Hucl, 1996 ; Coleman *et al.*, 2001 ; Didon & Boström, 2003 ; Hoad *et al.*, 2008 ; Benaragama *et al.*, 2014 ; Mahajan *et al.*, 2020). Cette absence de relation suggère qu'il devrait être possible pour les sélectionneurs de maintenir un rendement élevé en absence d'adventices tout en améliorant la capacité de compétition des variétés de céréales à paille vis-à-vis des adventices en cas de densité d'adventices élevée (Christensen *et al.*, 1995 ; Didon & Boström, 2003 ; Dhima *et al.*, 2010 ; Bertholdsson, 2011 ; Benaragama *et al.*, 2014).

Discussion

Limites et pistes d'amélioration de l'évaluation des caractères

Cette revue bibliographique comprenant 45 publications a permis d'identifier des caractères pouvant être impliqués dans la compétitivité ou/et la tolérance des variétés de céréales à paille vis-à-vis des adventices. Cependant, l'approche n'est pas exempte de limites. Ainsi, parmi le corpus de publications retenues, les caractères étudiés, les méthodes de caractérisation et les stades phénologiques retenus pour conduire les mesures varient suivant les études et seul un faible nombre de caractères est généralement évalué dans chaque publication. Seuls certains caractères comme la hauteur en fin de cycle et la vigueur précoce ont été largement étudiés jusqu'à présent. Concernant la vigueur précoce, ni sa définition ni la manière de la quantifier n'a fait l'objet d'une standardisation. Elle a par exemple été évaluée en mesurant une biomasse durant le stade tallage (Didon & Boström, 2003 ; Drews *et al.*, 2009 ; Dhima *et al.*, 2010), un indice de végétation (Bertholdsson, 2011), une mesure de la surface foliaire au stade plantule à l'échelle de la plante (Benaragama *et al.*, 2014), une notation visuelle ou une mesure de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index en anglais* ; Zerner *et al.*, 2016). Ces différences de protocoles entre études rendent toute généralisation de l'importance de la vigueur précoce plus délicate, ainsi que son intégration dans un schéma de sélection, à moins qu'il soit possible de mettre au point une méthodologie standardisée de sa mesure en se basant sur une définition claire de la vigueur précoce ou des composantes la constituant. Afin d'améliorer la compétitivité des génotypes de céréales à paille vis-à-vis des adventices aux stades précoces, nous suggérons que des mesures non destructrices des plantes intégrant la dynamique de hauteur, la couverture du sol et la phénologie sembleraient constituer un minimum pour évaluer la vigueur précoce. Des mesures de port foliaire, de NDVI et de biomasse pourraient être réalisées en absence de corrélation importante avec les caractères précédemment cités.

Au-delà de la variabilité portant sur les protocoles de mesure, le nombre de génotypes évalués dans les publications est régulièrement réduit, seules 14 études parmi celles retenues dans le corpus de publications présentant plus de 20 génotypes. La variabilité génétique explorée apparaît

également différente selon l'étude considérée, d'une part du fait de l'origine des génotypes (des variétés récentes ou anciennes au sein d'un panel plus ou moins diversifié, des lignées pouvant présenter les mêmes géniteurs ou des géniteurs variés), et d'autre part du fait de la variabilité des caractères entre les génotypes (des génotypes choisis sur la base d'un gradient de compétitivité potentielle ou sans prendre en compte ce critère, de précocité à épiaison ou sans prendre en compte ce caractère).

Pour la majorité des caractères, une variabilité intra-variétale est constatée entre conditions environnementales, avec parfois une variation importante de la relation entre les caractères d'intérêt et leur effet sur le niveau de compétitivité des variétés selon ces conditions. Ces résultats suggèrent que le niveau de compétitivité n'est pas équivalent dans tous les environnements étudiés (Worthington *et al.*, 2015a). Malgré l'importance de ce facteur, chaque étude ne porte généralement que sur un petit nombre d'environnements. Ainsi, près de la moitié des publications retenues ont été réalisées en se basant sur un ou deux environnements, par exemple un site expérimental deux années consécutives. De plus, de nombreuses publications révèlent la présence d'interactions, parfois très élevées, entre les génotypes et l'environnement (Lemerle *et al.*, 2001). Ces différents constats conduisent à interpréter avec précaution les résultats obtenus pour des caractères moins étudiés, en particulier lorsqu'une tendance est difficilement décelable entre publications. Des études complémentaires s'avèrent dès lors nécessaires afin de s'assurer de la pertinence d'inclure ou de rejeter du schéma de sélection des caractères tels que la capacité de tallage, les caractères racinaires ou la capacité allélopathique des génotypes.

Evaluation des variétés

La méthode d'évaluation de la compétitivité ou/et de la tolérance est également très variable selon les adventices ou les assemblages d'espèces d'adventices considérés, ainsi que selon les protocoles expérimentaux mis en place pour réaliser cette évaluation.

Dans la majorité des publications retenues, l'espèce cultivée entre en compétition avec la flore adventice spontanée du site. Cependant, le nombre d'espèces, les caractéristiques de celles-ci, mais également les densités de levée, sont dépendantes de chaque contexte environnemental local, ceci pouvant conduire à une hétérogénéité marquée même à échelle fine au sein d'un dispositif suivant par ailleurs un design expérimental statistiquement adapté aux méthodes de sélection.

Dans les autres travaux publiés, le semis d'une seule espèce adventice est généralement réalisé, mais cette espèce et sa densité de semis varient entre études. Cette seconde méthode présente cependant l'avantage de mieux maîtriser la densité d'adventices à la levée afin d'évaluer plus précisément la capacité de compétition, et permet également d'évaluer la tolérance variétale. Cependant, l'espèce adventice retenue peut influencer les relations observées entre certains caractères et la compétitivité des variétés. Concernant la corrélation entre les caractères d'intérêt, peu de travaux ont finalement étudié ces corrélations parmi l'ensemble des études réalisées, les caractères diffèrent souvent entre les publications, et le nombre de caractères étudiés est plutôt réduit.

Compte tenu des différentes limites évoquées ci-dessus, il semble important que les futurs programmes de recherches prennent en compte différentes pistes d'amélioration pour évaluer la compétitivité ou/et la tolérance vis-à-vis des adventices. Tout d'abord, il semble important de bien définir les caractères mesurés, les méthodes de mesure et le ou les stades d'évaluation, c.à.d. d'obtenir une harmonisation des protocoles de mesures. Il est également préférable de privilégier un semis d'adventice d'une adventice considérée comme compétitive et problématique dans le contexte d'évaluation plutôt que de conduire l'évaluation en étudiant la réponse des génotypes de céréales à paille vis-à-vis de la flore spontanée de la parcelle, cela afin de limiter l'effet d'hétérogénéité de compétition associé à l'hétérogénéité de densité et de date de levée de cette flore. Ensuite, il apparaît important d'évaluer un grand nombre de génotypes, dans de nombreux environnements durant plusieurs années afin d'augmenter le nombre de répétitions et la robustesse des résultats obtenus. Enfin, il semble nécessaire de tenir compte de la dynamique des

caractères mesurés au cours du cycle cultural et d'évaluer systématiquement les corrélations entre les différents caractères mesurés lors d'une même expérimentation pour améliorer nos connaissances sur ce point.

Constats généraux et pistes d'amélioration du schéma de sélection

La composante à privilégier en sélection à ce stade de nos connaissances apparaît être la compétitivité, celle-ci présentant à la fois une plus grande variabilité génotypique et une plus grande stabilité par rapport à la tolérance variétale vis-à-vis des adventices (Zerner *et al.*, 2016). De même, la compétitivité semble être à privilégier relativement à l'allélopathie du fait d'une absence d'effet observé au champ jusqu'à présent (Worthington *et al.*, 2015b) et du fait d'une importante corrélation négative observée entre la capacité allélopathique d'un génotype sélectionné dans cet objectif et son rendement (Bertholdsson, 2010). Si de premiers travaux visent à évaluer la capacité allélopathique au champ (Reiss *et al.*, 2018a, b), d'importantes recherches semblent encore nécessaires afin d'obtenir une méthodologie accessible au sélectionneur (Mahé *et al.*, 2022). Le niveau de compétitivité des variétés de céréales à paille vis-à-vis des adventices apparaît dépendant de multiples caractères, tels qu'une vigueur précoce, la hauteur en fin de cycle, mais aussi l'architecture foliaire qui affectera la couverture du sol et la capacité d'interception lumineuse de la culture au cours de sa dynamique de croissance, et la précocité de la variété. Si les corrélations statistiques simples entre ces groupes de caractères ont été évaluées dans des travaux publiés jusqu'à présent, les corrélations indirectes et les relations de causalité sous-jacentes n'ont que peu été considérées (Ogg & Seefeldt, 1999 ; Fradgley *et al.*, 2017). Pourtant, les études démontrent l'importance d'une compréhension précise de ces relations afin de s'assurer que les caractères retenus dans le schéma de sélection sont les plus pertinents, plutôt que de sélectionner des substituts de ces caractères d'intérêt, potentiellement moins à même d'évaluer les mécanismes en jeu. A titre d'exemple, il est possible de se questionner sur la pertinence de la hauteur en fin de cycle comme unique mesure de hauteur, notamment en comparaison à des mesures répétées de ce caractère à différentes dates du cycle cultural (Christensen, 1995 ; Cosser *et al.*, 1997 ; Worthington *et al.*, 2015a).

Nous proposons de distinguer deux ensembles de caractères durant le cycle cultural : (1) les caractères pré-épiaison, évalués entre l'émergence de la culture et le début de l'épiaison, et (2) les caractères post-épiaison, évalués à partir de l'épiaison et jusqu'à la fin du cycle cultural. Les caractères pré-épiaison semblent affecter davantage la compétitivité du génotype en comparaison des caractères post-épiaison, tels que la hauteur en fin de cycle. En effet, une culture ayant une vigueur élevée en début de cycle, caractérisée notamment par une hauteur élevée et une surface foliaire élevée, présentera une meilleure capacité d'interception lumineuse se traduisant par une augmentation de sa biomasse et une couverture du sol plus importante, limitant ainsi la lumière disponible pour les adventices et leur développement ultérieur. Durant la période pré-épiaison, une mesure dynamique de ces caractères apparaît pertinente, la vitesse de croissance de la culture affectant le développement des adventices constituant une estimation appropriée de la compétitivité de la culture. Des corrélations entre ces caractères pré-épiaison existent probablement, aussi est-il important d'identifier et d'interpréter les relations de causalité liées aux processus écophysologiques en jeu durant cette période, mais également la présence de corrélations indirectes pouvant être liées à la méthodologie expérimentale mise en place. Concernant la capacité de tallage, les résultats sont contrastés du fait d'importants effets environnementaux affectant ce caractère, l'un des facteurs étant la densité d'adventices (Dhima *et al.*, 2010). Ces résultats contrastés justifient davantage de travaux avant l'intégration de ce caractère dans un schéma de sélection. Certains caractères post-épiaison, tels que la précocité à floraison et maturité, ainsi que le port foliaire à partir du stade épiaison, semblent être d'utiles compléments pour améliorer la compétitivité des variétés. Les travaux sur ces caractères nécessitent cependant d'être poursuivis du fait du peu d'études disponibles.

Au-delà des considérations écophysiologicals et statistiques, en se plaçant du point de vue du sélectionneur, il apparaît certaines incompatibilités entre les différents objectifs de sélection visés pour un même caractère, par exemple la hauteur en fin de cycle. En effet, une variété haute en fin de cycle ne constitue en général pas un objectif de sélection, en particulier pour l'agriculture conventionnelle, les géotypes hauts étant souvent associés à une diminution de l'indice de récolte et un risque accru de verse (Lemerle *et al.*, 1996 ; Coleman *et al.*, 2001 ; Benaragama *et al.*, 2014 ; Zerner *et al.*, 2016 ; Lazzaro *et al.*, 2018). Afin d'améliorer la compétitivité des variétés de céréales à paille dans un schéma de sélection, il apparaît ainsi nécessaire de prendre en compte plusieurs caractères complémentaires, dont les objectifs peuvent apparaître contradictoires, avant de prioriser les objectifs de sélection. Ainsi, en l'état de nos connaissances, il semble préférable d'orienter la sélection pour obtenir des variétés présentant une vigueur plus élevée en début de cycle et certaines caractéristiques foliaires permettant une couverture optimale jusqu'à floraison plutôt que de sélectionner pour une hauteur élevée en fin de cycle afin d'améliorer la compétitivité des variétés de céréales à paille vis-à-vis des adventices pour le mode de conduite conventionnel (Lemerle *et al.*, 1996).

L'évaluation des caractères pré-épaison, tels que la couverture du sol, la surface foliaire ou la biomasse de la culture par exemple, pourrait être automatisée jusqu'au stade de fin de tallage via des méthodes d'analyses d'images, permettant de limiter les contraintes portant sur le schéma de sélection. Durant cette période, une mesure automatisée permettrait d'identifier la proportion de surface de la micro-parcelle correspondant à la culture, et de distinguer cette dernière des adventices et du sol nu avec une relative fiabilité, les causes affectant la coloration du feuillage à ces stades étant peu fréquentes, liées essentiellement à des dégâts de gel et des attaques précoces de bioagresseurs (taupins, rouille jaune). En effet, de récents progrès en analyse d'images permettent une évaluation plus précise de ces différentes proportions en début de cycle (Louargant *et al.*, 2018 ; Aharon *et al.*, 2020), bien que la reproductibilité des résultats varie selon les conditions de prise de vue en cas d'usage de drone (Svensgaard *et al.*, 2019). Pour les stades post-tallage, il semble préférable de privilégier une notation visuelle, les méthodes de mesure étant plus difficilement automatisable du fait de biais potentiellement plus importants d'évaluation de la couverture du sol par la culture. Par ailleurs, une sélection indirecte de certains caractères dans un environnement sans adventice semble efficace (Bertholdsson, 2011), cette l'héritabilité étant comparable à l'héritabilité observée en présence d'adventices (Reid *et al.*, 2009). Ces résultats suggèrent qu'il ne serait pas nécessaire d'ajouter de contrainte supplémentaire au schéma de sélection afin d'améliorer la compétitivité des variétés de céréales à paille vis-à-vis des adventices, contrainte incluant un semis d'adventices conduisant notamment à doubler la quantité de grains et les surfaces d'expérimentation, ce qui apparaît rédhibitoire en sélection, particulièrement à des stades peu avancés du schéma de sélection. De plus, certains travaux ont mis en évidence l'intérêt de combiner plusieurs caractères simples permettant d'évaluer la compétitivité (Hoad *et al.*, 2008) ou la tolérance (Lemerle *et al.*, 2006) par une note globale et synthétique. Cependant, dans le cas où ces caractères sont indépendants d'un point de vue statistique, cette note globale ne pourra aucunement évaluer la compétitivité de manière aussi prédictive qu'une combinaison de caractères mesurés séparément. Sur la base des connaissances actuelles, deux hypothèses peuvent être mises en avant afin d'intégrer la compétitivité dans l'évaluation des futures variétés, (1) l'évaluation de caractères identifiés comme associés à la compétitivité dans un dispositif préexistant en absence d'adventice, (2) l'évaluation de géotypes comparés à des témoins caractérisés au préalable pour leur niveau de compétitivité en présence d'une flore spontanée d'adventices dans des sites d'évaluation complémentaires par rapport au réseau actuel. Ces deux hypothèses doivent cependant faire l'objet d'études détaillées.

A la recherche d'idéotypes adaptés à la diversité des itinéraires techniques

Face à l'augmentation des objectifs de sélection (ex. tolérance à la sécheresse, tolérance à une réduction des intrants azotés, compétitivité accrue vis-à-vis des adventices), notamment dans un

contexte de changement global (Gouleau *et al.*, 2021), la sélection variétale est confrontée à un défi important puisqu'une partie de ces objectifs dépendent des systèmes de cultures et des filières de valorisation considérés (Gauffreteau, 2018). De récents travaux ont visé à identifier les caractères d'intérêt et les fonctions associées à ces caractères afin d'améliorer la gestion des adventices dans des modes de conduite agroécologiques, mais également à souligner les incompatibilités possibles entre le choix de certains caractères et l'itinéraire technique ou le système de culture retenu (Audergon *et al.*, 2022). Ces éléments doivent, autant que possible, être pris en compte par le sélectionneur afin de répondre aux besoins des multiples acteurs de l'aval des filières, mais rendent la sélection d'autant plus délicate, multipliant les incompatibilités entre les objectifs de sélection et les autres leviers disponibles pour la gestion des adventices, et nécessitant la sélection d'un plus grand nombre de géotypes présentant des combinaisons de caractères variés.

Afin d'améliorer l'efficacité de la sélection, Donald (1968) avait proposé de baser les objectifs de sélection sur la notion d'idéotype, traduisant l'idée que le sélectionneur se fait de la plante à sélectionner pour un environnement donné pour répondre à des objectifs précis (Zeven, 1975). Défini en amont de la sélection et constitué d'une combinaison de caractères physiologiques et morphologiques, l'idéotype doit permettre une réponse prévisible du géotype dans un environnement donné. A titre d'exemple, l'idéotype longtemps recherché en blé tendre était orienté vers un objectif de sélection de géotypes courts, ayant une faible capacité de tallage, avec un port érigé ainsi que des petites feuilles, afin de maximiser le rendement (via l'indice de récolte) et la qualité en conditions de ressources non limitantes, c.à.d. une conduite équivalente au mode conventionnel intensif de l'époque (Donald, 1968). Cet idéotype, ayant conduit à un type variétal largement généralisé, ne permet cependant pas d'obtenir une forte compétitivité vis-à-vis des adventices. En effet, cet idéotype visait à réduire au maximum la compétition entre plantes (de l'espèce cultivée au sein du peuplement) pour les ressources, notamment pour la ressource lumineuse. L'objectif d'amélioration de la compétitivité apparaît même contradictoire avec l'objectif visé d'optimisation du rendement. Cependant, l'amélioration de la compétitivité semble être liée, au moins en partie, à des caractères mesurés précocement, jusqu'au stade 2 nœuds en blé tendre. Le mécanisme de compétition se déroulant durant une large part du cycle cultural des céréales à paille, et se déterminant précocement, pourrait donc être optimisé à des stades relativement précoces de la culture. Il apparaît donc important de déterminer, pour chaque objectif de sélection, les caractères d'intérêt les plus pertinents, le ou les stade(s) clé(s) pouvant permettre un compromis entre les différents objectifs, et enfin d'intégrer les caractères dans un modèle unique permettant de différencier les corrélations existantes entre ces objectifs et d'identifier les éventuelles combinaisons optimales de caractères (Gauffreteau, 2018).

Il semble préférable de définir différents idéotypes selon le mode de conduite et de production, combinant à la fois une amélioration plus ou moins importante de la compétitivité et du rendement, ou d'autres critères (Worthington & Reberg-Horton, 2013). Nous proposons quelques exemples par la suite. En agriculture biologique, plusieurs idéotypes peuvent être définis en fonction des pratiques culturales, mais également selon la valorisation de la culture, c.à.d. pour l'élevage ou en culture de vente. Ainsi, pour les exploitations agricoles en polyculture-élevage, notamment en agriculture biologique, l'objectif de production de céréales à paille est de maximiser à la fois le rendement en grains et la production de paille, tout en limitant les interventions durant le cycle cultural afin de réduire le temps de travail et les coûts de production. Un idéotype variétal possible correspondrait à un géotype haut, avec un pouvoir couvrant dès les stades précoces et tout au long du cycle cultural. Pour les exploitations spécialisées de grandes cultures en agriculture biologique, l'objectif sera focalisé sur le rendement en grains, avec des critères de qualité différents selon la valorisation du produit. Un idéotype possible serait plus court, afin d'augmenter l'indice de récolte et permettre l'écimage des adventices problématiques comme le vulpin des champs et la folle-avoine, une couverture du sol élevée sera recherchée en début de cycle cultural uniquement, car à partir de l'élongation de la tige, un port plus érigé permettra de faciliter d'éventuelles interventions de désherbage mécanique (Rasmussen *et al.* 2004). Une précocité en termes d'épiaison est attendue, avec une maturité plus tardive, afin d'augmenter la période de remplissage

du grain. Un autre idéotype pourrait également être visé par les exploitations spécialisées en grandes cultures en agriculture biologique ayant la volonté de limiter les interventions mécaniques au cours du cycle cultural, afin de diminuer le coût de production. Cet idéotype serait également caractérisé par un type variétal plutôt court, mais une couverture du sol élevée jusqu'à épiaison, et une précocité aux stades tallage, épi 1cm, 2 nœuds et épiaison afin de limiter la croissance des adventices tout en réduisant le nombre d'interventions mécaniques. En agriculture conventionnelle, à la différence de beaucoup de systèmes de culture en agriculture biologique, la disponibilité en ressources azotées sera a priori non limitante, aussi l'idéotype visera à capter les ressources disponibles en début de cycle. Un génotype très couvrant en début de cycle limitant l'interception de la lumière disponible pour la croissance des adventices aura alors pour conséquence de réduire la quantité d'azote prélevée par ces dernières.

Conclusion

En conclusion, il est important de définir un schéma de sélection différent pour chaque idéotype visé, les objectifs variant, les caractères et les stades de sélection associés à ces caractères varieront également. Afin d'améliorer la compétitivité des variétés de blé tendre vis-à-vis des adventices, il apparaît ainsi important d'adapter les schémas de sélection actuels qui, pour la plupart, n'intègrent pas ou peu les mesures de caractères en début de cycle cultural. Inclure ces évaluations supplémentaires pourrait permettre de sélectionner des types plus compétitifs mais compatibles avec d'autres objectifs visés tels que le rendement (Benaragama *et al.*, 2014), et une efficacité accrue de l'usage de l'eau et des nutriments (Mwenda *et al.*, 2020). Les futurs schémas de sélection pourraient ainsi intégrer des notations supplémentaires concernant des caractères mesurés en début de cycle à plusieurs stades précoces, mesures pouvant à terme être obtenues via des approches automatisées. Dans l'attente d'une sélection permettant d'optimiser davantage la compétitivité des variétés de céréales à paille vis-à-vis des adventices, l'usage de mélanges variétaux pourrait également constituer une solution à court terme, mais les avantages de ce levier pour améliorer la compétitivité des céréales à paille vis-à-vis des adventices n'ont été que très peu étudiés jusqu'à présent dans la littérature (Pridham *et al.*, 2007, Kaut *et al.*, 2008, Kaut *et al.*, 2009).

Références bibliographiques

- Acciaresi, H.A., Chidichima, H.O., Sarandon, S.J., 2001. Traits related to competitive ability of wheat (*Triticum aestivum*) varieties against Italian Ryegrass (*Lolium multiflorum*). *Biological Agriculture & Horticulture*, 19, 275-286.
- Adeux, G., Vieren, E., Carlesi, S., Bàrberi, P., Munier-Jolain, N., Cordeau, S., 2019. Mitigating crop yield losses through weed diversity. *Nature Sustainability*, 2, 1018-1026.
- 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.
- Aharon, S., Peleg, Z., Argaman, E., Ben-David, R., Lati, R.N., 2020. Image-based high-throughput phenotyping of cereals early vigor and weed-competitiveness traits. *Remote Sensing*, 12, 3877.
- Andrew, I.K.S., Storkey, J., Sparkes, D.L., 2015. A review of the potential for competitive cereal cultivars as a tool in integrated weed management. *Weed Research*, 55, 239-248.
- Audergon, J-M., Barre, P., Colbach, N., Debaeke, P., Durand-Tardif, M., Fontaine, L., Gate, P., Gauffreteau, A., Jézéquel, S., Lecouviour, F., Perronne, R., 2022. *La gestion des adventices : quels traits et fonctions agroécologiques pour les plantes ?* Livre Blanc PlantAlliance 2022. 23p.
- Benaragama, D., Rosnagel, B.G., Shirliffe, S.J., 2014. Breeding for competitive and high-yielding crop cultivars. *Crop Science*, 54, 1015-1025.
- Beres, B.L., Harker, K.N., Clayton, G.W., Bremer, E., Blackshaw, R.E., Graf, R.J., 2010. Weed-competitive ability of spring and winter cereals in the Northern Great Plains. *Weed Technology*, 24, 108-116.

- Bertholdsson, N-O., 2005. Early vigour and allelopathy - two useful traits for enhanced barley and wheat competitiveness against weeds. *Weed Research*, 45, 94-102.
- Bertholdsson, N-O., 2010. Breeding spring wheat for improved allelopathic potential. *Weed Research*, 50, 49-57.
- Bertholdsson, N-O., 2011. Use of multivariate statistics to separate allelopathic and competitive factors influencing weed suppression ability in winter wheat: weed suppression ability in winter wheat. *Weed Research*, 51, 273-283.
- Bogale, A., Nefo, K., Seboka, H., 2011. Selection of some morphological traits of bread wheat that enhance the competitiveness against wild oat (*Avena fatua* L.). *World Journal of Agricultural Sciences*, 7 128-135.
- Bonin, L., Vuillemin, F., 2017. Nuisibilité des adventices en grandes cultures : toutes les raisons de lutter contre les adventices. *Perspectives Agricoles*, 447, 27-29.
- Bourguet, D., Guillemaud, T., 2016. The hidden and external costs of pesticide use. *Sustainable agriculture reviews*, 35-120.
- Chauvel, B., Gauvrit, C., Guillemain, J-P., 2022. From sea salt to glyphosate salt: a history of herbicide use in France. *Advances in Weed Science*. 40(Spec1):e02022001
- Christensen, S., 1995. Weed suppression ability of spring barley varieties. *Weed Research*, 35, 241-247.
- Coleman, R.K., Gill, G.S., Rebetzke, G.J., 2001. Identification of quantitative trait loci for traits conferring weed competitiveness in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Australian Journal of Agricultural Research*, 52, 1235-1246.
- Cordeau, S., Dessaint, F., Denieul, C., Bonin, L., Vuillemin, F., Delattre, M., Rodriguez, A., Guillemain, J-P., Chauvel, B., 2016. La nuisibilité directe des adventices en grandes cultures : quelles réponses nous apportent les essais désherbage ? AFPP – 23^{ème} Conférence du Columa, journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, Dijon, France, 6-8 décembre 2016, 11-22.
- Cosser, N.D., Gooding, M.J., Thompson, A.J., Froud-Williams, R.J., 1997. Competitive ability and tolerance of organically grown wheat cultivars to natural weed infestations. *Annals of Applied Biology*, 130, 523-535.
- Dhima, K., Vasilakoglou, I., Gatsis, T., Eleftherohorinos, I., 2010. Competitive interactions of fifty barley cultivars with *Avena sterilis* and *Asperugo procumbens*. *Field Crops Research*, 117, 90-100.
- Didon, U.M.E., Boström, U., 2003. Growth and development of six barley (*Hordeum vulgare* ssp. *vulgare* L.) cultivars in response to a model weed (*Sinapis alba* L.): growth and development of six barley cultivars. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 189, 409-417.
- Donald, C.M., 1968. The breeding of crop ideotypes. *Euphytica*, 17, 385-403.
- Drews, S., Neuhoﬀ, D., Köpke, U., 2009. Weed suppression ability of three winter wheat varieties at different row spacing under organic farming conditions. *Weed Research*, 49, 526-533.
- Feledyn-Szewczyk B., 2013. The influence of morphological features of spelt wheat (*Triticum aestivum* ssp. *spelta*) and common wheat (*Triticum aestivum* ssp. *vulgare*) varieties on the competitiveness against weeds in organic farming system. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 11, 416-421.
- Feledyn-Szewczyk, B., Jończyk, K., 2015. Differences between organically grown varieties of spring wheat, in response to weed competition and yield. *Journal of Plant Protection Research*, 55, 254-259.
- Feledyn-Szewczyk, B., Jończyk, K., Berbeć, A., 2013. The morphological features and canopy parameters as factors affecting the competition between winter wheat varieties and weeds. *Journal of Plant Protection Research*, 53, 203-209.
- Fontaine, L., Bernicot, M-H., Rolland, B., Poirat, L., 2009. Des variétés rustiques concurrentes des adventices pour l'agriculture durable, en particulier l'agriculture biologique. *Innovations Agronomiques*, 4, 115-124.
- Fradgley, N.S., Creissen, H.E., Pearce, H., Howlett, S.A., Pearce, B.D., Döring, T.F., Girling, R.D., 2017. Weed suppression and tolerance in winter oats. *Weed Technology*, 31, 740-751.
- Friedli, C.N., Abiven, S., Fossati, D., Hund, A., 2019. Modern wheat semi-dwarfs root deep on demand: response of rooting depth to drought in a set of Swiss era wheats covering 100 years of breeding. *Euphytica*, 215, 1-15.

- Gauffreteau, A., 2018. Using ideotypes to support selection and recommendation of varieties. *OCL*, 25, D602.
- Goldberg, D.E., 1990. Components of resource competition in plant communities. *Perspectives on plant competition*. 27-49.
- Gouleau, A., Gauffreteau, A., This, P., Tailliez, D., Gombert, J., Gouache, D., Bakan, B., Cordeau, S., Enjalbert, J., Laperche, A., Leclère, V., Leyronas, C., Lheureux, F., Mazza, V., Moquet, F., Wagner, A., Bernicot, M-H., Fontaine, L., Bertoux, V., Huyghe, C., 2021. *Quelles variétés pour l'agroécologie ?* Saisine du Comité Scientifique CTPS - Quelles variétés pour l'agroécologie ? INRAE. <https://doi.org/10.17180/MEZ5-YV03>
- Heap, I., 2022. *The International Herbicide-Resistant Weed Database*. Online. Wednesday, May 4, 2022.
- Hoad, S., Topp, C., Davies, K., 2008. Selection of cereals for weed suppression in organic agriculture: a method based on cultivar sensitivity to weed growth. *Euphytica*, 163, 355-366.
- Huel, D.G., Hucl, P., 1996. Genotypic variation for competitive ability in spring wheat. *Plant Breeding*, 115, 325-329.
- Kaut, A.H.E.E., Mason, H.E., Navabi, A., O'Donovan, J.T., Spaner, D., 2008. Organic and conventional management of mixtures of wheat and spring cereals. *Agronomy for Sustainable Development*, 28, 363-371.
- Kaut, A.H.E.E., Mason, H.E., Navabi, A., O'Donovan, J.T., Spaner, D., 2009. Performance and stability of performance of spring wheat variety mixtures in organic and conventional management systems in western Canada. *The Journal of Agricultural Science*, 147, 141-153.
- Korres, N.E., Froud-Williams, R.J., 2002. Effects of winter wheat cultivars and seed rate on the biological characteristics of naturally occurring weed flora. *Weed Research*, 42, 417-428.
- Kucek, K.L., Mallory, E.B., Darby, H.M., Dawson, J.C., Sorrells, M.E., 2021. Breeding wheat for weed-competitive ability: I. Correlated traits. *Euphytica*, 217, 1-15.
- Lazzaro, M., Costanzo, A., Bàrberi, P., 2018. Single vs multiple agroecosystem services provided by common wheat cultivar mixtures: weed suppression, grain yield and quality. *Field Crops Research*, 221, 277-297.
- Lazzaro, M., Bàrberi, P., Dell'Acqua, M., Pè, M.E., Limonta, M., Barabaschi, D., Cattivelli, L., Laino, P., Vaccino P., 2019. Unraveling diversity in wheat competitive ability traits can improve integrated weed management. *Agronomy for Sustainable Development*, 39, 1-11.
- Lemerle, D., Verbeek, B., Coombes, N., 1995. Losses in grain yield of winter crops from *Lolium rigidum* competition depend on crop species, cultivar and season. *Weed Research*, 35, 503-509.
- Lemerle, D., Verbeek, B., Cousens, R.D., Coombes, N.E., 1996. The potential for selecting wheat varieties strongly competitive against weeds. *Weed Research*, 36, 505-513.
- Lemerle, D., Verbeek, B., Orchard, B., 2001. Ranking the ability of wheat varieties to compete with *Lolium rigidum*. *Weed Research*, 41, 197-209.
- Lemerle, D., Smith, A., Verbeek, B., Koetz, E., Lockley, P., Martin, P., 2006. Incremental crop tolerance to weeds: A measure for selecting competitive ability in Australian wheats. *Euphytica*, 149, 85-95.
- Louargant, M., Jones, G., Faroux, R., Paoli, J.N., Maillot, T., Gée, C., Villette, S., 2018. Unsupervised classification algorithm for early weed detection in row-crops by combining spatial and spectral information. *Remote Sensing*, 10, 761.
- Mahajan, G., Hickey, L., Chauhan, B.S., 2020. Response of barley genotypes to weed interference in Australia. *Agronomy*, 10, 99.
- 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.
- Mason, H., Goonewardene, L., Spaner, D., 2008. Competitive traits and the stability of wheat cultivars in differing natural weed environments on the northern Canadian Prairies. *Journal of Agricultural Science*, 146, 21-33.
- Mason, H., Navabi, A., Frick, B., O'Donovan, J., Spaner, D., 2007. Cultivar and seeding rate effects on the competitive ability of spring cereals grown under organic production in Northern Canada. *Agronomy Journal*, 99, 1199-1207.

- Mignolet, C., Schott, C., Benoît, M., Meynard, J.M., 2012. Transformations des systèmes de production et des systèmes de culture du bassin de la Seine depuis les années 1970 : une spécialisation des territoires aux conséquences environnementales majeures. *Innovations Agronomiques*, 22, 1-16.
- Murphy, K.M., Dawson, J.C., Jones, S.S., 2008. Relationship among phenotypic growth traits, yield and weed suppression in spring wheat landraces and modern cultivars. *Field Crops Research*, 105, 107-115.
- Mwendwa, J.M., Brown, W.B., Weidenhamer, J.D., Weston, P.A., Quinn, J.C., Wu, H., Weston, L.A., 2020. Evaluation of commercial wheat cultivars for canopy architecture, early vigour, weed suppression, and yield. *Agronomy* 10: 983.
- Ogg, A.G., Seefeldt, S.S., 1999. Characterizing traits that enhance the competitiveness of winter wheat (*Triticum aestivum*) against jointed goatgrass (*Aegilops cylindrica*). *Weed Science*, 47, 74-80.
- Piliksere, D., Strazdiņa, V., Vīcupe, Z., Jansone, Z., Legzdiņa, L., Beinaroviča, I., Kronberga, A., 2013. Cereal breeding for organic farming: crop traits related with competitiveness against weeds. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences*, 67, 272-276.
- Pridham, J.C., Entz, M.H., Martin, R.C., Hucl, P.J., 2007. Weed, disease and grain yield effects of cultivar mixtures in organically managed spring wheat. *Canadian journal of plant science*, 87, 855-859.
- Rasmussen, J., Kurtzmann, J.I., Jensen, A., 2004. Tolerance of competitive spring barley cultivars to weed harrowing. *Weed Research*, 44, 446-452.
- Reid, T.A., Navabi, A., Cahill, J.C., Salmon, D., Spaner, D., 2009. A genetic analysis of weed competitive ability in spring wheat. *Canadian journal of plant science*, 89, 591-599.
- Reiss, A., Fomsgaard, I., Mathiassen, S.K., Stuart, R., Kudsk, P., 2018a. Weed suppression by winter cereals: relative contribution of competition for resources and allelopathy. *Chemoecology*, 28, 109-121.
- Reiss, A., Fomsgaard, I., Mathiassen, S.K., Randhawa, H.S., Kudsk, P., 2018b. Weed suppression by Canadian spring cereals: relative contribution of competition for resources and allelopathy. *Chemoecology*, 28, 183-187.
- Shabi, T.H., Mominul Islam, A.K.M., Khairul Hasan, A., Juraimi, A.S., Anwar, M.P., 2018. Differential weed suppression ability in selected wheat varieties of Bangladesh. *Acta Scientifica Malaysia*, 2, 1-7.
- Svensgaard, J., Jensen, S.M., Westergaard, J.C., Nielsen, J., Christensen, S., Rasmussen, J., 2019. Can reproducible comparisons of cereal genotypes be generated in field experiments based on UAV imagery using RGB cameras? *European Journal of Agronomy*, 106, 49-57.
- van der Werf, H.M., 1996. Assessing the impact of pesticides on the environment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 60, 81-96.
- Trottet, M., Doussinault, G., 2002. Analyse du progrès génétique chez le blé tendre au cours du XX^{ème} siècle. *Le Sélectionneur Français*, 53, 3-18.
- Violle, C., Navas, M-L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., Garnier, E., 2007. Let the concept of trait be functional! *Oikos*, 116, 882-892.
- Vlášek, O., Konvalina, P., Suchý, K., Machková, B., 2016. Tools for evaluation of weed competitiveness of wheat, International Conference on Trends in Agricultural Engineering. Prague, République Tchèque, 7-9 septembre 2016, 679-684.
- Watson, P.R., Derksen, D.A., van Acker, R.C., 2006. The ability of 29 barley cultivars to compete and withstand competition. *Weed Science*, 54, 783-792.
- Weisberger, D., Nichols, V., Liebman, M., 2019. Does diversifying crop rotations suppress weeds? A meta-analysis. *PLoS One*, 14, e0219847.
- Wicks, G.A., Nordquist, P.T., Baenziger, P.S., Klein, R.N., Hammons, R.H., Watkins, J.E., 2004. Winter wheat cultivar characteristics affect annual weed suppression. *Weed Technology*, 18, 988-998.
- Worthington, M., Reberg-Horton, S.C., 2013. Breeding cereal crops for enhanced weed suppression: optimizing allelopathy and competitive ability. *Journal of Chemical Ecology*, 39, 213-231.
- Worthington, M., Reberg-Horton, S.C., Brown-Guedira, G., Jordan, D., Weisz, R., Murphy, J.P., 2015a. Morphological traits associated with weed-suppressive ability of winter wheat against Italian Ryegrass. *Crop Science*, 55, 50-56.

Worthington, M., Reberg-Horton, S.C., Brown-Guedira, G., Jordan, D., Weisz, R., Murphy, J.P., 2015b. Relative contributions of allelopathy and competitive traits to the weed suppressive ability of winter wheat lines against Italian Ryegrass. *Crop Science*, 55, 57-64.

Wu, H., Pratley, J., Lemerle, D., Haig, T., 2000. Evaluation of seedling allelopathy in 453 wheat (*Triticum aestivum*) accessions against annual ryegrass (*Lolium rigidum*) by the equal-compartment-agar method. *Australian Journal of Agricultural Research*, 51, 937.

Zeng, R.S., 2014. Allelopathy - The solution is indirect. *Journal of Chemical Ecology*, 40, 515-516.

Zerner, M.C., Gill, G.S., Vandeleur, R.K., 2008. Effect of height on the competitive ability of wheat with oats. *Agronomy Journal*, 100, 1729-1734.

Zerner, M.C., Rebetzke, G.J., Gill G. S., 2016. Genotypic stability of weed competitive ability for bread wheat (*Triticum aestivum*) genotypes in multiple environments. *Crop and Pasture Science*, 67, 695.

Zeven, A.C., 1975. Idiotype and ideotype. *Euphytica*, 24, 565-565.



Les articles sont publiés sous la licence Creative Commons 2.0. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.