Caractérisation et sélection de variétés de blé tendre plus compétitives vis-à-vis des adventices

Laurence FONTAINE [1] *, Antonin LE CAMPION [2], Marie-Hélène BERNICOT [3], Ludovic BONIN [4], Philippe du CHEYRON [4], Guillaume DEHAY [5], Laurent FALCHETTO [3], Jean-Christophe GAPIN [5], Volker LEIN [6], Aurélie MAILLARD [7], Delphine MOREAU [8], Jean-Yves MORLAIS [2], Vincent MOULIN [9], Loic PRIEUR [10], Thierry QUIRIN [11] , Bernard ROLLAND [2], Rodolphe VIDAL [1]

1 - Institut Technique de l'Agriculture Biologique (ITAB), 149 rue de Bercy - 75595 PARIS CEDEX 12
2 - INRA UMR IGEPP, BP 35327 - Domaine de la Motte, 35650 LE RHEU
3 - INRA UE Domaine d'Epoisses, 21110 BRETENIERES
4 - Arvalis - Institut du végétal, 3 rue Joseph et Marie Hackin - 75116 PARIS
5 - Lemaire-Deffontaines SA, 180 rue du Rossignol - 59310 AUCHY-LES-ORCHIES
6 - Saaten Union Recherche SAS, 163 Avenue de Flandres - 60190 ESTREES - ST DENIS
7 - GEVES, Rue Georges Morel - 49071 BEAUCOUZE
8 - UMR 1347 Agroécologie, AgroSup Dijon, INRA, Univ. Bourgogne Franche-Comté, F-21000 DIJON
9 - FDGEDA du Cher, 2701 Route d'Orléans - 18230 ST DOULCHARD
10 - CREAB Midi-Pyrénées, LEGTA Auch Beaulieu - 32020 AUCH Cedex 09
11 - Agrobio Poitou-Charentes / CA 86, Centre St Joseph - 79500 MELLE

**** Coordinateur : Laurence FONTAINE,*** *laurence.fontaine@itab.asso.fr*

1. Introduction

Le contrôle de la flore adventice est l'une des problématiques agronomiques majeures des systèmes céréaliers en agriculture biologique (AB), en parallèle de la gestion de la fertilité des sols. Les stratégies de maîtrise des adventices reposent sur la prévention et, surtout, la combinaison de leviers multiples : des rotations diversifiées (avec alternance de cultures de familles différentes), le travail du sol (faux-semis, déchaumages, labour…), la compétition vis-à-vis de la flore adventice (couverture du sol par les cultures ou des plantes de service), la limitation de l'importation de graines d'adventices (propreté des semences, entretiens des abords, écimage des adventices…) et, en complément, le désherbage mécanique (hersage, binage...). Dans le cas du blé tendre, l'utilisation de variétés plus concurrentielles est l'un des leviers mobilisables dans la gestion alternative des adventices. Les enjeux liés à la mobilisation de variétés concurrentielles sont (1) d'améliorer la productivité de l'AB (meilleur rendement en lien avec une meilleure utilisation des ressources), (2) d'améliorer la durabilité des systèmes de culture en AB (contrôler les adventices limite l'alimentation du stock grainier du sol), mais aussi (3), au-delà de l'AB, de participer à la limitation d'utilisation d'herbicides en introduisant ce levier en production intégrée.

Pour optimiser ce pouvoir compétitif, il est nécessaire de connaître les caractéristiques éco-physiologiques du blé et des adventices. En effet, selon les variétés, le blé présente des morphologies très diverses, avec une amplitude large en terme de hauteur, d'orientation du feuillage, de largeur et de longueur de feuilles. Ces caractéristiques phénotypiques, complétées par des phénologies variées, laissent supposer des interactions diverses avec le milieu selon les variétés, un impact différencié sur la flore adventice, mais aussi une réponse différenciée à la présence de la flore adventice.

Un premier programme de recherche financé par le FSOV, conduit de 2007 à 2009, avait permis d'observer la capacité de certaines variétés à réduire la biomasse adventice (Bernicot, 2011). Le nombre réduit d'essais (peu de regroupements possibles) et les limites méthodologiques rencontrées demandaient des résultats complémentaires. Un second programme de recherche a été monté et présenté à l'appel à projet 2012 du FSOV, permettant la réalisation de nouveaux essais sur trois campagnes (2013-2015), avec des méthodologies mieux rôdées, en agriculture conventionnelle et en AB. Les objectifs en était (1) de valider et documenter l'effet du choix variétal en blé tendre dans la compétition avec les adventices, (2) d'identifier et quantifier les caractères phénotypiques explicatifs des différences de compétition vis-à-vis des adventices entre variétés de blé tendre, (3) d'établir une méthode d'appréciation du pouvoir concurrentiel à destination des évaluateurs de variétés, en sélection, pour l'inscription, et pour le conseil agricole.

Cet article présente les résultats acquis lors de ce second programme et les enseignements qui en sont tirés.

2. Matériel et méthode

▶ 2.1 - Choix des variétés testées

Pour les essais conduits en station en agriculture conventionnelle (AC), une liste de 15 variétés (Tableau 1) a été élaborée afin de couvrir une gamme la plus large possible de hauteurs, couverture du sol et précocité d'épiaison. Les variétés identifiées comme témoins sont Caphorn (faible aptitude à couvrir le sol), Pegassos (forte aptitude à couvrir le sol) et Renan (intermédiaire, avec une capacité à couvrir le sol plutôt en fin de cycle ; Renan est de plus une variété répandue en AB, qui peut servir de référence). 9 variétés parmi ces 15 ont été retenues pour les essais conduits en AB.

		Hauteur			
		courte Note < 3,5	*moyenne courte* 3,5	*moyenne haute* 4 et 4,5	*haute* > 4,5
port de feuille	*dressé*	Caphorn ab (6,5) Glasgow (5,5)		Numeric ab (7)	Energo ab (6,5) Midas (6)
	intermédiaire		Oregrain (7) Apache (7) Attlass ab (6)	Hendrix ab (6) Hybery (5)	Pegassos (t)
	étalé	Acoustic ab (7)	Athlon ab (7)	Renan ab (6)	Pireneo ab (5,5)

Tableau 1 - *Classification des variétés choisies pour évaluer le pouvoir concurrentiel vis-à-vis des adventices. (x) précocité à épiaison. ab : variétés présentes dans les essais en AB.*

▶ 2.2 - Dispositifs expérimentaux

Deux types de dispositifs expérimentaux, complémentaires, visaient à mesurer le pouvoir concurrentiel des variétés de blé et à en estimer les facteurs explicatifs les plus prédictifs :

- 2 dispositifs en station en AC, avec comparaison des variétés en conduite avec et sans adventices, pour mesurer les pertes de rendement liées à la concurrence, en plus des mesures de suppression des adventices. Une attention particulière a été apportée au suivi de l'évolution de l'aspect morphologique du couvert au fil du développement du blé, en lien avec l'aspect dynamique de l'architecture du couvert.
- 6 sites expérimentaux afin d'évaluer le pouvoir concurrentiel des variétés - et les facteurs explicatifs- dans des conditions d'AB et différents contextes d'adventices de façon à mieux appréhender les sources d'interaction.

Essais en station en AC

Deux sites étaient concernés, Epoisses (Bretenières, 21, INRA) sur les 3 campagnes du projet (récoltes 2013, 2014, 2015) et Boigneville (91, Arvalis) sur 2 campagnes (2014, 2015), soit 5 essais au total.

Un semis de ray grass italien (RGI) a permis de simuler la présence d'adventices. Des modalités désherbées étaient intégrées (essais à 2 facteurs, en split plot, sauf Epoisses 2014 en criss-cross). Chaque essai comportait 6 blocs par modalités, 3 étant dédiés aux prélèvements de biomasse, 3 aux mesures de rendement (Figure 1).

Les notations et mesures sur blé concernaient : la levée (date et densité), la précocité à épiaison, le nombre d'épis par m², le rendement, la hauteur (3 dates de mesures, avec calcul de l'indice de l'aire sous la courbe de l'évolution de la hauteur), le port des feuilles, la couverture du sol. Celle-ci a été évaluée selon diverses méthodes : notation visuelle (fermeture de l'inter-rang notée de 1 à 9), prise de photos et analyse du pourcentage de vert (modalités désherbées). Des mesures d'indice foliaire (« LAI », Leaf Area Index, mesuré par un appareil nommé SunScan), ou de l'indice de végétation (« NDVI », mesuré par un appareil appelé Greenseeker), indicateur de la vigueur et de la quantité de végétation, ont aussi été réalisées à Epoisses.

Les mesures sur RGI étaient : la levée (densité sur 1 ou 2 blocs), la biomasse aérienne au développement maximal (avant sénescence), le nombre d'épis/m².

Essais en AB en infestation naturelle

Six sites, en conditions pédoclimatiques très différentes, étaient concernés (Figure 2). Les parcelles ont été choisies pour leur niveau d'infestation initiale élevé (à l'exception de Rennes) et n'ont pas eu d'intervention de désherbage mécanique afin de favoriser le développement des adventices. En dehors de l'absence de désherbage, elles étaient conduites selon les pratiques locales courantes. Six blocs étaient prévus afin de sélectionner les blocs les moins hétérogènes, en termes de développement des adventices, pour la réalisation des mesures.

Figure 1 - *Photo aérienne de l'essai de Boigneville en 2015. La modalité « désherbée » est à gauche et la modalité « avec ray-grass » sur la droite. Les marques des prélèvements de biomasse dans la modalité « désherbée » sont encore visibles ». Les trois blocs déjà prélevés dans la modalité « avec ray-grass » viennent d'être broyés.*

Les mesures sur blé étaient : la levée (date et densité), la précocité à épiaison, le nombre d'épis/m² ; la hauteur en début de montaison (vers le stade 2 nœuds (2N) de la variété Caphorn) et la hauteur finale ; le port de feuille au tallage, au stade 2N et à épiaison de Caphorn ; la couverture du sol (notation visuelle) aux stades 2N et épiaison de Caphorn. Des mesures de biomasse aériennes ont été effectuées sur blé et adventices (à la floraison des principales adventices, avant entrée en sénescence).

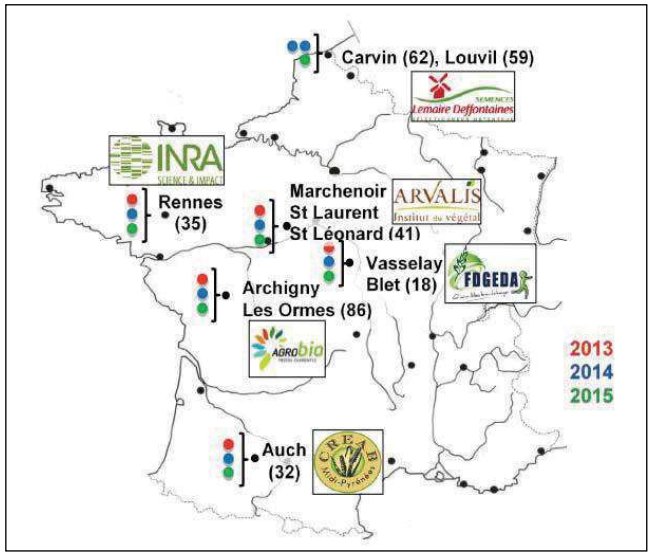

Figure 2 - *Carte des essais en AB (années, lieux et partenaires)*

▶ 2.3 - Limites et difficultés rencontrées dans les dispositifs expérimentaux

Difficultés à simuler une adventice (essais en station)

Si en 2013 à Epoisses les levées de RGI ont été correctes et relativement homogènes (40 à 62 plantes/m², soit 33 à 51% de levée), en 2014 d'importantes attaques d'oscinies et de limaces ont fortement diminué les peuplements et généré une forte hétérogénéité de l'enherbement (de 0 à 23 plantes/m²), qui a amené à écarter l'essai de l'analyse en regroupement. En 2015 par contre les levées ont été très bonnes (conditions de nutrition azotée très favorables) et le fort développement du RGI a cette fois trop concurrencé le blé (rendements très faibles), amenant là aussi à écarter l'essai du regroupement. Sur Boigneville, les levées 2014 ont été relativement homogènes (54 à 69 plantes/m², soit 45 à 58% de levée). En 2015, l'hétérogénéité constatée (18 à 56 plantes/m²) a pu être prise en compte dans les analyses statistiques via l'effet bloc. Ces observations traduisent la difficulté à simuler par semis une adventice de type RG face à la variabilité du climat et de l'azote disponible. Le nombre réduit d'essais utilisables (3 sur 5) fragilise leur regroupement et analyse.

Difficultés liées aux conditions climatiques des deux premières campagnes (essais en AB)

Les conditions climatiques difficiles des 2 premières campagnes (en 2013 et 2014 précipitations abondantes en hiver et parfois au printemps ; printemps froid en 2014) ont pu limiter dans les essais en AB le développement du blé (par lixiviation et/ou manque de minéralisation de l'azote) et donc son pouvoir concurrentiel sur les adventices. Ceci est caractérisé par les mesures de hauteur de la variété Renan (Tableau 2), qui a rarement atteint les 90 cm mesurés en essai en station où l'azote était peu limitant. Ces conditions ont ainsi été peu propices à l'expression de la capacité des variétés de blé à se développer et donc à concurrencer efficacement les adventices.

	Commune et partenaire		Date semis	Précédent	Fertilisation	Hauteur finale Renan (cm)	Biomasse adventices				
							Adventices dominantes et remarques	Biomasse adventices en kg/ha	CV	effet variété et qual. levée	Ratio Msadv/Msbth
2013	Archigny (86)	Agrobio	15-nov	Blé		71	*faible enherbement*	460	**26%**	0,026*	0,16
	Auch (32)	Creab	02-nov	Féverole d'hiver	100uN	92	*moutarde*	1015	**55%**	0,038*	0,17
	Marchenoir (41)	Arvalis	07-nov	Féverole		70	*vulpin*	1730	**21%**	0,17	0,8
	Rennes (35)	Inra	08-nov	Prairie (luzerne)		99	*renoncule*	2399	**22%**	0,047*	0,28
	Vasselay (18)	Fdgda	23-oct	Triticale/pois		47	*blé très clairsemé*	1664	**23%**	0,87	2,05
2014	Auch (32)	Creab	29-nov	Pois printemps		60	*enherbement correct*	793	**44%**	0,0028 **	0,22
	Blet (18)	Fdgeda	27-nov	Féverole		65	*faible enherbement*	429	**65%**	0,23	0,13
	Carvin (62)	Lemaire	19-nov	Pomme de terre		89	*agrostis et matricaire*	705	**23%**	0,04 *	0,1
	Les Ormes (86)	Agrobio	29-nov	Soja		67	*vulpin et folle-avoine*	1944	**25%**	0,099*	0,87
	Louvil (59)	Lemaire	3-dec	betterave rouge		87	*enherb.faible, agrostis*	423	**30%**	5^{e-4}***	0,05
	Rennes (35)	Inra	30-oct	Maïs (anté prairie)		93	*pas d'adventices*				
	St-Laurent (41)		30-oct	Haricot		85	*, coquelicot*	1612	**21%**	0,75	0,33
2015	Auch (32)	Creab	06-nov	Féverole hiver	80uN	72	*moutarde et anthémis*	1046	**31%**	**0,21**	0,27
	Blet (18)	Fdgeda	28-oct	Féverole hiver	fum.15t/ha	84	*vulpin*	1212	**24%**	**0,15**	0,32
	Les Ormes (86)	Agrobio	05-nov	Blé	20 uN	86	*folle-avoine et vulpin*	2253	**30%**	**0,16**	0,3
	Louvil (59)	Lemaire	30-oct	Pomme de terre	40uN vinasse	95	*matricaire*	2837	**16%**	**0,1**	0,24
	Rennes (35)	Inra	29-oct	Maïs (anté prairie)		100		673	**35%**	**0,87**	0,09
	St-Léonard (41)	Arvalis	29-oct	Féverole hiver		84	*vulpin*	1505	**16%**	**0,17**	0,26

Tableau 2 - *Caractéristiques des essais menés en AB. CV = coefficient de variance de la biomasse des adventices entre variétés. MSadv = biomasse aérienne adventice, MSbth = biomasse aérienne blé.*

Influence de la qualité des semences

D'importantes pertes à la levée ont été observées sur certaines variétés dans les essais en AB les 2 premières campagnes. En 2013, Acoustic, Athlon et Caphorn ont présenté des levées très significativement inférieures aux autres variétés (140 plantes/m² pour Acoustic versus 241 plante/m² pour Energo la mieux classée dans le regroupement des 6 essais). En 2014, si globalement les levées sont meilleures, l'effet de la variété sur la densité de levée reste hautement significatif ; ce sont Hendrix, Athlon et Caphorn qui présentent des pertes significatives (205 plantes/m² pour Hendrix versus 340 plantes/m² pour Attlass). En 2015, on retrouve un effet de la variété sur la densité de levée, mais nettement plus faible (l'écart entre la moins bien levée -253 plantes/m²- et la mieux levée -296 plantes/m²- représente 15% de la moyenne des peuplements, alors qu'il était de l'ordre de 50% les années précédentes).

Le constat d'une corrélation négative significative entre qualité de levée du blé (nombre de plantes/m²) et biomasse des adventices sur deux essais chaque année (Auch et Rennes en 2013, Auch et Carvin en 2014) a amené à ne considérer que 6 variétés au lieu de 9 pour regrouper les résultats des essais, sur chacune de ces 2 années (retrait des 3 variétés respectives ayant mal levé). On regrette que la qualité inégale des semences fournies ait ainsi pu impacter le programme de recherche.

► 2.4 - Evaluation du pouvoir concurrentiel des variétés de blé

La capacité d'une plante (ici le blé) à concurrencer des plantes voisines (ici les adventices) peut s'exprimer par deux composantes : (1) **le pouvoir suppressif**, c'est-à-dire la capacité à réduire le développement et la croissance d'un compétiteur et (2) **la tolérance**, c'est-à-dire l'aptitude à tolérer la présence de compétiteurs voisins en limitant les pertes de rendement (Goldberg 1990; Grace 1990; Jordan 1993). Une revue bibliographique nous indique que des différences variétales ont été mises en évidence depuis une vingtaine d'années pour diverses espèces de céréales, dont le blé tendre, pour limiter le développement d'adventices, simulées ou non (Christensen 1995; Christensen S. *et al.* 1994, Lemerle *et al.* 1996, Ogg and Seefeldt 1999, Mennan and Zandstra 2005, Worthington *et al.* 2015b, Cosser *et al.* 1997; Drews *et al.* 2009; Hoad *et al.* 2008; Korres and Froud-Williams 2002; Mason *et al.* 2007; Ruisi *et al.* 2015; Wicks *et al.* 1986). Des différences entre variétés de blé au niveau de la tolérance à la présence d'adventices ont également été identifiées à plusieurs reprises (Appleby *et al.* 1976; Challaiah *et al.* 1986; Vandeleur and Gill 2004; Zerner *et al.* 2008).

La majorité de ces études a été menée en AC, généralement intensive, comparant une modalité désherbée chimiquement à une modalité enherbée (Benaragama *et al.* 2014; Huel and Hucl 1996; Lemerle *et al.* 2001; Ruisi *et al.* 2015; Worthington *et al.* 2013). Peu d'études ont été menées en AB, notamment pour des raisons méthodologiques, car il est difficile d'intégrer une modalité « sans adventice » dans ce mode de conduite (sauf à conduire des désherbages manuels, fastidieux). La bibliographie nous apprend aussi que l'étude de la compétitivité des variétés vis-à-vis des adventices est fortement soumise à l'influence de facteurs environnementaux (Worthington and Reberg-Horton

2013; Worthington *et al.* 2015a). En effet il peut être difficile de déterminer les caractères qui contribuent à l'aptitude à la compétition parce qu'ils ne sont pas seulement affectés par la conduite (densité de semis, écartement des rangs, fertilisation) mais aussi par l'environnement (caractéristiques biologiques des adventices, niveau d'enherbement, conditions pédoclimatiques) et les interactions génotype × environnement × conduite (Asif *et al.* 2014), lesquelles sont plus importantes en AB.

Ces enseignements ont conforté l'approche développée dans le programme de recherche présenté, à savoir mener à la fois des essais en station et en AB en infestation naturelle, malgré le nombre de facteurs potentiels influençant la compétition et leurs interactions.

Evaluation de la compétition des variétés dans les essais en station en AC

La capacité des variétés à tolérer la présence du RGI a été caractérisée par la perte de rendement en présence d'adventices, exprimée en pourcentage du rendement sans adventice.

Le pouvoir suppressif a été estimé par l'analyse des mesures de biomasse et de nombre d'épis de RGI.

Des analyses de variance ont été effectuées sur ces trois variables descriptives du pouvoir concurrentiel. Des comparaisons multiples de moyennes (méthode Newman et Keuls (N&K) au seuil de significativité de 10%, retenu en raison de l'hétérogénéité de la répartition du RGI sur les parcelles) ont été réalisées pour classer les différences de pouvoir concurrentiel.

Pour caractériser les variables explicatives de ce pouvoir concurrentiel, des analyses en composantes principales ont été effectuées, par essai et en regroupements (données préalablement centrées et réduites). Des régressions linéaires multiples ont ensuite été entreprises, par essai, pour hiérarchiser les prédicteurs qui participent le plus à l'explication de la variable considérée.

Evaluation de la compétitivité des variétés dans les essais en AB

En l'absence de modalités désherbées, seul le pouvoir suppressif a été estimé dans les essais en AB, via les mesures de biomasse aérienne du blé et des adventices.

Les méthodes statistiques sollicitées pour l'analyse des essais en AB sont identiques à celles utilisées pour les essais en station. Un seuil de significativité de 10% a été retenu en raison de la variabilité liée à la répartition non homogène des adventices.

3. Principaux résultats sur la compétitivité des variétés

▶ 3.1 - Caractérisation de la compétitivité

Effet suppressif dans les essais en AC

Les analyses de variance réalisées sur les biomasses de RGI, prélevées dans les 3 essais retenus, nous démontrent un effet de la variété de blé à Boigneville 2015 (3.4 t MS (matière sèche)/ha en moyenne, p = 0.0099**) (Figure 2) et à Boigneville 2014 (6 t MS/ha, p = 0.052*). Cet essai a néanmoins été écarté, au final, car l'échelonnement des prélèvements de RGI (entre le 19 et le 27 mai pour la plupart et le 2 juin pour 2 variétés) a manifestement entrainé un biais dans les mesures de biomasses. A Epoisses 2013, l'effet variétal n'est pas significatif (5.6 t MS/ha, p = 0.41).

Le regroupement sur les 2 essais validés (Boigneville 2015 et Epoisses 2013) nous indique un effet significatif de la variété sur la biomasse de RGI. Le test de N&K permet de distinguer la variété Caphorn, la moins suppressive, des variétés Midas, Athlon et Energo, qui ont mieux limité la croissance du RGI (Tableau 3). A Boigneville 2015 (essai qui participe le plus à l'effet variété observé sur le regroupement), on observe 68% de plus de biomasse de RGI dans la variété Caphorn par rapport à la variété la plus suppressive (Oregrain dans ce cas précis).

MS.RG ~ variété + essai + variété:essai + bloc%in%essai

	p (10%)	% variance expliquée
variété	0.0099**	16%
essai	5,04e-14***	54%
variété:essai	0,34	7%
bloc%in%essai	0,066	3%
résiduelle		20%

Variété	MS RG (kg/ha)	N&K (seuil 10%)
Caphorn	5649	A
Hendrix	5297	A B
Acoustic	4983	A B
Glasgow	4824	A B
Pegassos	4318	A B
Numeric	4220	A B
Pireneo	4219	A B
Apache	4215	A B
Renan	4081	A B
Oregrain	4004	A B
Attlass	3992	A B
Hybery	3930	A B
Energo	3759	B
Athlon	3668	B
Midas	3511	B

Tableau 3 - *Analyse de la variance de la biomasse de RGI selon les variétés. Regroupement sur deux essais (Epoisses 2013 et Boigneville 2015).*

Des analyses ont aussi été menées sur le rapport biomasse adventice / biomasse blé, qui prend mieux en compte la répartition des ressources disponibles entre les adventices et le blé, et donc les effets de concurrence. Le regroupement des deux essais Epoisses 2013 et Boigneville 2015 est plus discriminant : l'effet variétal est le plus explicatif (49%). 4 variétés sont dépassées par le RGI (ratio > 1), Caphorn, la plus sensible, puis Hendrix, Glasgow et Acoustic. Midas, significativement différente des autres, présente le plus faible ratio (0.6) : elle est parvenue à produire plus de biomasse au détriment du RGI. L'effet de la variété sur les ratios biomasse de RGI / biomasse de blé est démontré dans les essais analysés.

Le pouvoir suppressif des variétés de blé a aussi été estimé via les comptages des nombres d'épis de RGI, réalisés en complément des prélèvements de biomasse, cet indicateur ayant été identifié comme critère de sélection pour limiter la croissance des adventices (Worthington et al, 2013). L'effet de la variété a été mis en évidence dans les deux essais considérés. Dans l'essai de Boigneville 2015, on observe dans la variété Caphorn des densités d'épis de RGI en moyenne deux fois plus élevées que celles rencontrées pour les variétés Pegassos, Energo, Midas, Oregrain et Attlass.

Effet suppressif dans les essais en AB

Les difficultés rencontrées ont malheureusement limité la valorisation des essais menés : sur les 18 essais semés, 2 ont dû être retirés : Blet 2013 (pour cause de forte croissance des adventices et non développement du blé, la parcelle ayant été inondée une partie de la campagne) et Rennes 2014 (en l'absence totale d'adventices).

L'obligation de retirer certaines variétés des analyses 2013 puis 2014 pour cause de mauvaises levées n'a pas permis de regroupement pluriannuel ; de plus, en analyse annuelle, le retrait de ces variétés (qui comptaient parmi elles les moins suppressives, Caphorn par exemple) a entrainé une perte de l'effet variété sur la biomasse adventices, devenu non significatif (l'effet variété significatif avant retrait des variétés ayant mal levé était finalement un effet de la combinaison variété-densité de levée). Enfin, le manque de conditions favorables à la croissance (manque de minéralisation de l'azote et/ou lixiviation) a souvent limité le développement du blé et donc l'expression du pouvoir concurrentiel.

Au final, l'effet de la variété sur la biomasse adventice est observé individuellement dans seulement 3 essais sur 16 (Carvin 2014, Louvil 2014, Auch 2015) (Figure 3). Sur les regroupements annuels effectués après retrait des variétés ayant le moins bien levé, l'effet de la variété sur la biomasse des adventices est significatif en 2013 et 2014, mais pas en 2015. L'hétérogénéité de l'infestation en adventices et, plus globalement, les interactions génotypes x environnement, limitent l'interprétation par une analyse en regroupement classique.

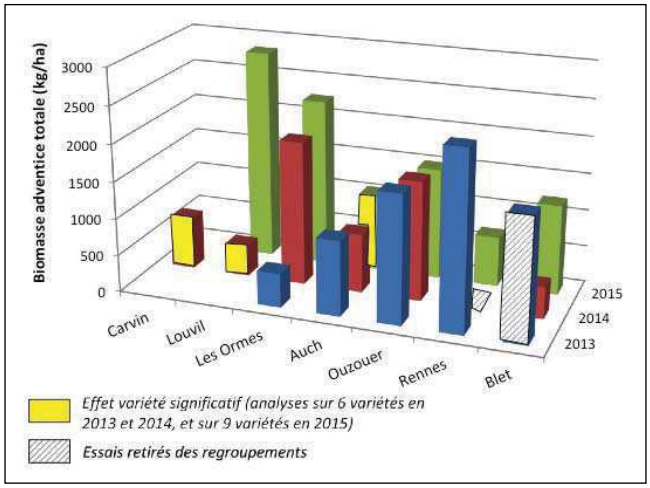

Figure 3 - *Résultats des prélèvements de biomasse d'adventices sur l'ensemble des essais en AB (2013 à 2015).*

L'analyse des ratios biomasse adventices / biomasse blé va globalement dans le même sens que les résultats obtenus pour les biomasses adventices en valeur absolue, mais avec un effet variétal un peu plus marqué. En 2013 et 2014, Energo et Attlass produisent le plus de biomasse et limitent le plus le développement des adventices. En 2013, Renan et Pireneo sont les moins suppressives des 6 variétés analysées. En 2015 (9 variétés analysées), le test de N&K ne permet de discriminer que Athlon (plus suppressive) et Caphorn (moins suppressive). De manière générale, la variété Renan se classe mal dans les essais du programme, en termes de pouvoir concurrentiel vis-à-vis des adventices : bien que couvrante en fin de cycle, elle est tardive à montaison, ce qui limite sa capacité à couvrir le sol en début de cycle ; son développement en fin de cycle peut de plus être fortement limité par un manque d'azote, selon les conditions de l'année.

Hors programme, des comptages de nombre d'épis de RG ont été menés dans un essai post-inscription en AB du réseau de criblage de l'ITAB (Agri-Obtentions à Sermaise, 91, en 2015), où 5 variétés étaient communes à la liste du projet FSOV et où, visuellement, l'enherbement en RGI semblait homogène. L'analyse de variance montre d'importantes différences entre variétés (N&K seuil à 10%) (Tableau 4). Caphorn (groupe A, 149 épis/m²) (Figure 4) compte deux fois plus d'épis de RG que Renan et Energo (groupe D, 60 à 70 épis/m²). Hendrix (groupe B) et Attlass (groupe C) sont intermédiaires. La variété explique 44% de la variance du nombre d'épis/m² de RGI ; l'effet variété-bloc, important (34% de la variance) et significatif, traduit l'hétérogénéité de l'enherbement en infestation naturelle.

épis RG~ variété+bloc+placette+variété:bloc

	p (10%)	% variance expliquée
variété	5,2E-14 ***	44%
bloc	1,5E-6 ***	11%
variété:bloc	2.1E-9 ***	34%
résiduelle		10%

	Sermaise 2015	
Variété	**épis RG/m²**	**N&K (seuil 10%)**
Caphorn	149	A
Hendrix	120	B
Attlass	95	C
Energo	70	D
Renan	60	D

Tableau 4 - *Analyse de la variance du nombre d'épis/m² de RGI dans l'essai de Sermaise 2015 du réseau de criblage Itab (5 variétés communes au programme FSOV « adventices »).*

Figure 4 - *Photo de l'essai de Sermaise 2015. Caphorn à gauche (ray grass visible) et Ehogold à droite.*

Capacité des variétés à tolérer la présence d'adventices

L'effet variétal sur la perte de rendement en présence de RGI est significatif dans les 3 essais en station en AC analysés. Les pertes sont les plus importantes à Epoisses 2013, de l'ordre de 70%. Elles sont de 60% en moyenne à Boigneville 2015 et 52% à Boigneville 2014. Le regroupement sur les 3 essais indiquent que ce sont les variétés Energo et Pireneo qui tolèrent le mieux la présence de RGI, suivies par Athlon puis Midas et Hybéry (Tableau 5). Leurs pertes de rendement sont 10 à 15% plus faibles, en présence de forte infestation de RGI, que pour Numeric, Hendrix et Glasgow.

Relations entre pouvoir suppressif et tolérance à la présence d'adventices

La réalisation de courbes de régression entre indicateurs du développement du RGI (biomasse et densité d'épis) et les pertes de rendement en blé mettent en évidence un lien, même s'il n'est pas aussi marqué qu'attendu. La biomasse du RGI explique 24% (Epoisses 2013) et 32% (Boigneville 2015) des variations de pertes de rendement (Figure 5). La densité d'épis explique 43% des variations de pertes de rendement à Boigneville 2015 (avec une forte corrélation entre biomasse de RGI et densité d'épis sur cet essai, r^2=0.65), mais aucune corrélation n'est mise en évidence à Epoisses 2013. Certaines variétés, comme Numéric et Energo, s'écartent des droites de régression à Boigneville 2015, laissant

supposer qu'Energo serait particulièrement tolérante à la présence de RGI et Numéric particulièrement sensible. La variabilité constatée entre sites confirme les références dans la littérature, où l'on observe à la fois des études qui montrent des corrélations entre tolérance et pouvoir suppressif (Balyan *et al.* 1991; Challaiah *et al.* 1986; Huel and Hucl 1996; Lemerle *et al.* 2006; Lemerle *et al.* 2001; Wicks *et al.* 1986) et d'autres qui ne mettent pas de relation en évidence (Coleman *et al.* 2001; Cousens and Mokhtari 1998).

%rdt ~ variété + essai + variété:essai + bloc%in%essai

	p (5%)	% variance expliquée
variété	5.5e-10***	18%
essai	< 2.2e-16 ***	51%
variété:essai	0.32	6%
essai:bloc	1.1e-06***	9%
résiduelle		17%

Variété	% perte rdt	N&K (seuil 10%)
Numeric	69,9	A
Hendrix	69,2	A B
Glasgow	69,2	A B
Acoustic	66,7	A B C
Caphorn	66,7	A B C
Renan	66,4	A B C
Oregrain	64,2	A B C D
Attlass	64,0	A B C D
Pegassos	62,2	A B C D
Apache	61,5	B C D
Hybery	60,5	C D E
Midas	59,3	C D E
Athlon	56,8	D E
Pireneo	54,5	E
Energo	53,9	E

Tableau 5 - *Analyse de la variance du pourcentage de perte de rendement selon les variétés dans le regroupement des essais Epoisses 2013, Boigneville 2014, Boigneville 2015.*

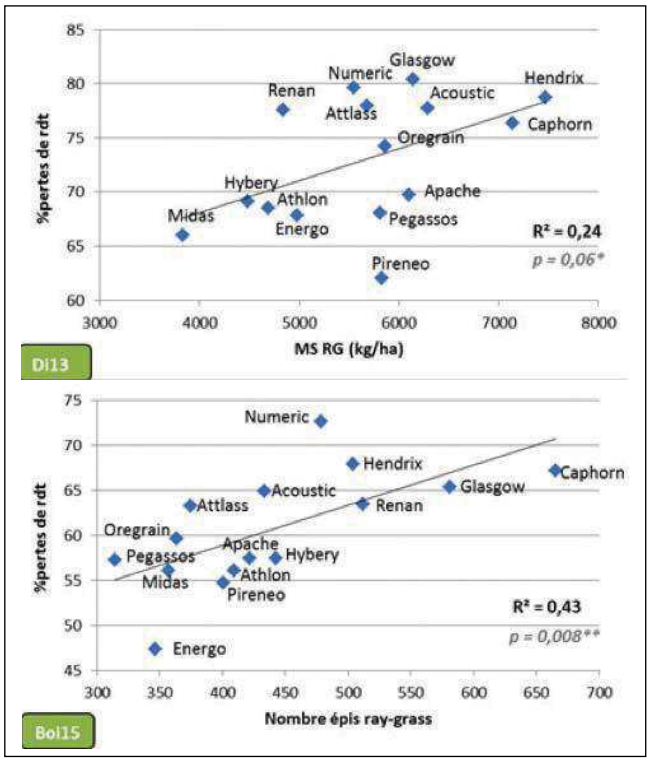

Figure 5 - *Relations entre les caractéristiques variétales explicatives du pourvoir concurrentiel (DI13 = Epoisses 2013 et Boi15 = Boigneville 2015).*

▶ 3.2 - Facteurs explicatifs du pouvoir concurrentiel

Etude de la hauteur (résultats marquants)

Les analyses de variance réalisées **dans les essais en AC** sur les notes de hauteur à 3 stades clés (2N -BBCH 32-, dernière feuille étalée (DFE) -BBCH 37-, et après stade floraison -BBCH 69-) nous montrent :

- que des groupes de hauteurs peuvent être distingués dès le stade 2N, en lien avec les précocités à montaison (10 cm séparent la variété la plus haute de la plus courte) ;
- qu'au stade DFE le caractère hauteur est très discriminant ;
- qu'après floraison (hauteur finale), les classements variétaux restent très stables entre essais et années.

Si les classements variétaux aux 3 stades restent sensiblement les mêmes, on note des différences de dynamiques pour certaines variétés. Ainsi Athlon, 3e variété la plus haute (sur 15) aux stades 2N et DFE a une hauteur finale dans la moyenne de l'ensemble. Oregrain présente le même type de comportement, dans une moindre mesure.

Dans les essais en AB, les mesures de hauteur finale permettent de bien discriminer les variétés, entre Energo la plus haute et Acoustic la plus basse. Entre ces deux extrêmes, l'amplitude des autres variétés, de Caphorn à Renan, fait moins de 10 cm. Peu de variétés dépassent 90 cm selon les essais, malgré leur potentiel, ce qui traduit le manque de développement du blé dans la plupart des conditions d'étude du programme.

Etude de la couverture du sol (résultats marquants)

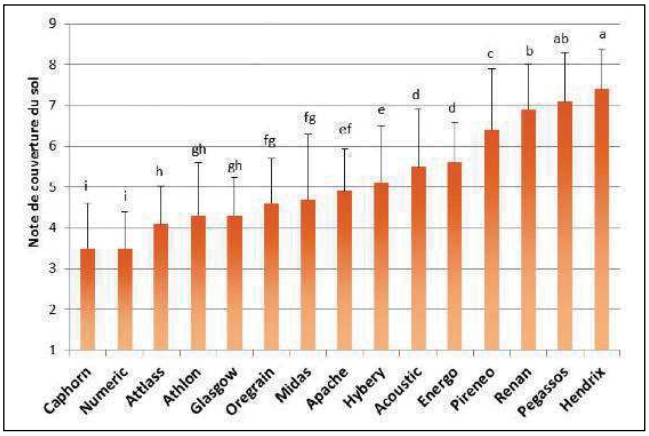

Figure 6 - *Notes moyennes de couverture du sol des 15 variétés présentes dans les essais en station au stade épiaison de Caphorn. Les lettres indiquent des différences significatives au seuil de 10%.*

Dans les essais en station en AC, le regroupement des 5 essais nous indique que les notes visuelles de couverture du sol au stade épiaison de Caphorn (variété repère de précocité moyenne) sont relativement stables entre essais. Le test de N&K (seuil à 10%) sur la couverture du sol discrimine bien les 15 variétés (le facteur variétés explique à 53% la variance des notes de couverture). Hendrix est en moyenne la variété la plus couvrante au stade épiaison, suivie par Pegassos, Renan et Pireneo (notées autour de 7, sur une échelle de 1 -sol nu entre les rangs- à 9 -rang fermé-) (Figure 6).

Dans les essais en AB, la note de couverture du sol au stade épiaison de Caphorn apparait aussi comme discriminante sur les 9 variétés étudiées (Figure 7). Renan et Pireneo sont ici aussi parmi les plus couvrantes à ce stade, suivie par Hendrix. Caphorn et Numeric, aux ports de feuille très dressés, sont les moins couvrantes. Des différences de classements entre sites sont observées pour certaines des autres variétés, en lien avec l'expression de la capacité de tallage et le port des feuilles plus ou

moins dressé, ces deux critères étant explicatifs de la couverture du sol à ce stade d'après les expérimentateurs. A noter que les notes de couverture du sol (de même que la hauteur finale) sont plus régulières entre essais en 2015, cette campagne n'ayant pas subi comme les deux années précédentes des contraintes de conditions climatiques défavorables au développement du blé.

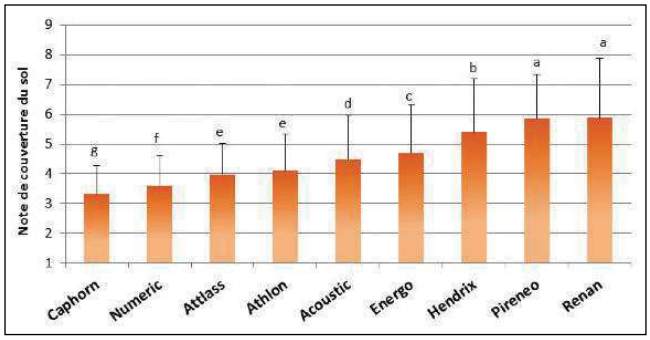

Figure 7 - *Notes moyennes de couverture du sol des 9 variétés présentes dans les essais en AB au stade épiaison de Caphorn. Les lettres indiquent des différences significatives au seuil de 10%*

Analyse des facteurs explicatifs

Diverses analyses statistiques ont été menées afin d'identifier, parmi les variables phénotypiques et phénologiques du blé, celles qui participent le plus à l'explication du pouvoir concurrentiel. Cet article en présente les résultats les plus marquants.

Dans les essais en station en AC, une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée sur le regroupement des 3 essais Epoisses 2013, Boigneville 2014 et Boigneville 2015 (au préalable des ACP ont aussi été réalisées par essai). L'ACP indique que la hauteur est le critère le plus explicatif des variables associées à l'aptitude à la concurrence vis-à-vis des adventices. La biomasse du blé tendre, corrélée à la hauteur, apparait aussi comme liée à la capacité à tolérer la présence de RGI et à en limiter le développement (Figure 8).

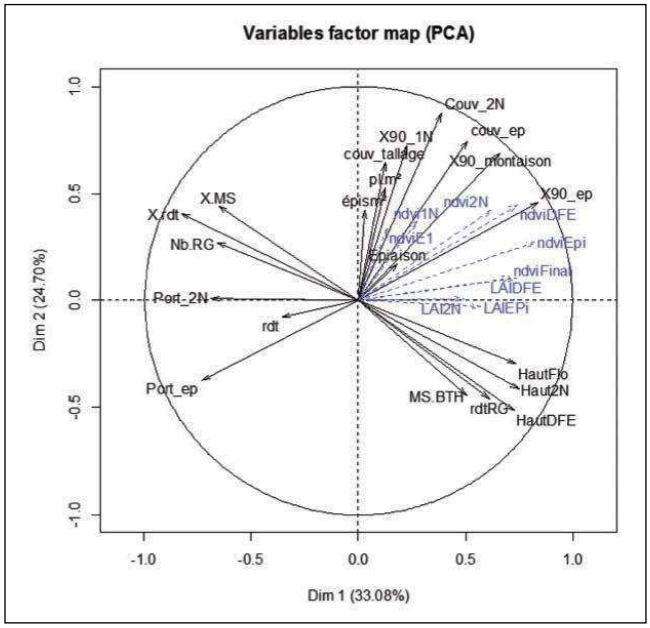

Figure 8 - *Analyse en composantes principales sur les valeurs moyennes des variables mesurées dans les essais en station. Les variables "NDVI" et "LAI" sont illustratives, ces données provenant des essais Epoisses 2014 et 2015 non prise en compte dans le regroupement.*

Cette première analyse des liens entre variables a servi de support pour l'établissement de modèles de régression multiple, pour ensuite classer les facteurs explicatifs. Des simulations ont été réalisées sur l'ensemble des modèles possibles en fonction du nombre de variables explicatives en jeu. Les modèles ont été classés selon leur qualité, évaluée par le coefficient de détermination (R^2). Le nombre d'individus en jeu étant relativement réduit (15 variétés) pour un nombre de variables explicatives élevées (entre 21 et 23), le choix du nombre de prédicteurs a été limité à 3 pour éviter tout phénomène de sur-paramétrage.

L'importance de la hauteur comme variable explicative du pouvoir concurrentiel (plus une variété est haute, plus elle est compétitive) est confirmée : elle ressort comme significative dans les 3 essais, en participant fortement à l'explication de la perte de rendement. Ce sont cependant les notes de hauteur en cours de montaison (à 2N -BBCH 32- et à DFE -BBCH 37-) qui sont les plus déterminantes dans la compétition avec le RGI, avant la note de hauteur finale (à floraison -BBCH 69-). De même, l'aire sous la courbe de l'évolution de la hauteur au cours du cycle du blé apparait comme moins explicative que la hauteur en cours de montaison.

Bien que déterminante, la hauteur n'est pas le seul critère impliqué. D'importance secondaire, d'autres variables, corrélées entre elles, caractéristiques de la capacité à couvrir le sol, sont aussi explicatives de l'aptitude à la concurrence. Il s'agit des mesures d'indice de végétation (NDVI) en cours de montaison (stades épi 1 cm, 1N, 2N et DFE), et des pourcentages de vert issus d'analyse de photos prises au stade 1N à 90° par rapport au sol (appareil à la verticale au-dessus du couvert). D'autres composantes de la couverture du sol en fin de cycle sont aussi significatives (LAI à épiaison, NDVI à floraison, port et couverture du sol à épiaison).

Globalement, il ressort donc que la capacité à croître vite et précocement est déterminante dans la compétition avec le RGI. La capacité à couvrir le sol, en début de cycle plutôt qu'en fin de cycle, est un autre caractère d'intérêt, bien que moins déterminant.

Il est difficile de faire ressortir des critères plus explicatifs soit de la tolérance aux adventices, soit du pouvoir suppressif. Néanmoins, il semble, pour les essais analysés, que la hauteur porte un poids systématiquement très fort dans la tolérance à la présence de RGI, tandis que des composantes de la capacité à couvrir le sol sont plus souvent impliquées dans les explications du pouvoir suppressif (biomasse et de densité d'épis de RGI).

Dans les essais en AB, le premier enseignement est l'impact de la qualité de la levée sur la capacité du peuplement à limiter l'enherbement. En 2013 et 2014, les 2 années où il y a eu des problèmes de qualité de lot de semences pour certaines variétés conjuguées avec des conditions climatiques peu favorables à la croissance du blé, les densités de levée expliquent 50% de la biomasse des adventices sur la moyenne des essais (essais pour des CV des biomasses des adventices < 35%, *cf* Tableau 2) (Figure 9). La qualité de la semence et la réussite du semis apparaissent comme essentielles pour garantir l'expression de la capacité à concurrencer les adventices.

Par ailleurs, la recherche de variables explicatives a été menée sur les 3 essais pour lesquels l'effet de la variété sur la biomasse d'adventices avait été démontré, après retrait des variétés ayant mal levé. Sans surprise, les modèles de régression multiple sont moins prédictifs que ceux réalisés sur les essais en station, tandis que les prédicteurs de la biomasse adventice diffèrent selon les essais. A Auch 2015, la hauteur à 2N explique le mieux la présence des anthémis, adventice majoritaire. A Louvil 2014, le port à 2N est la principale variable détectée, les variétés au port le plus étalé étant les plus suppressives. A Carvin 2014, c'est la couverture au tallage, malgré des notes faibles (de 2 à 3.5 sur une échelle de 1 à 9), qui explique le mieux les biomasses des adventices dominées par la matricaire.

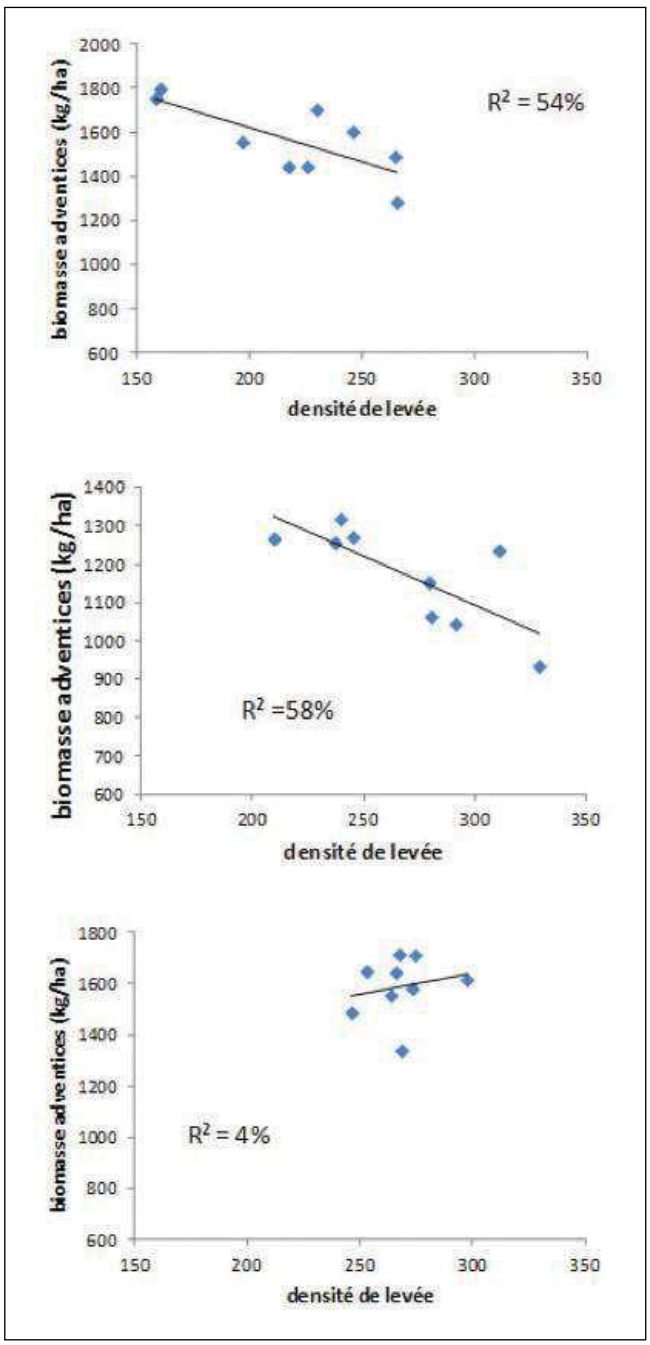

Figure 9 - *Relations entre densité de levée des 9 variétés étudiées et biomasse des adventices dans les essais en AB pour, de haut en bas, les années 2013 (4 essais), 2014 (4 essais), 2015 (6 essais).*

4. Apports méthodologiques

Le projet a permis de progresser en termes méthodologiques, sur divers aspects.

Recommandations pour la mise en œuvre de dispositifs expérimentaux

L'hétérogénéité de la présence d'adventices complexifie clairement l'analyse des observations qui sont réalisées. En infestation naturelle, prévoir 6 blocs semble un minimum, de façon à choisir les plus homogènes. En cas d'adventices simulées, il convient de maîtriser au mieux le semis et le développement de l'espèce choisie. La littérature nous cite les exemples d'utilisation de colza (Christensen 1995; Christensen S. *et al.* 1994), d'ivraie (espèce proche du ray-grass) (Lemerle *et al.* 1996), et de RGI (Worthington *et al.* 2015b).

Critères pour estimer le pouvoir suppressif ou la tolérance

Plusieurs enseignements peuvent être tirés des mesures et analyses réalisées.

(1) Le nombre d'épis de RGI est un bon prédicteur de la biomasse de RGI. Le comptage du nombre d'épis dans quelques placettes, plutôt que des mesures répétées de biomasse, est ainsi un indicateur alternatif intéressant à utiliser pour une estimation de l'effet variétal pour limiter la présence d'adventices (*cf* exemple de l'essai Sermaise 2015).

(2) Le ratio biomasse adventice / biomasse blé est plus discriminant dans les essais étudiés que la valeur absolue de la biomasse adventice (la part de variance expliquée par la variété est plus importante). En effet, lorsque le développement de RGI dans une variété est fort, celle-ci peine à produire de la biomasse. Cet indicateur traduit à la fois la capacité d'une variété à produire de la biomasse en présence d'une adventice (tolérance) et sa capacité à limiter le développement de cette adventice (pouvoir suppressif).

(3) En termes de précision, les estimations de pertes de rendement (coefficient de variation (CV) de 8 à 12% dans les essais en AC du projet) sont plus précises que les mesures réalisées sur adventices (CV entre 16 et 23% pour les biomasses et de 16 à 19% pour les nombre d'épis de RGI). Les pertes de rendement ne peuvent cependant être approchées que dans des essais en AC, avec désherbage de modalités pour les comparaisons.

(4) Les capacités à tolérer la présence de RGI (estimées par les % pertes de rendement du blé) et à limiter son développement (estimées par les mesures de biomasse et comptage d'épis de RGI) sont souvent corrélées (2 essais sur 3 dans le projet) mais sans que ce soit systématique (certaines variétés apparaissent plus tolérantes et d'autres plus suppressives).

Evaluer la couverture du sol par les variétés de blé

Le programme de recherche a permis de tester, comparer et valider diverses méthodes d'évaluation de la couverture du sol par les variétés de blé.

La prise de photos a ainsi été conduite sur plusieurs essais du programme.

Sur Epoisses 2013, des clichés ont été pris sur les 15 variétés et 6 blocs de l'essai, selon 2 angles de vue à 57° et 90° par rapport à l'horizontale, et 3 prises par micro-parcelles, soit 570 photos pour chaque stade photographié. Le GEVES a mené une analyse comparative des pourcentages de vert (donc de sol recouvert par la culture) issus d'analyses de ces images traitées par 2 logiciels, Satva (utilisé par Arvalis) et ImageJ (Image J 1.47V, Wayne Rasband, National Institute of Health, USA, d'accès libre, utilisé par le GEVES qui a développé sa macro de calcul du pourcentage de vert). Les deux logiciels permettent de classer les variétés de façon identique en fonction du pourcentage de vert.

Sur l'essai en AB de Rennes 2014, en l'absence d'adventices (donc pas de confusion de « vert » pour le traitement d'image), les mesures de pourcentage de vert ont été comparées aux notes visuelles de la couverture du sol, de fin tallage à floraison (6 dates successives d'observation). Les coefficients de corrélation sont tous significatifs, à l'exception de celui à fin tallage. Les deux méthodes établissent des classements variétaux sensiblement identiques, si ce n'est que la note visuelle est moins discriminante que le % vert calculé par analyse d'image en début de cycle, alors qu'à l'inverse elle permet une différentiation plus nette des variétés autour du stade épiaison (Figure 10).

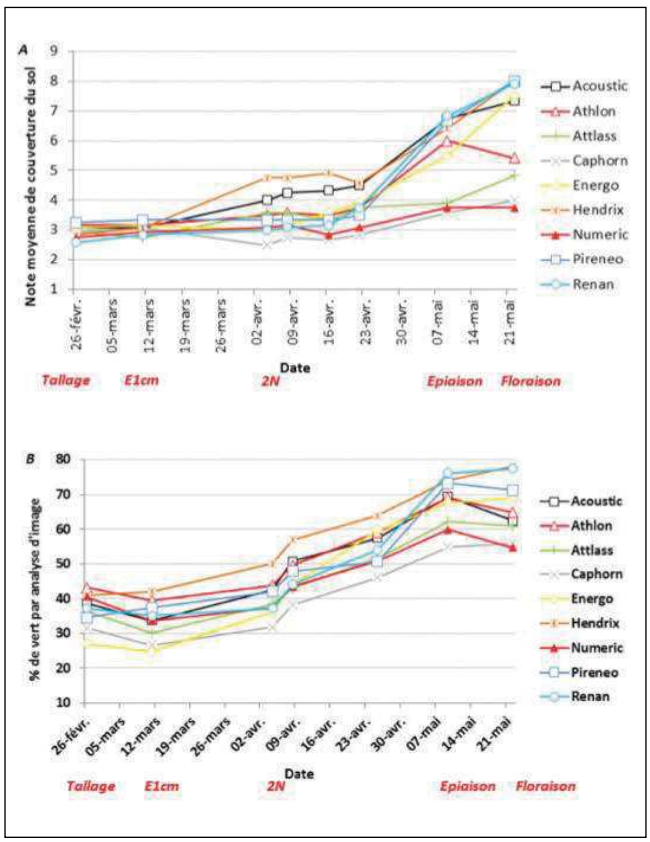

Figure 10 - Comparaison des couvertures du sol par notation visuelle (A) et analyse d'image (B) sur l'essai de Rennes 2014.

De même, à Epoisses 2013, la comparaison des deux méthodes de mesure (photos suivies d'une analyse d'image par Satva vs note visuelle) montre de bonnes corrélations et des classements inchangés en fonction de la méthode d'évaluation. Ces travaux ont aussi permis de montrer la meilleure précision, pour estimer la couverture du sol par le blé, des analyses d'images prises à 90° plutôt que celles prises à 57° (peu précises en fin de tallage, puis non discriminantes en fin de montaison, le couvert étant trop développé).

D'autres comparaisons menées sur les essais de Boigneville 2014 et 2015 confortent ces résultats.

A Epoisses 2015, l'INRA a aussi procédé à la comparaison des pourcentages de vert issus d'analyse d'images aux indices de végétation (NDVI, Différence Normalisée d'Indice de Végétation) obtenus par passage du GreenSeeker au-dessus du couvert végétal (il s'agit d'un capteur actif émettant ses propres sources de lumière). Les corrélations sont très bonnes, du stade épi 1 cm au stade épiaison (coefficients de corrélation allant de 0.92 à 0.96). L'indice de végétation (NDVI) apparait comme un bon indicateur de la couverture du sol par le blé, bien qu'il s'agisse initialement d'un outil informant sur la vigueur des plantes et leur capacité à absorber l'azote.

Le GreenSeeker présente l'avantage d'être rapide d'utilisation (passage au-dessus de la parcelle avec le capteur à bout de bras, en marchant), ce qui permet un usage répété à des dates rapprochées si l'on souhaite avoir un suivi fin de l'évolution de la couverture du sol au cours du cycle du blé et ainsi mieux capter les différences selon les dates et les stades (Figure 11).

Après comparaison des 3 méthodes d'évaluation de la couverture du sol, l'UE INRA d'Epoisses met en avant la souplesse d'utilisation du GreenSeeker et son coût modéré. La prise de cliché et l'analyse d'image se révèle consommatrice en temps (prise des clichés puis traitement des images) et exigeante en conditions météorologiques (lumière adaptée et nécessité d'homogénéité de la lumière d'un cliché à l'autre), avec un coût plus élevé. La notation visuelle reste la plus simple à mettre en œuvre, mais elle est moins précise que le Greenseeker et demande un temps d'apprentissage pour l'expérimentateur, même si le guide de notation vient en appui.

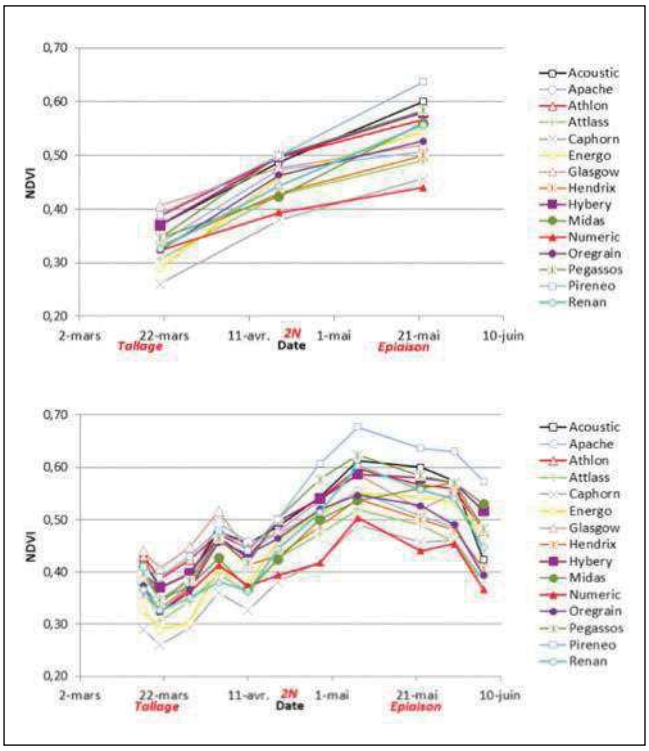

Figure 11 - Dynamique de couverture du sol estimée par NDVI sur Epoisses 2014. En haut 3 dates de mesure, en bas 11 dates.

Un guide de notation visuelle de la couverture du sol a en effet été formalisé dans le cadre du programme. Son objectif est de standardiser les notations visuelles (pour en limiter la subjectivité), en donnant un cadre méthodologique composé de photos de référence, prises en bordure de parcelle, depuis le point de vue du notateur. Trois stades-clés sont considérés : épi 1 cm (BBCH 30), qui marque le démarrage de la montaison ; 2N (BBCH 32) en début de montaison ; épiaison (BBCH 55) quand les différences entre variétés atteignent leur niveau maximal (notamment pour le port de la dernière feuille) (Figure 12).

La première étape a été de sélectionner les photos (issue de l'essai en AB Rennes 2014, où les adventices étaient absentes) pour composer une échelle de notation de 1 (sol nu visible entre les rangs) à 9 (inter-rang fermé, sol non visible). Dans un second temps, chaque note a été associée à la mesure du pourcentage de vert calculé à l'aide du logiciel ImageJ sur des clichés complémentaires, pris à 90°, de façon à valider la correspondance entre l'échelle et les notes attribuées. Enfin, une phase de validation opérationnelle a été organisée : un sondage a été effectué auprès des expérimentateurs du projet pour leur faire attribuer une note de couverture du sol aux photos du guide, en considérant que plus les notes étaient rapprochées entre expérimentateurs, plus la méthode était fiable.

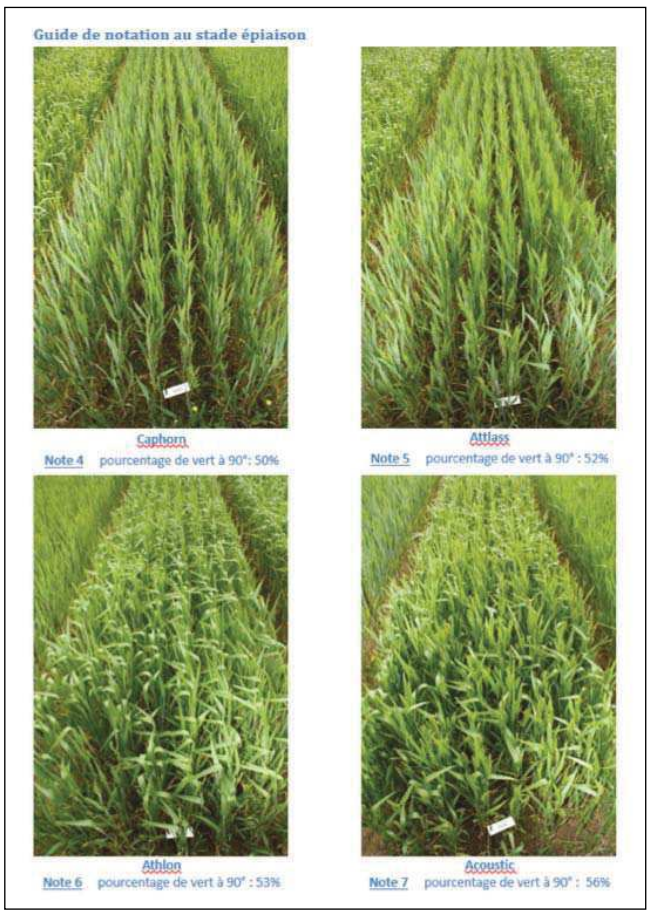

Figure 12 - *Extrait du Guide de notation de la couverture du sol par le blé tendre (INRA-ITAB, 2014). Photos de référence des notes 4 à 7 (sur une échelle de 1 à 9) pour le stade épiaison.*

5. Discussions et conclusions

Ce programme de recherche a à la fois permis d'acquérir des résultats sur la capacité des variétés de blé à concurrencer les adventices, mais aussi d'approfondir des méthodes d'évaluation de critères lié à ce pouvoir concurrentiel.

Des effets variétaux confirmés

L'effet variétal a ainsi pu être mis en évidence, malgré le nombre réduit d'essais exploitables, sur la **capacité du blé à limiter le développement d'adventices**, soit l'effet suppressif. Il peut s'apprécier via l'impact sur différents critères : la mesure de la biomasse adventice, ou encore le comptage du nombre d'épis de RGI s'il s'agit de l'espèce utilisée pour simuler les adventices. Par exemple, en situation de forte concurrence vis-à-vis du RGI testé en station (essai Boigneville 2015), on observe 68% de plus de biomasse de RGI développée dans la variété Caphorn que dans Oregrain, la variété la plus suppressive sur ce critère. Le nombre d'épis de RGI est en moyenne deux fois plus élevé dans Caphorn que dans la variété Pegassos (proche d'Oregrain).

L'effet variétal a aussi été démontré sur la **capacité des variétés à tolérer la présence d'adventices** (en l'occurrence le RGI) : en situation de forte concurrence, les variétés les plus tolérantes (Energo, Pireneo) ont des pertes de rendement 10 à 15% plus faibles que les variétés les plus sensibles (Numeric, Hendrix, Glasgow). Les variétés les plus suppressives ne sont cependant pas toujours les plus tolérantes, bien que les tendances globales soient respectées.

Un critère intéressant par ailleurs à calculer est le ratio biomasse adventices / biomasse blé, qui intègre à la fois les notions d'effet suppressif et de tolérance à la présence d'adventices.

Dans les essais en AB, les déficits accrus d'alimentation azotée constatés pendant le programme ont souvent limité le développement des variétés de blé et, de fait, la capacité à concurrencer les adventices, non significative dans ces situations. Les enseignements de **ces interactions entre adventices et état de nutrition azotée du sol** sont intéressants : il ressort que le pouvoir concurrentiel des variétés de blé vis-à-vis des adventices ne peut s'exprimer que si la céréale se développe correctement (la situation de déficit pouvant être rencontrée en AB). A l'inverse, il convient aussi d'être attentif à des niveaux de nutrition azotée élevés, qui peuvent plus profiter à des graminées adventices qu'à la céréale (situations en AB et en AC, *cf* exemple Epoisses 2015 où le RGI s'est « trop » développé, au détriment du blé), portant ainsi atteinte à l'effet variété recherché.

Facteurs explicatifs du pouvoir concurrentiel

Bien que l'étude de ce facteur n'ait pas été prévue initialement, les difficultés rencontrées dans les essais en AB nous ont montré l'importance d'une levée correcte pour garantir l'expression du pouvoir concurrentiel des variétés. La **qualité de la levée** apparait ainsi comme un facteur prépondérant pour atteindre un objectif de peuplement correct et donner des garanties quant au potentiel de développement du blé et donc sa capacité à concurrencer les adventices.

Les résultats des essais menés en AC, où du RGI simulait la présence d'adventices, indiquent que **la hauteur est le critère le plus explicatif** de la capacité des variétés à concurrencer du RGI : plus une variété est haute, plus elle est compétitive. Une analyse plus fine des résultats montre de plus que ce sont les notes de **hauteur en cours de montaison** qui sont les plus déterminantes. D'autres critères, bien que moins prépondérants, sont aussi explicatifs de l'aptitude à concurrencer les adventices. Il s'agit de variables, corrélées entre elles, caractéristiques de **la capacité à couvrir le sol**, plutôt en début qu'en fin de cycle.

Dans les essais menés en AB, où les infestations en adventices relèvent de flores variées et sont plus hétérogènes, les prédicteurs de la biomasse adventice diffèrent entre hauteur à 2N, port à 2N et couverture au tallage.

De façon générale, il ressort ainsi que **la capacité à croître vite et précocement, combinée à la capacité à couvrir le sol en début plutôt qu'en fin de cycle**, est déterminante dans la compétition avec les adventices. Le fait que Renan, variété couramment cultivée en AB, soit mal classée dans les essais du projet est peut-être à lier à sa tardivité à montaison et sa faible capacité à couvrir le sol en début de cycle (elle est couvrante en fin de cycle). Les interactions génotypes x environnement sont très fortes, car dans l'essai de Sermaise 2015 Renan est significativement moins envahi de ray-grass. Ceci montre le besoin de renouvellement variétal en AB, pour répondre aux attentes des producteurs.

Les résultats du projet **confirment les conclusions relevées dans d'autres études** repérées en revue bibliographique. La hauteur semble une composante particulièrement importante du pouvoir concurrentiel, notamment vis-à-vis d'espèces adventices graminées (Lemerle *et al.* 1996; Ruisi *et al.* 2015; Worthington *et al.* 2015a). Si la hauteur finale est souvent citée comme prédictive du pouvoir concurrentiel ((Benaragama *et al.* 2014; Drews *et al.* 2009; Feledyn-Szewczyk 2013; Huel and Hucl 1996; Mason *et al.* 2007; Zerner *et al.* 2008), une approche dynamique montre que la capacité à croître plus rapidement que les plantes voisines favoriserait une meilleure interception de la lumière et une plus grande aptitude à faire de l'ombre aux compétiteurs (Champion *et al.* 1998; Didon and Hansson 2002; Worthington *et al.* 2015a). La littérature indique également que l'aptitude à la compétition ne peut être attribuée à un

seul trait (Lemerle *et al.* 1996; Moss *et al.* 2004; Ruisi *et al.* 2015) : liée à la vitesse de croissance en hauteur, la vigueur initiale est un trait cité par de nombreux auteurs, de même que la couverture du sol, appréciée par différentes composantes comme le tallage, le port de feuilles, ou via des indices de surfaces foliaires tels que le LAI (Andrew *et al.* 2015, Worthington et Reberg-Horton 2013).

Mieux évaluer la couverture du sol, composante du pouvoir concurrentiel (apports méthodologiques)

Le **Guide de notation visuelle** est un outil intéressant pour tout praticien souhaitant évaluer la couverture du sol par le blé (ou une céréale de façon générale). Le référentiel donné par les photos, à plusieurs stades-clés, permet de limiter la subjectivité de ce type de notation. Les résultats des comparaisons de méthodes montrent de plus que la précision des notes attribuées visuellement est correcte.

Le Guide est téléchargeable en ligne, libre d'accès. Il a notamment été diffusé auprès des expérimentateurs conduisant des essais de comparaison de variétés de blé en AB. Il a aussi été diffusé au sein du GEVES et est utilisé dans les expérimentations VATE en AB mobilisées pour l'inscription de variétés de blé en AB au catalogue français. A noter aussi que deux des sélectionneurs associés au projet s'en servent régulièrement.

Pour gagner en précision en matière d'évaluation de la couverture du sol, notamment à des stades très précoces, l'utilisation de **photos prises à la verticale** permet de calculer des pourcentages de vert, après traitement d'image.

Plus souple d'utilisation, **le GreenSeeker**, fournit des indices de végétation (NDVI) qui sont apparus comme de bons indicateurs de la couverture du sol. Il permet un suivi fin de la dynamique d'évolution du couvert, les mesures pouvant être facilement répétées dans le temps.

Pistes de recherche

Plus faciles à étudier, ce sont essentiellement les traits phénotypiques aériens qui ont fait l'objet de recherche quant au pouvoir concurrentiel des variétés de blé, y compris dans ce projet. Or les interactions plante cultivée-adventices dépendent aussi **des traits souterrains**, mettant en jeu la compétition pour les ressources en eau et en nutriment, d'autant que l'on a déjà cité plus haut le poids du statut de nutrition azotée du sol. Les conduites de cultures économes en intrants, dont l'AB, avec une disponibilité en azote souvent limitante, pourraient bénéficier de **génotypes plus compétitifs dans l'absorption des éléments nutritifs** qui limiteraient en conséquence la disponibilité en nutriments pour les compétiteurs voisins. La bibliographie nous apprend que les variétés hautes de blé possèderaient une meilleure capacité d'absorption de l'azote (NUpE, nutrient uptake efficiency), avec une utilisation de l'azote principalement orientée vers la biomasse quand, chez les cultivars portant un gène de nanisme, l'utilisation de l'azote pour la production de grains est plus importante. Le taux de croissance jouerait ainsi un rôle important dans la capacité d'absorption de l'azote. Cette **relation entre hauteur et capacité d'absorption des nutriments**, déjà suggérée par Austin *et al.* (1977), est aussi soutenue par Wojciechowski *et al.* (2009) qui indiquent que les génotypes très courts peuvent être associés à un système racinaire réduit. Ainsi, alors que l'identification de génotypes utilisant l'azote plus efficacement est un objectif majeur des programmes de sélection pour l'agriculture biologique (Hoad *et al.* 2012), ce critère pourrait également concerner la thématique plus large de la compétitivité pour l'azote du blé vis-à-vis des adventices.

Que retenir du programme ?

Au final, on peut retenir que l'effet variétal du blé a été mis en évidence quant à sa capacité à limiter le développement d'adventices et à tolérer leur présence.

Le levier variétal fait donc partie des différentes techniques pouvant être mobilisées en agriculture biologique, utilisé dans le cadre de stratégies plus globales reposant sur la combinaison de leviers multiples (Chevassus-au-Louis, 2006). Reste à favoriser l'expression du pouvoir concurrentiel en mettant en œuvre des facteurs de réussite, tels qu'une levée correcte et des conditions de nutrition azotée suffisantes.

En agriculture conventionnelle, ce levier mériterait une plus large prise en compte en France où il reste mal connu. L'expansion de populations d'adventices résistantes aux herbicides, la diminution du nombre de matières actives autorisées et le raccourcissement des rotations sont des facteurs obligeant à la recherche de solutions alternatives. Tout comme en agriculture biologique, la combinaison de solutions est souhaitable pour en optimiser l'efficacité, d'où l'intérêt de mobiliser plus fortement le facteur variétal. On peut citer le cas de variétés de riz caractérisées par leur fort pouvoir concurrentiel désormais commercialisées aux Etats-Unis et en Chine, fruits de 30 ans de recherche et sélection. En Angleterre, le pouvoir concurrentiel des variétés de blé est un critère désormais pris en compte dans la gestion globale des adventices et promu auprès des agriculteurs (Andrew et al, 2015) : à caractéristiques agronomiques et technologiques par ailleurs égales, le choix du producteur est orienté vers la variété la plus compétitive. Ses capacités à concurrencer les adventices sont ainsi transcrites dans les supports au choix variétal.

Partenaires et remerciements

Tous nos remerciements aux partenaires de ce projet, qui rassemblait des acteurs de la recherche : INRA UE Dijon Epoisses, INRA UMR IGEPP Rennes, GEVES ; des acteurs du développement : ARVALIS - Institut du végétal, CREAB Midi Pyrénées, FDGEDA du Cher, Agrobio Poitou-Charentes ; des obtenteurs privés : Lemaire-Deffontaines, Saaten Union Recherche. Ce projet était coordonné par l'Institut Technique de l'Agriculture Biologique (ITAB). Il a par ailleurs bénéficié de l'appui de l'INRA UMR Agro-écologie de Dijon.

Nos remerciements s'adressent également aux agriculteurs ayant accueilli les essais sur leurs parcelles.

Références bibliographiques

Andrew IKS, Storkey J, Sparkes DL, Lotz B (2015) A review of the potential for competitive cereal cultivars as a tool in integrated weed management Weed Research 55:239-248 doi:10.1111/wre.12137

Appleby AP, Olson PD, Colbert DR (1976) Winter wheat yield reduction from interference by Italian rye-grass Agron J 68:463-466

Asif M, Iqbal M, Randhawa H, Spaner D (2014) Crop Competitiveness. In: Managing and Breeding Wheat for Organic Systems. SpringerBriefs in Agriculture. Springer International Publishing, pp 9-20. doi:10.1007/978-3-319-05002-7_2

Austin RB, Ford MA, Edrich JA, Blackwell RD (1977) Nitrogen economy of winter wheat J Agric Sci 88:159-167

Balyan RS, Malik RK, Panwar RS, Singh S (1991) Competitive ability of winter wheat cultivars with wild oat (Avena ludoviciana) Weed Sci 39:154-158

Benaragama D, Rossnagel BG, Shirtliffe SJ (2014) Breeding for Competitive and High-Yielding Crop Cultivars Crop Sci 54:1015 doi:10.2135/cropsci2013.04.0223

Bernicot MH et al. (2011) Des variétés rustiques concurrentes des adventices pour l'agriculture durable, en particulier l'agriculture biologique. In: Synthèse des programmes de recherche FSOV, Actes de la rencontre scientifique du 13 janvier 2011. pp 31-37

Challaiah, Burnside OC, Wicks GA, Johnson VA (1986) Competition between winter wheat (Triticum aestivum) cultivars and downy brome (Bromus tectorum) Weed Sci 34:689-693

Champion GT, Froud-Williams RJ, Holland JM (1998) Interactions between wheat (Triticum aestivum L.) cultivar, row spacing and density and the effect on weed suppression and crop yield Ann Appl Biol 133:443-453 doi:10.1111/j.1744-7348.1998.tb05842.x

Christensen S (1995) Weed suppression ability of spring barley varieties Weed Research 35:241-247

Christensen S., Rasmussen G., J.E. O (1994) Differential weed suppression and weed control in winter wheat Aspects of Applied Biology 40:335-342

Chevassus-au-Louis B. (2006). Refonder la recherche agronomique : leçons du passé, enjeux du siècle. Leçon inaugurale du groupe ESA, Angers, 27 septembre 2006, 29 pp. <http://www.espacesciences.org/servlet/com.univ.collaboratif.utils.LectureFichiergwID_FICHIER=3542 >

Coleman RD, Gill GS, Rebetzke GJ (2001) Identification of quantitative trait loci for traits conferring weed competitiveness in wheat (Triticum aestivum L.) Aust J Agric Res 52:1235-1246 doi:10.1071/ar01055

Cosser ND, Gooding MJ, Thompson AJ, Froud-WilliAm RJ (1997) Competitive ability and tolerance of organically grown wheat cultivars to natural weed infestations Ann Appl Biol 130:523-535 doi:10.1111/j.1744-7348.1997.tb07679.x

Cousens RD (1996) Comparative growth of wheat, barley, and annual ryegrass (Lolium rigidum) in monoculture and mixture Aust J Agric Res 47:449-464 doi:10.1071/ar9960449

Cousens RD, Mokhtari S (1998) Seasonal and site variability in the tolerance of wheat cultivars to interference from Lolium rigidum Weed Research 38:301-307

Didon UME, Hansson ML (2002) Competition between six spring barley (Hordeum vulgare ssp vulgare L.) cultivars and two weed flora in relation to interception of photosynthetic active radiation Biol Agric Hortic 20:257-274

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 doi:10.1111/j.1365-3180.2009.00720.x

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 J Food Agric Env 11:6

Goldberg DE (1990) Components of resource competition in plant communities. In: Grace JB, Tilman D (eds) Perspectives on Plant Competition. Academic Press, San Diego, CA, USA, pp 27-45

Grace JB (1990) On the relationship between plant traits and competitive ability In: Grace JB, D. T (eds) Perspectives on Plant Competition. Academic Press, San Diego, CA, USA, pp 51-66

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 doi:10.1007/s10681-008-9710-9

Hoad SP, Bertholdsson NO, Neuhoff D, U. K (2012) Approaches to breed for improved weed suppression in organically grown cereals. In: T. LvBE, R. MJ (eds) Organic Crop Breeding. Wiley-Blackwell, Oxford, UK, pp 61-76

Huel DG, Hucl P (1996) Genotypic variation for competitive ability in spring wheat Plant Breed 115:325-329 doi:10.1111/j.1439-0523.1996.tb00927.x

Jordan N (1993) Prospects for weed-control through crop interference Ecol Appl 3:84-91 doi:10.2307/1941794

Korres NE, Froud-Williams RJ (2002) Effects of winter wheat cultivars and seed rate on the biological characteristics of naturally occurring weed flora Weed Research 42:417-428 doi:10.1046/j.1365-3180.2002.00302.x

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 doi:10.1007/s10681-005-9056-5

Lemerle D, Verbeek B, Cousens RD, Coombes NE (1996) The potential for selecting wheat varieties strongly competitive against weeds Weed Research 36:505-513 doi:10.1111/j.1365-3180.1996.tb01679.x

Lemerle D, Verbeek B, Orchard B (2001) Ranking the ability of wheat varieties to compete with Lolium rigidum Weed Research 41:197-209 doi:10.1046/j.1365-3180.2001.00232.x

Mason HE, Navabi A, Frick BL, O'Donovan JT, Spaner DM (2007) The Weed-Competitive Ability of Canada Western Red Spring Wheat Cultivars Grown under Organic Management Crop Sci 47:1167 doi:10.2135/cropsci2006.09.0566

Mennan H, Zandstra BH (2005) Influence of Wheat Seeding Rate and Cultivars on Competitive Ability of Bifra (Bifora radians) Weed Technol 19:128-136 doi:doi:10.1614/WT-03-280R

Moss SR, Storkey J, Cussans JW, Perryman SAM, Hewitt MV (2004) The Broadbalk long-term experiment at Rothamsted: what has it told us about weeds? Weed Sci 52:864-873 doi:10.1614/ws-04-012r1

Ogg AG, Seefeldt SS (1999) Characterizing traits that enhance the competitiveness of winter wheat (Triticum aestivum) against jointed goatgrass (Aegilops cylindrica) Weed Sci 47:74-80

Ruisi P, Frangipane B, Amato G, Frenda AS, Plaia A, Giambalvo D, Saia S (2015) Nitrogen uptake and nitrogen fertilizer recovery in old and modern wheat genotypes grown in the presence or absence of interspecific competition Frontiers in plant science 6:185 doi:10.3389/fpls.2015.00185

Vandeleur RK, Gill GS (2004) The impact of plant breeding on the grain yield and competitive ability of wheat in Australia Aust J Agric Res 55:855-861 doi:10.1071/ar03136

Références bibliographiques *(suite)*

Wicks GA, Ramsel RE, Nordquist PT, Schmidt JW, Challaiah (1986) Impact of wheat cultivars on establishment and suppression of summer annual weeds Agron J 78:59-62

Wojciechowski T, Gooding MJ, Ramsay L, Gregory PJ (2009) The effects of dwarfing genes on seedling root growth of wheat J Exp Bot 60:2565-2573 doi:10.1093/jxb/erp107

Worthington M, Reberg-Horton C (2013) Breeding cereal crops for enhanced weed suppression: optimizing allelopathy and competitive ability J Chem Ecol 39:213-231 doi:10.1007/s10886-013-0247-6

Worthington M, Reberg-Horton SC, Brown-Guedira G, Jordan D, Weisz R, Murphy JP (2015a) Morphological Traits Associated with Weed-Suppressive Ability of Winter Wheat against Italian Ryegrass Crop Sci 55:50 doi:10.2135/cropsci2014.02.0149

Worthington M, Reberg-Horton SC, Brown-Guedira G, Jordan D, Weisz R, Murphy JP (2015b) Relative Contributions of Allelopathy and Competitive Traits to the Weed Suppressive Ability of Winter Wheat Lines Against Italian Ryegrass Crop Sci 55:57 doi:10.2135/cropsci2014.02.0150

Worthington ML, Reberg-Horton SC, Jordan D, Murphy JP (2013) A Comparison of Methods for Evaluating the Suppressive Ability of Winter Wheat Cultivars against Italian Ryegrass (Lolium perenne) Weed Sci 61:491-499 doi:10.1614/ws-d-12-00167.1

Zerner MC, Gill GS, Vandeleur RK (2008) Effect of Height on the Competitive Ability of Wheat with Oats Agron J 100:1729-1734 doi:10.2134/agronj2008.0068