

Gestion des adventices par l'agronomie et les agroéquipements : moyens mobilisables et perspectives

Pascale Métais (1), Ludovic Bonin (2), Benjamin Perriot (3), Caroline Desbourdes (4), Benoît De Solan (3)

(1) ARVALIS – Institut du végétal, Biopôle Clermont Limagne, 2 rue Henri Mondor, 63360 SAINT BEAUZIRE - FRANCE

(2) ARVALIS – Institut du végétal, 241 route de Chapulay 69330 PUSIGNAN – France

(3) ARVALIS – Institut du végétal, Station expérimentale de Boigneville, 91720 BOIGNEVILLE – France

(4) ARVALIS – Institut du végétal, 45 voie Romaine, Ouzouer le marché, 41240 BEAUCE LA ROMAINE – France

p.metais@arvalis.fr; c.desbourdes@arvalis.fr; b.perriot@arvalis.fr; l.bonin@arvalis.fr

Gestion des adventices par l'agronomie et les agroéquipements : moyens mobilisables et perspectives

Cette communication fait un état des lieux des connaissances actuelles sur la gestion agronomique des adventices des céréales, et analyse les possibilités offertes par les nouvelles technologies. Plusieurs essais de longue durée réalisés par ARVALIS Institut du végétal permettent d'évaluer l'effet des leviers agronomiques (travail du sol, rotation, couvert, date de semis et désherbage mécanique) sur l'évolution des populations adventices dans différents contextes pédoclimatiques. L'évolution du matériel permet aujourd'hui de mobiliser d'autres leviers complémentaires tels que le non bouleversement du sol lors du semis ou la récolte des menues pailles. Enfin, le développement des nouvelles technologies ouvre des perspectives en matière de gestion des adventices. Par exemple, il devient possible de biner des céréales semées à un écartement classique à l'aide d'un autoguidage RTK sur le tracteur ou d'un guidage par caméra sur la bineuse. Parallèlement, de nombreux acteurs travaillent à la mise au point de solutions de désherbage localisé, avec une détection d'adventices avant le traitement puis création d'une carte de préconisation, ou une détection et traitement en temps réel. Les intérêts et limites de ces techniques sont débattus.

Weed management by agronomy and agricultural machinery : mobilisable levers and prospects

This communication makes an assessment of current knowledges on weed management by agronomical methods, and analyzes the opportunity offered by new technologies. Several long term field trials were carried out by ARVALIS Institut du vegetal in order to evaluate the impact of agronomical levers (soil tillage, crop rotation, cover crops, sowing date and mechanical weeding) on weed development over different pedoclimatic contexts. Today, improvements on agricultural machinery make it possible to mobilize new means like chaff collection at harvest or low disturbance of soil at sowing. Last, the development of new technologies open possibilities for weed management. For instance, it becomes possible to hoe cereals sown with classical row spacing thanks to homers with RTK precision on tractor, or with hoe guidance by camera. At the same time, several stakeholders work on localized weeding; either by detecting weeds, creating an application map and then spraying, or by detecting weeds and spraying immediately. Interests and limits of these techniques are discussed

INTRODUCTION

Les difficultés de gestion des adventices en grandes cultures sont de plus en plus fréquentes. Ceci peut s'expliquer par plusieurs raisons concomitantes. Les rotations ont tendance à être raccourcies et simplifiées, le non labour est de plus en plus fréquent surtout avant l'implantation des cultures d'hiver, le nombre de matières actives disponibles pour gérer les adventices diminue et des phénomènes de résistances ou d'érosion de l'efficacité des herbicides apparaissent. Dans ce contexte, il est nécessaire de concevoir la lutte contre les adventices à l'échelle du système de culture, et combiner différents leviers agronomiques, mécaniques et chimiques, en intégrant à la fois des solutions préventives et curatives.

Un certain nombre de leviers agronomiques sont bien connus (Arvalis-Institut du végétal, 2017), mais pas toujours mis en œuvre pour des raisons pratiques (manque de matériel, de jours disponibles...) ou économiques (temps de travail, débouchés...). Parallèlement, de nouvelles techniques et technologies voient le jour et pourraient constituer de nouvelles briques pour construire une stratégie de gestion des adventices.

Le but de cet article est de faire un état des lieux des connaissances sur les possibilités de gestion des adventices offertes par l'agronomie et les agroéquipements, et d'identifier les possibilités pour l'avenir. Une première partie développera l'avancement des connaissances sur les leviers agronomiques : quels niveaux d'efficacité en attendre, comment optimiser leurs mises en œuvre et quelles sont les conséquences économiques ? Ensuite, de nouvelles solutions permises par l'évolution du matériel agricole seront présentées. Enfin, nous verrons ce que les nouvelles technologies peuvent apporter aux moyens de contrôle des populations d'adventices.

1. LEVIERS AGRONOMIQUES

Compte tenu des difficultés de gestion des adventices (problèmes de résistance, fortes densités, pression sociétale vis-à-vis de l'usage des herbicides, etc...), le raisonnement du désherbage en culture ne peut plus uniquement reposer sur les herbicides (Kudsk et Streibig, 2003). Une gestion de la flore adventice intégrée au système cultural est nécessaire pour répondre aux nombreuses contraintes auxquelles est soumis l'agriculteur dans la conduite de ses cultures (économiques, réglementaires et techniques). Les techniques culturales les plus influentes sur l'état de salissement d'une parcelle dans un milieu donné sont la succession culturale (plus précisément les alternances marquées de dates d'implantation et de couverture du sol des cultures), les modalités de travail du sol (labour intermittent, semis direct, etc...) et en dernier, les modalités de désherbage (produits utilisés, époque de passage et efficacité) (Jouy et Guilbert, 1998; Bàrberi et Lo Cascio, 2001; Cardina *et al*, 2002; Schwartz *et al*, 2015).

1.1. La rotation culturale

Pour une exploitation de grandes cultures, l'assolement, et la rotation culturale qui en découle, dépend en grande partie des critères de rentabilité économique et des débouchés, en adéquation avec les contraintes liées au contexte pédoclimatique.

Ensuite, la prise en compte des effets agronomiques peut apporter des bénéfices plus ou moins significatifs. L'effet de la rotation est toutefois difficile à quantifier intrinsèquement car l'introduction de nouvelles cultures implantées va modifier les possibilités d'utilisation d'herbicides mais également les modes d'implantation. Cet effet se mesure dans sa globalité tant par l'apport des possibilités de lutte en culture que par la diversité des dates d'implantation offertes par la diversité des cultures (Toqué *et al*, 2013). La rotation est efficace sur la plupart des flores, à l'exception des adventices germant indifféremment toute l'année (ex : pâturin annuel, matricaire camomille, véronique de perse...) et des vivaces. De fait, sur des adventices à saisonnalité marquée, la rotation des cultures, en alternant et en décalant les cycles "semis-récolte" des cultures et "levée-maturité" des adventices, peut réduire la pression en adventices d'une parcelle (Cardina *et al*, 2002).

ARVALIS a suivi durant 8 campagnes un essai de longue durée à Epieds (27) dans l'objectif de quantifier l'impact de la combinaison de différents leviers agronomiques sur la dynamique des adventices. Cet essai compare une situation de référence, en colza/blé/blé en non labour, à diverses situations dans lesquelles les leviers agronomiques (travail du sol, rotation, date de semis) sont actionnés (**Tableau 8**).

Tableau 8 – Modalités étudiées dans l'essai de longue durée d'Epieds (27) de 2006 à 2014

Modalité	1	2	3	4	5	6	7	8
Travail du sol	Labour				Non labour			
Rotation	C/ B/ P/ B	C/ B/ P/ B	C/ B/ B	Mo no B	C/ B/ P/ B	C/ B/ P/ B	C/ B/ B	Mo no B
Date de semis du blé	Tardive	Précoce	Précoce	Tardive	Tardive	Précoce	Précoce	Tardive

C/B/P/B : succession Colza – Blé – Protéagineux – Blé ; CBB : succession Colza – Blé – Blé ; MonoB : Monoculture de Blé.

L'effet de la rotation sur l'abondance des adventices est notamment observable en comparant, toutes choses égales par ailleurs, les modalités 2 et 3 (**Figure 1**), ou les modalités 6 et 7. L'effet est particulièrement marqué sur les adventices sélectionnées par les cultures d'automne (blé et colza), c'est-à-dire le vulpin et le ray grass.

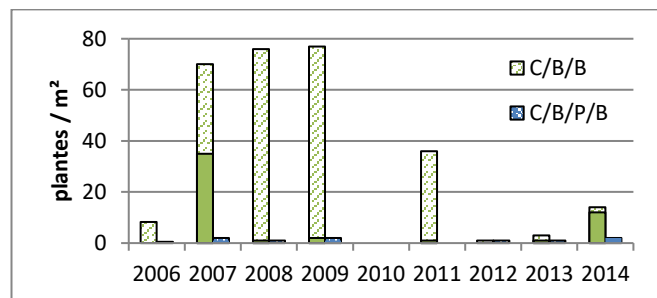


Figure 1– Effet de l'introduction d'une culture de printemps, à une rotation de référence, sur l'abondance de vulpin (trait plein) et ray grass (hachuré) dans les témoins non traités, en situation labourée. Essai ARVALIS à Epieds (27).

(C/B/B = succession colza/blé/blé et C/B/P/B = succession colza/blé/protéagineux de printemps/blé).

L'introduction d'une culture, ici un pois protéagineux de printemps, dont la période de croissance est décalée par rapport aux cycles de ces graminées automnales, limite leurs populations. Sur les 8 campagnes de l'essai, en rotation « longue » avec labour, le vulpin et le ray grass n'ont jamais posé de difficulté de gestion. Les adventices ont vu leurs densités moyennes, sur les 8 campagnes d'essai, réduites de 40% en situation labourée et 97% en situation non labourée. Même si en absolu, la situation labourée présente moins de graminées (-40% environ) par rapport à la situation non labourée, l'effet de la rotation est particulièrement visible sur les « fortes » populations de graminées, en situations où les leviers agronomiques sont peu mis en œuvre.

L'autre avantage de la rotation, et qui est important à prendre en compte lorsque des populations d'adventices résistantes sont présentes dans la parcelle, est la possibilité d'avoir accès à des herbicides aux modes d'action différents, voire nouveaux. La rotation des cultures permet donc de diversifier et alterner les herbicides utilisés pour réduire les risques de sélection de flore "à problème" et notamment des graminées résistantes aux inhibiteurs de l'ACCCase (groupe herbicide HRAC A) et inhibiteurs de l'ALS (groupe herbicide HRAC B), mais aussi des dicotylédones résistantes aux herbicides du groupe HRAC B et HRAC O. Ainsi, l'introduction d'une culture de printemps, le pois par exemple, permet l'accès à des modes d'action différents (ex : F2, F3, K2, etc...) sur graminées, bénéfiques à la gestion à long terme de ces populations. L'essai travail du sol de longue durée à Boigneville (91) illustre bien l'intérêt d'introduire de nouvelles cultures pour diversifier les modes d'actions herbicides utilisables (Métais *et al*, 2016) : après trente ans de monoculture de blé, les parcelles de l'essai conduites sans labour étaient envahies de ray-grass résistants aux herbicides des groupes A et B. La mise en rotation de ces parcelles depuis 2011 a permis d'utiliser de nouveaux modes d'action et a contribué à revenir à une situation correcte en 2016 sans réintroduire de labour.

D'un point de vue économique, la destruction de la culture puis la mise en rotation pénalise la marge brute dans les premières années, mais les pertes sont récupérées en 2 à 3 ans suivant le mode de travail du sol. En travail superficiel, la mise en rotation a permis d'augmenter fortement le cumul de marge brute sur 6 ans car la monoculture de blé était trop peu productive, en partie à cause du ray-grass.

1.2. Le travail du sol

Le travail du sol est le second levier agronomique qui permet de gérer la flore adventice

1.2.1. Le labour

Le labour (travail profond avec retournement) est efficace pour gérer les adventices à taux annuel de décroissance élevé (vulpin, bromes, ray grass, etc...) (Vuilloud *et al*, 2006; Lutman *et al*, 2013). En retournant le sol, le labour limite la proportion de graines en capacité de germer dans les horizons superficiels (Swanton *et al*, 2000). Ceci a toutefois un inconvénient : en enfouissant les graines, le labour a tendance à favoriser, sur le long terme, les espèces à forte dormance avec un taux annuel de décroissance faible (tels que les chénopodes, véroniques, et la plupart des dicotylédones).

Le stock semencier (réalisé par méthode simplifiée : par germination), sous 3 régimes de travail du sol (labour, travail superficiel et semis direct), dans l'essai longue durée ARVALIS de Boigneville (91) montre une évolution de la répartition par horizon, entre le début de l'essai (1971) et 2012. En ne retournant plus le sol, les techniques de semis direct et travail superficiel concentrent en surface les semences (**Figure 2**).

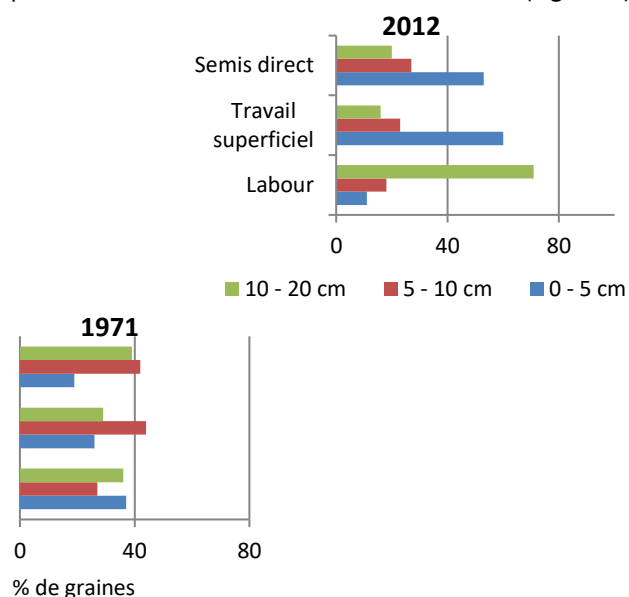


Figure 2 – Répartition du stock semencier (fraction de graines capables de germer) en fonction de la profondeur et de la modalité de travail du sol, entre 1971 (date de mise en place de l'essai) et 2012. Essai longue durée ARVALIS à Boigneville (91).

Ainsi, en situations sans inversion des couches de sol, les graines sont principalement réparties dans l'horizon supérieur. Cette concentration en surface, (quantitativement supérieure aux situations labourées), facilite leur germination et, très souvent, explique les fortes densités d'adventices observées en non labour (Cardina *et al*, 1991; Spandl *et al*, 1999).

Théoriquement, si le désherbage en culture était suffisamment efficace, la production de graines d'adventices (P) dans les systèmes sans inversion de sol, dont le semis direct, devrait être réduite et, au fil du temps, les levées en cultures seraient de plus en plus limitées. En raison de l'épuisement plus élevé du stock semencier (E) dans ces situations non labourées (pas de dormances secondaires, pas de ré-enfouissement de graines, etc...), nous pourrions observer, à long terme, une réduction de la taille de la population (à savoir $E > P$). Malheureusement, cette situation est très rarement rencontrée car, sur le terrain, le désherbage est rarement complet, avec, *in fine*, la reconstitution d'un stock semencier de surface et par voie de conséquence, des infestations plus importantes. Au travers des suivis d'adventices réalisés sur l'essai de longue durée de Boigneville de 2011 à 2017 en rotation maïs – blé, nous observons que la modalité de travail du sol a un effet significatif sur la densité totale d'adventices et la richesse spécifique ($p=0.0010$ et $p=0.0015$ respectivement). Le labour présente des densités d'adventices plus faibles que les modalités en semis direct et qu'une des deux modalités en travail superficiel sans labour. Si le labour est un levier efficace pour gérer les adventices, il n'en reste pas moins gourmand en temps : le travail superficiel et le semis direct permettent d'économiser respectivement 20% et 30% de temps de traction sur l'essai travail du sol de Boigneville (Levesque, 2017). A Epieds, le non labour réduit le temps de travail de 1,6h/ha. Par contre, les baisses de charges de mécanisation et carburant liées à l'abandon du labour sont compensées par des pertes de rendement et/ou des hausses d'intrants, notamment herbicides (Aliaga *et al*, 2015; Levesque, 2017).

1.2.2. Le faux-semis

La technique du faux-semis consiste à stimuler, autant que possible, la germination des adventices avant le semis de la culture. Les adventices ayant levé sont ensuite détruites par le prochain passage d'outil ou par l'application d'un herbicide non sélectif (glyphosate). Ainsi, lors du semis, le stock de semences de ces espèces, susceptibles d'émerger avec la culture, est déjà partiellement épuisé et leur émergence est *de facto* réduite. De toute évidence, la mise en œuvre de cette technique implique 2 conditions essentielles. D'une part, il est nécessaire que le faux-semis soit positionné en fonction de la période de levée de l'adventice ciblée. D'autre part, la technique doit être préférentiellement menée sur un sol avec une certaine fraîcheur et avec un travail du sol superficiel (2 à 4 cm maximum) appuyé, afin de maximiser les levées d'adventices. Par conséquent, cette méthode est inutile lorsque la disponibilité en eau dans le sol est limitée et/ou lorsque l'adventice n'est pas apte à germer (ex : vulpin au mois d'août). Toutefois, certains auteurs ont noté des efficacités intéressantes du faux-semis, de l'ordre de 80%, par rapport à une préparation classique du lit de semence, sur céréales (Van Der Weide *et al*, 2002) comme sur maïs (Cloutier et Leblanc, 2002). Cependant, le faux-semis trouve un réel intérêt avec un décalage de la date de semis, afin d'épuiser significativement le stock semencier de surface, et limiter, par le décalage, les levées dans la culture.

Un essai a été mis en place par ARVALIS, à Crestot (27) en 2013, afin de quantifier l'effet du type de faux-semis sur les levées de ray grass.

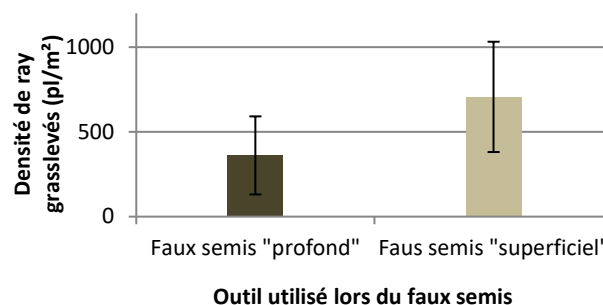


Figure 3 – Densité de ray grass levés à l'interculture en fonction du type de faux-semis réalisé. Essais ARVALIS à Crestot (27) en 2013-2014 et 2014-2015.

Le faux-semis « profond » correspond à un passage de déchaumeur à disque indépendants à 10 cm de profondeur. Le faux-semis « superficiel » correspond au même passage d'outil couplé à une herse rotative, avec une profondeur de 5 cm. Le passage des outils a été réalisé en septembre et le comptage a eu lieu un mois plus tard.

Les comptages (**Figure 3**), réalisés 1 mois après passage des outils, montrent des levées 68% plus importantes dans la partie déchaumée superficiellement et affinée (déchaumeur à disque indépendant puis herse rotative à 4cm) par rapport au travail plus profond (déchaumeur à disque indépendant à 10 cm). Ces résultats confirment ceux obtenus précédemment à Boigneville (Chassine *et al*, 2009). Il est toutefois nécessaire de bien évaluer la nécessité d'un faux-semis. Ceux-ci peuvent présenter des inconvénients, notamment en limons battants, avec un affinement excessif de l'horizon supérieur, défavorable à l'implantation de la culture et sujet à la prise en masse avec le retour des pluies. Par ailleurs, en conditions séchantes, ils auront tendance à assécher excessivement le lit de semences pour la culture. Enfin, la création de conditions favorables à la germination lors du faux semis pourrait induire la sortie de dormance de certaines graines, et ainsi faciliter leur germination dans la culture suivante.

1.3. Autres leviers agronomiques

Deux leviers complémentaires aux précédents peuvent être utilisés pour gérer durablement les adventices : le décalage des dates de semis des céréales à paille d'hiver et l'utilisation de couverts végétaux en interculture

1.3.1. Le décalage de la date de semis

Le décalage de la date de semis, en céréales à paille, est une technique efficace pour esquiver une partie des levées de certaines adventices avant la fin du créneau de semis possible de la culture. Dans le cas des céréales d'hiver (blé et orge), la date de semis est, pour partie, liée au précédent cultural. La précocité des semis est un facteur favorable à la densité et à la précocité des levées d'adventices. Vis à vis de certaines espèces (bromes, ray-grass, vulpin, etc...), un semis plus tardif, seul ou idéalement couplé à des faux semis, peut permettre de réduire les niveaux d'infestation dans la culture. De nombreux auteurs ont noté cet effet, aussi bien sur cultures d'hiver que printemps (Vandersteen, J. *et al*, 2011; Lutman *et al*, 2013; Cloutier et Leblanc, 2002).

Un essai a été conduit par ARVALIS Institut du végétal à Mespuits (91), en 2016-2017, sur blé tendre, afin de quantifier l'effet du retard de la date de semis sur les levées de ray grass dans la culture. Le blé a été semé à trois dates différentes.

(01/10/2016 ; 20/10/2016 et 10/11/2016).

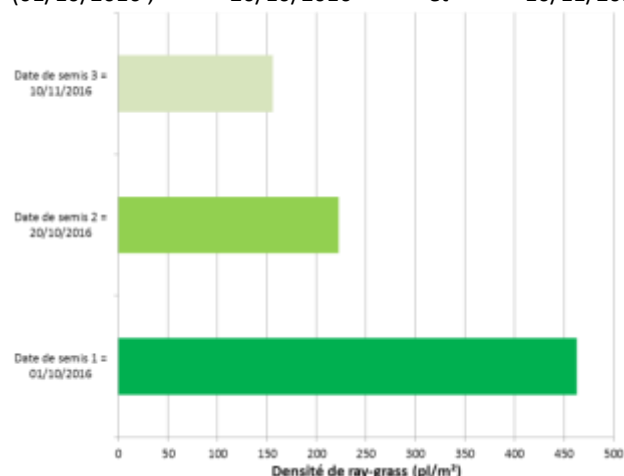


Figure 4 – Densité de ray grass levés en fonction de la date de semis du blé. Comptages réalisés en sortie d’hiver 2017. Essai ARVALIS de Mespuits (91).

Les différences de densité de levées de ray grass sont visibles entre les 3 dates de semis (**Figure 4**). Le décalage de la date de semis de 20j ou 40j permet de limiter respectivement de 51% et 66% les levées des ray grass. D’autres essais ont été mis en place afin d’étudier l’effet sur vulpin. Les chiffres sont sensiblement identiques, avec des diminutions proches de 50% et 98% respectivement pour des semis de mi-octobre et fin novembre, par rapport à un semis de référence début octobre. Cet effet bénéfique sur la flore adventice pourrait être contrebalancé par d’éventuelles pertes de rendement. Cependant, les analyses économiques (marges brutes) montrent l’intérêt des dates de semis retardées (en particulier les dates dites « intermédiaires » vers mi et fin octobre), du fait d’une moindre nuisibilité des adventices (densités limitées) et d’une meilleure optimisation des programmes herbicides (efficacités supérieures, en lien avec les densités plus faibles d’adventices). Le choix du cultivar adapté permet en partie de s’affranchir de cet effet négatif, en restant sur un décalage de date de semis, par rapport à l’optimum, de 20 à 30 jours. Enfin, le décalage de la date de semis dépend aussi des possibilités de semer à des périodes moins favorables (pluies, etc...). Il s’agit donc d’un levier efficace mais à mettre en œuvre de façon ponctuelle, sur les parcelles les plus difficiles à contrôler.

1.3.2. Les couverts

Les cultures intermédiaires sont de plus en plus présentes dans les systèmes céréaliers, que ce soit pour répondre à des exigences réglementaires ou pour les bénéfices agronomiques qu’elles peuvent apporter. Or ces couverts peuvent modifier le milieu, entrer en compétition avec les adventices et / ou limiter les possibilités de travail du sol pendant l’interculture et de lutte chimique.

L’effet de l’introduction de couverts végétaux pendant l’interculture sur les adventices a été évalué à partir de deux essais de longue durée implantés à Boigneville (91). Il en ressort que la présence d’une culture intermédiaire permet de limiter les repousses de culture pendant l’interculture. L’impact sur les adventices durant l’interculture est variable suivant les années, les essais et le mode de travail du sol. Enfin, aucune conséquence (ni positive ni négative) sur l’enherbement des cultures suivantes n’a pu être mise en évidence.

Plus généralement, les plantes de services contribuent à limiter la levée ou le développement des adventices susceptibles de lever pendant leur durée de présence, (souvent différentes de celles qui lèvent en culture) mais leurs effets au-delà de cette période sont mineurs et masqués par d’autres leviers plus importants tels que le travail du sol (Métais *et al*, 2017).

1.4. Combiner les leviers pour maximiser les effets bénéfiques

Un essai ARVALIS a été implanté à Dienay (21) en 2007 afin de quantifier les effets combinés du labour et de la date de semis sur les populations de vulpins. Même si l’introduction d’un levier unique (labour ou le retardement du semis) permet de réduire fortement les densités de vulpin par rapport au non labour précoce (**Figure 5**), c’est bien la combinaison de ces deux leviers qui apporte le meilleur résultat.

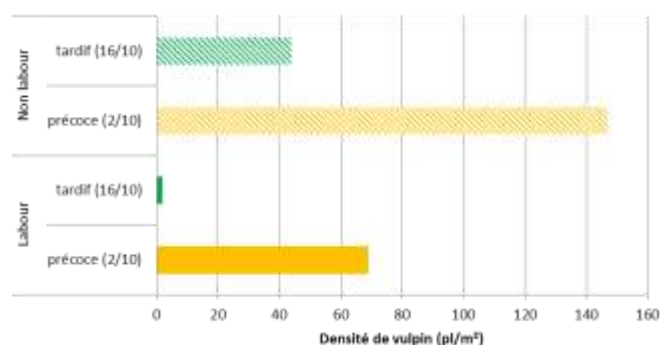


Figure 5 – Densité de vulpin en fonction de la modalité de travail du sol et de la date de semis du blé. Essai ARVALIS à Dienay (21) en 2007.

Semis précoce le 2/10/2007 ; semis tardif le 16/10/2007.

De manière générale, plus un système met en œuvre un grand nombre de leviers agronomiques, plus il est en mesure de gérer durablement les adventices.

Ainsi, dans l’essai d’Epieds (27), le système avec la rotation la plus longue, du labour et un semis tardif du blé est celui qui présente le moins d’adventices après neuf ans d’essai. Par contre, l’effet d’un seul levier est d’autant plus important que le système inclut peu de leviers efficaces (Vacher et Aliaga, 2015). Par exemple, nous observons sur l’essai d’Epieds que le labour permet de réduire de 91% la densité d’adventices dans le système en monoculture de blé et de 71% dans la rotation colza – blé – orge sans faux semis ni décalage de la date de semis du blé, mais seulement de 33% dans le système en rotation longue, avec faux semis et semis tardif du blé. Dans ce dernier système, la gestion des adventices étant déjà en partie assurée par la combinaison de nombreux leviers efficaces, l’apport supplémentaire du labour est moindre que dans un système plus fragile.

De même, on observe dans plusieurs essais (Boigneville (91), En Crambade (31)) qu’il est possible de gérer durablement les adventices sans labour lorsque plusieurs leviers dont la rotation sont mis en œuvre, et qu’il est possible également de maîtriser les adventices dans une rotation courte lorsqu’elle est labourée, mais que les systèmes sans labour ni rotation diversifiée dérivent très rapidement.

2. LE MACHINISME AGRICOLE SOURCE DE NOUVELLES SOLUTIONS PREVENTIVES

La réussite de certains leviers agronomiques est directement liée au choix du matériel. Par exemple, l'utilisation d'un outil de travail du sol très superficiel avec rouleau de rappui maximise le nombre de levées d'adventices lors d'un faux semis (Chassine et al, 2009). L'évolution du matériel agricole, voire la mise au point de nouveaux équipements, permet également d'enrichir le choix des leviers utilisables. Dans cette partie, deux leviers préventifs mobilisant des agroéquipements spécifiques sont détaillés : limiter le renouvellement du stock semencier à l'aide d'un récupérateur de menues pailles et éviter de provoquer des levées d'adventices lors du semis grâce au semoir de type semis-direct.

2.1. Récolte des menues pailles

De nombreuses adventices sont matures en même temps que les cultures, donc leurs graines peuvent être interceptées lors de la moisson puis exportées ou détruites. Ceci permet de limiter d'une part le renouvellement du stock semencier (Walsh et Powles, 2007) et d'autre part la dissémination des adventices (Shirtliffe et Entz, 2005). Cependant, cette interception nécessite un matériel spécifique pour collecter la menue paille : environ 75 % des graines d'adventices qui entrent dans la moissonneuse-batteuse se retrouvent dans la menue paille (Fogelfors, 1982; Walsh et Parker, 2002). Différents équipements de collecte des menues pailles ont été développés, depuis le premier système de « chaff cart » mis au point dans les années 90 en Australie jusqu'au système de broyage des menues pailles directement intégré dans la moissonneuse batteuse. En France, trois catégories d'équipements existent :

- Le système caisson : à la sortie des grilles, les menues pailles sont emmenées par des vis sans fin dans un caisson fixé à la moissonneuse et vidé en bout de champ.
- Le système turbine + remorque : un collecteur équipé d'une turbine réceptionne les menues pailles à la sortie des grilles et les projette dans une remorque (indépendante ou attelée à la moissonneuse).
- Le système turbine + dépose sur l'andain : au lieu d'être projetées dans une remorque, les menues pailles sont déposées sur l'andain puis pressées avec la paille.

D'autres systèmes sont développés à l'étranger, notamment en Australie :

- Le système turbine + dépose sur les passages de roue : les menues-pailles sont déposées sur le passage de roue des engins. Cette technique est utilisée dans le cadre du Controlled Traffic Farming.
- Le broyage ou la dévitalisation des adventices (Integrated Harington Seed Destructor) : les menues pailles passent dans une turbine qui les projette à grande vitesse contre des pales qui tournent en sens inverse. Le choc induit endommage le germe. La graine, devenue inapte à la germination, est ensuite laissée sur la parcelle.

Un essai est conduit par ARVALIS Institut du végétal depuis la moisson 2014 à Bois Herpin (91) avec un système turbine + caisson du constructeur Agri-Structures. L'objectif de l'essai est d'évaluer l'effet de la récolte des menues pailles sur l'évolution de la densité de ray-grass (Métais et al, 2016).

La densité de ray-grass est plus faible dans la modalité récoltée que dans la modalité éparpillée, et ce à chaque date de comptage (**Figure 6**). L'écart entre les traitements a tendance à s'amplifier au cours du temps, sauf lors de la récolte 2016. A plusieurs dates, la densité de ray-grass est significativement plus faible dans la modalité avec récolte des menues pailles.

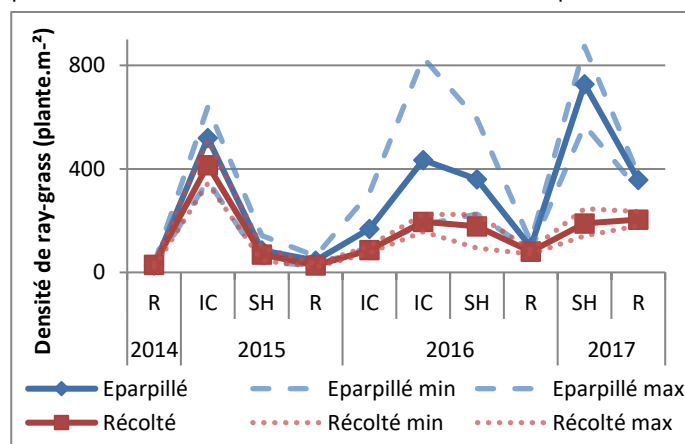


Figure 6 – Impact de la récolte des menues pailles sur l'évolution de la densité de ray-grass. Essai pluriannuel ARVALIS à Bois Herpin (91)

R : récolte, IC : interculture (deux comptages ont eu lieu à l'interculture 2016 car il y a eu deux faux-semis), SH : sortie d'hiver.

Cet essai met en évidence plusieurs points (Métais et al, 2016) :

- La récolte des menues pailles permet d'exporter une partie des graines de ray-grass lors de la moisson, et donc de limiter le renouvellement du stock semencier, mais dans des proportions variables suivant la maturité du ray-grass lors de la moisson.
- Au champ, la récolte des menues pailles a permis de ralentir l'expansion du ray-grass par rapport à la modalité avec éparpillement des menues pailles, mais ne suffit pas à l'arrêter dans ce système de culture (succession de céréales d'hiver en non labour).
- Les différences de densité de ray-grass observées à la sortie de l'hiver en 2016 et 2017 semblent se répercuter sur le rendement du blé.

La récolte des menues pailles apparaît donc comme un levier complémentaire de gestion des adventices. Cependant, son développement est actuellement limité par deux principaux freins techniques. Le premier d'entre eux est logistique, en lien avec la nature des menues pailles : il s'agit de petits débris de très faible densité, donc difficiles à reprendre en bout de champ, presser, transporter et stocker. Face à ce problème, des équipements pour presser les menues pailles en direct à la sortie de la moissonneuse se développent. L'autre frein est la rentabilité économique : la valorisation des menues pailles comme biomasse ne suffit pas à compenser les coûts de récolte des menues pailles.

2.2. Eviter de provoquer des levées d'adventices lors du semis

Les levées d'adventices sont favorisées par la réalisation d'un travail du sol juste avant une pluie ou sur un sol frais, ce qui est généralement le cas lors du semis. Le développement du semis direct, et donc des semoirs adaptés, permet maintenant de limiter le bouleversement du sol lors du semis à la seule ligne de semis. L'utilisation de ce type de semoir devrait donc éviter de provoquer des levées d'adventices lors du semis. Deux essais mis en place à Boigneville (91) en 2007 et 2008 confirment cette hypothèse (Chassine et al, 2009). Une nouvelle série d'essais, au Crestot (27) en 2014 et 2015 montre que le type d'outil utilisé lors du semis a un impact significatif sur le nombre de ray-grass levé dans le blé en sortie d'hiver (**Figure 7**). Quel que soit le déchaumage, profond ou superficiel, la densité de ray-grass en culture est supérieure lorsque le semoir à disques est combiné à un outil de préparation du sol par rapport à l'utilisation du semoir à disque seul.

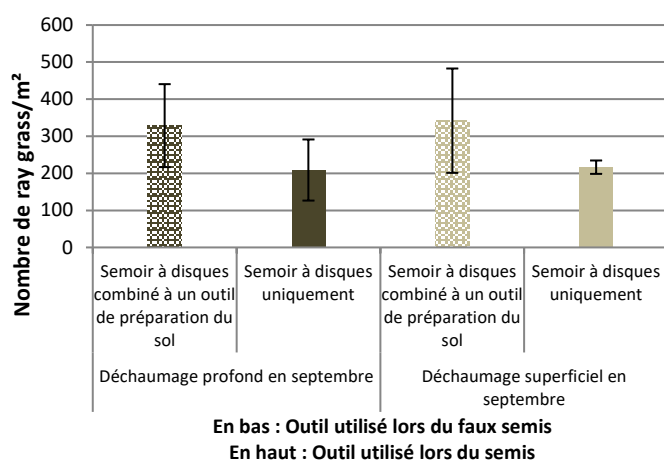


Figure 7 – Densité de ray-grass levés dans le blé tendre en sortie d'hiver en fonction du type de faux semis et de semis réalisés. Essai Arvalis à Crestot (27) en 2014 et 2015.

Comptages en sortie d'hiver dans les témoins non désherbés.

Des résultats similaires sont obtenus sur colza par Terres Inovia (Cadoux et al, 2015) : l'implantation du colza en semis direct, à vitesse réduite et sans flux de terre limite les levées d'adventices du colza (géranium principalement).

Le semis sans bouleversement du sol semble prometteur pour limiter les levées d'adventices en culture. Cependant, des essais complémentaires sont nécessaires pour évaluer l'interaction de cette technique avec la préparation du sol à l'interculture (Chassine et al, 2009), et avec le désherbage d'automne. En effet, l'efficacité des herbicides racinaires peut être réduite par la présence de résidus en surface. Enfin, cette technique de semis ne peut être mise en œuvre que si le sol est exempt d'adventices viables le jour du semis car le passage du semoir ne permettra pas de détruire les adventices.

3. LA LUTTE CURATIVE TIRE PARTIE DES NOUVELLES TECHNOLOGIES

Avec l'apparition du GPS dans les années 2000 et la miniaturisation de l'électronique, de nombreuses applications voient le jour. Dans un premier temps, leur objectif est d'optimiser la circulation du tracteur dans la parcelle en limitant les manques et les recouvrements que ce soit dans la parcelle ou avec les zones déjà épandues.

Mais elles permettent également d'envisager de nouvelles

interventions ou de les faciliter.

3.1. Biner les céréales grâce au guidage de précision

Le binage mécanique existe depuis de nombreuses années sur certaines productions mais il se heurte souvent à deux principales limites : le nombre de jours disponibles pour réaliser l'intervention en bonnes conditions, et la précision du guidage car le rang n'est pas travaillé.

3.1.1. Le guidage

La bineuse est l'outil de désherbage mécanique le plus efficace (Bonin et al, 2011), mais elle ne travaille que l'inter rang. De plus, la sélectivité du binage vis-à-vis des cultures repose uniquement sur la localisation des socs de la bineuse par rapport aux rangs de culture. Ceci a longtemps limité son utilisation aux cultures à fort écartement, dans lesquelles la surface à biner est importante et le guidage plus aisé. Plusieurs systèmes de guidage se sont développés et permettent maintenant de biner les céréales lorsque celles-ci sont semées avec un écartement suffisant (de l'ordre de 15 à 25 cm d'inter rang).

Le système de guidage le plus répandu est le guidage actif par caméra. Une caméra, située sur la bineuse, détecte un différentiel de hauteur ou de couleur entre un rang de la culture et le sol, ce qui permet ensuite d'ajuster la position de la bineuse à l'aide d'un translateur. De ce fait, la bineuse a des difficultés pour se guider lorsque la culture est versée, si les adventices sont trop denses et hautes, ou en présence de poussière. De plus, la bineuse doit avoir la même largeur que le semoir car le guidage est réalisé sur un seul rang.

Le développement de l'autoguidage du tracteur avec des précisions RTK (± 2 cm) facilitent également le guidage mécanique. Cette technologie permet au tracteur de revenir au même endroit et ce, quelles que soient les conditions de visibilité (nuit, vallon, ...). Ainsi, le chauffeur se concentre sur le travail de l'outil et non sur la conduite du tracteur. L'autoguidage RTK du tracteur limite donc la fatigue visuelle lors des chantiers de binage, mais peut également remplacer le guidage actif par caméra. Des tests réalisés à Boigneville (91) en 2013 et 2014 montrent qu'un autoguidage hydraulique RTK parfaitement paramétré, peut biner des céréales semées à 15 cm d'inter rang, avec des dents de 7,5 cm de large (Desbordes et al., 2015). Il est possible d'augmenter le débit de chantier au binage : lors du test, la vitesse du semis est de 6-7 km/h alors que celle du binage est montée à 13 km/h. Pour limiter les risques lors du binage, il est préférable d'utiliser un asservissement hydraulique. De plus, c'est le même tracteur qui doit semer et biner, pour que l'autoguidage se comporte de la même façon lors des deux interventions culturales. Compte tenu de la précision RTK, il est possible de biner avec une bineuse plus large que le semoir pour augmenter les débits de chantier.

L'utilisation de l'autoguidage hydraulique RTK comme seule source de guidage lors du binage est également étudiée en devers, à Montans (81). Plus la pente augmente et plus le semoir ou la bineuse se décalent derrière le tracteur (**Figure 8**). Les résultats indiquent que cette technique peut être utilisée seule jusqu'à 10 % de pente. Au-delà, il est nécessaire de disposer d'un guidage actif de l'outil. Cette technologie consiste à guider l'outil grâce à un GPS dédié, indépendamment de celui du tracteur.

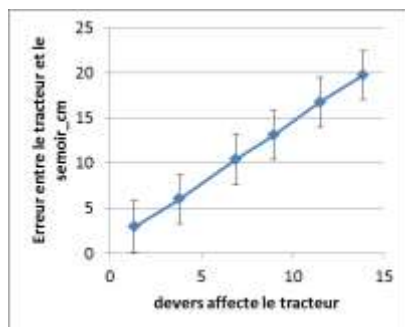


Figure 8 – Distance entre le passage du semoir et le passage du tracteur en fonction du dévers. Essais ARVALIS à Montans (81) en 2016.

3.1.2. Optimisations du binage

En plus du guidage, d'autres innovations sur les bineuses permettent d'optimiser leur utilisation. Nous pouvons citer l'élargissement des bineuses permettant d'augmenter le débit de chantier, l'intégration de ressort (ou vérins) de rappui individuel des éléments pour assurer un meilleur suivi du terrain, ou encore le relevage individuel des éléments assisté par GPS pour faciliter la gestion des pointes.

Enfin, certains constructeurs proposent actuellement des bineuses capables de désherber sur le rang entre les plants grâce à une détection individuelle des plantes cultivées, par caméra. Ces systèmes sont aujourd'hui destinées au maraîchage car le débit de chantier est limité et le coût du matériel élevé. Reste à savoir si les technologies développées dans ce contexte pourraient à plus long terme transférer vers les grandes cultures.

3.2. Localiser précisément le désherbage sur les adventices

Des solutions de traitement localisé des adventices sont en cours de développement. Leur détection est un préalable indispensable. Elle correspond à la mesure faite par un capteur et associée à un traitement de la donnée afin de mettre en évidence la présence d'une adventice, et éventuellement d'identifier son espèce.

3.2.1. Le couple capteur - vecteur

Un capteur est un « transducteur », ayant pour propriété de transformer une grandeur physique (lumière, pression, température, ...) en un signal électrique, en fonction de son intensité. Dans le cas de la détection des adventices, les capteurs utilisés sont sensibles à l'interaction de la lumière avec l'objet d'intérêt (la plante, la feuille, la culture). Deux paramètres influencent le type de mesures possibles. Le premier est la distance entre le capteur et l'objet, qui peut aller de plusieurs centaines de km (altitude des satellites SPOT : 820 km) jusqu'à des mesures de contact. Le second paramètre est la source de lumière, qui peut être naturelle (le soleil) ou artificielle (lampe halogène, LED...) : capteur passif ou actif. Le type de détecteur conditionne également les variables accessibles. Elles sont classées selon la résolution spatiale (du km² pour les satellites basse résolution au mm² pour les caméras) et la richesse spectrale (les bandes spectrales auxquelles le capteur est sensible). La résolution spatiale détermine la taille du plus petit élément détectable.

Le vecteur conditionne de son côté la fréquence d'acquisition, qui peut aller d'une fois par heure, pour des capteurs fixes, à une fois par mois ou par an pour des mesures manuelles (**Figure 9**).

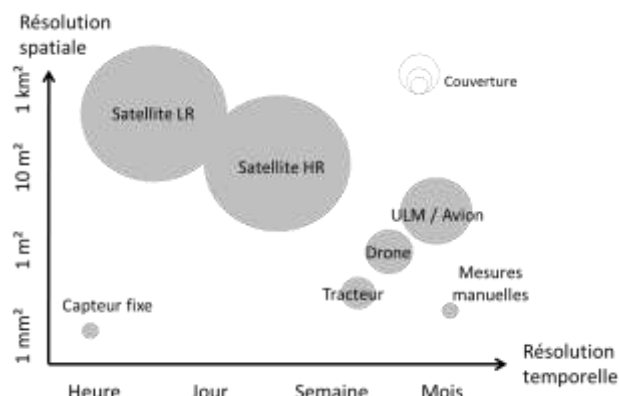


Figure 9 – Résolution spatiale, résolution temporelle et couverture spatiale de différents vecteurs utilisés pour acquérir des mesures de télédétection

Même si toutes les combinaisons entre vecteurs (satellite, tracteur, drone, avions, ULM, ...) et capteurs sont possibles, en pratique, les principales sont :

- capteur imageur visible (l'appareil photo numérique classique) qui présente l'avantage d'une très haute résolution spatiale (de l'ordre de 1 cm pour une acquisition à 100 m d'altitude), ou imageur multispectral (avec une résolution spatiale de l'ordre de 6 cm à cette même altitude), sur drone pour une action ultérieure
- capteur non imageur (NDVI) et imageur visible ou multispectral sur tracteur ou robot pour une action en temps réel ou ultérieure.

Le choix d'une solution d'observation (ou d'une combinaison) pour un usage donné résulte d'un compromis technico-économique.

3.2.2. Détection et cartographie des adventices pour une action ultérieure

La cartographie de présence des adventices par télédétection, étape préalable à l'élaboration d'une carte de préconisation, est un sujet travaillé depuis plus de 10 ans (Vioix et al. 2004). D'un point de vue technique, les données acquises doivent être précises : pour être efficace, l'intervention sur le terrain doit intervenir à un stade précoce de développement. Il faut donc pouvoir détecter des adventices de très petite taille et au bon moment.. La date de cartographie est un paramètre essentiel pour intervenir au bon stade de développement des adventices et de la culture. La détection doit être exhaustive pour générer une carte de préconisation à l'échelle de la parcelle.

Le traitement des données

Pour l'analyse des données, les méthodes classiquement utilisées sont des processus de classification de l'ensemble des pixels d'une image de la parcelle. Elles décident, pour chaque pixel de l'image, s'il s'agit de sol nu, d'une culture ou d'une adventice. La classification sol nu / végétation est en général assez simple, du fait du fort contraste de couleurs. La séparation entre la culture et les adventices est plus complexe, car il s'agit de végétation dans tous les cas. Pour cela, on peut s'appuyer sur des méthodes spatiales (position d'un pixel par rapport à ses voisins), des méthodes spectrales (couleur, ou plus largement composition spectrale du pixel) ou d'une combinaison de ces deux méthodes (Gée, 2017).

La classification culture / adventices par des méthodes spatiales consiste à détecter les rangs de culture, qui sont des structures régulières donc facilement identifiées.

Les pixels de végétation situés en dehors des rangs sont considérés comme des adventices. A une échelle plus fine, il est possible d'extraire la forme des adventices par ensemble de descripteurs (compacité de la forme, ramifications, ...) qui permettent, a minima, de distinguer monocotylédones et dicotylédones.

La classification sol / culture / adventices par les méthodes spectrales utilise les différences de composition biochimique des feuilles (teneur en chlorophylle, caroténoïde, pigments bruns, ...) et d'état de surface selon les espèces. Ces caractéristiques influent sur le spectre de réflectance qui peut être mesuré par des capteurs multispectraux. Ces différences peuvent être mises en évidence par des mesures en laboratoire. La transposition en plein champ est cependant complexe car les capteurs présentent une richesse spectrale limitée (4 à 6 bandes pour la plupart des caméras multispectrales du marché). De plus, les mesures sont passives, donc dépendantes de la lumière incidente dont la composition spectrale varie avec l'heure de la journée, la présence de nuages, etc... Etant donné la taille des pixels des images multispectrales (1 à 10 cm), les pixels sont rarement « purs ». Ils présentent souvent un mélange de végétation et de sol ou de culture et d'adventice. La biochimie des feuilles évolue également dans le temps, suivant le stade de développement des cultures et des adventices. Au final, la séparabilité entre cultures et adventices est fortement dégradée, lorsque l'on transpose au champ les résultats acquis en laboratoire.

La combinaison des deux méthodes précédentes est une option intéressante. La première étape est une classification sol / végétation sur la base de l'information spectrale. La seconde étape réalise, sur les pixels de végétation, une classification des pixels pour lesquels on a une forte probabilité d'appartenance à la classe culture ou adventices, sur la base de l'information spatiale (distance au rang). Ces pixels servent alors d'apprentissage pour définir le spectre de réflectance typique de la culture et celui des adventices. Les pixels de végétation pour lesquels subsiste un doute (car avec une position proche du rang) peuvent être affectés à une classe ou une autre sur la base de son information spectrale, en comparaison des classes définies dans la même parcelle.

Après la détection et l'analyse, l'application de précision

L'action de pulvériser a posteriori de la détection exige une précision extrême. Les deux vecteurs, le drone ou le tracteur lors de la détection et le tracteur lors de la pulvérisation doivent avoir la même référence spatiale pour que la buse ou le tronçon du pulvérisateur s'ouvre au bon moment. Pour limiter les problèmes liés au géoréférencement, c'est-à-dire à la localisation de l'adventice et des vecteurs, la précision du GPS doit être centimétrique. A l'heure actuelle, seule la correction RTK (Real Time Kinematic), précision absolue de 2 cm, permet de revenir sur un même point quelle que soit la durée entre les deux interventions (détection et application). Plus l'erreur de position est importante et plus la zone à traiter autour de l'adventice doit être grande pour ne pas la rater.

Une fois la carte de détection générée, une carte d'application est à construire (**Figure 10**). Elle dépend de plusieurs paramètres agronomiques et techniques. Dans les critères agronomiques, il faut citer les règles de décision qui permettent d'inclure ou d'exclure de la carte d'application des plantes isolées par exemple.

Dans les critères techniques, retenons avant tout la largeur des

tronçons du pulvérisateur.

Le délai pour que le produit arrive aux buses lorsque l'ordre est donné par la carte de préconisation est également à prendre en compte. Ces critères techniques définissent la zone minimale d'application même si l'adventice est isolée.



Figure 10 - Carte d'application sur chardons dans du blé tendre d'hiver

Les coupures de tronçons assistées par GPS permettent de répondre précisément à une carte d'application. Dans ce contexte, la carte de préconisation est une carte ouverture/fermeture (Perriot et al., 2013). En effet, quand la rampe du pulvérisateur passe au-dessus d'une zone à traiter, le ou les tronçons concernés vont s'ouvrir pour pulvériser à l'endroit souhaité. Aujourd'hui, les pulvérisateurs disposent de tronçons mesurant de 2m à 5m de large, voire davantage. La carte d'application doit être obligatoirement plus large que les contours de zones de la carte de détection. Les évolutions récentes en matière de pulvérisateur laissent penser que les tronçons vont aller de plus en plus vers des buses gérées à l'unité. L'ouverture et la fermeture de chaque buse est alors gérée individuellement. Aujourd'hui, les coupures buses par buses sont peu présentes sur le marché français. Elles existent chez un constructeur : Tecnomat. Cependant, il faut garder à l'esprit que plus la taille du tronçon est petit et plus la précision de localisation pour ouvrir la buse au bon moment est essentielle. Le paramétrage du système est primordial.

Pour aller plus loin dans l'application, nous pourrions imaginer non plus une carte de préconisation avec une seule dose de produit à appliquer mais une carte de préconisation avec différents produits et/ou différentes doses en fonction des adventices ou de leur stade par exemple. La technique d'injection directe, associée à un système de géoréférencement, permettrait de respecter ce type de carte : utiliser différents produits dans une parcelle et moduler leur dose en temps réel. Ce procédé permet de dissocier les produits phytosanitaires de l'eau dans le pulvérisateur. La cuve est ainsi remplie d'eau claire et les produits sont présents dans des cuves séparées prévues à cet effet. Les produits sont injectés dans le circuit de bouillie en direction des rampes du pulvérisateur. Différents systèmes sont testés depuis quelques années par Arvalis Institut du végétal : le SPID du constructeur SprayConcept et le SideKick Pro du constructeur RAVEN INDUSTRIES (Desbordes et Perriot, 2012). Tous ces systèmes fonctionnent et répondent favorablement à une carte de préconisation mais présentent des délais de réponse à la dose qui varient entre 60 et 80 secondes. Cela représente des distances importantes : plus de 100 m pour un tracteur à 10 km/h. La mise en pratique pour traiter localement des adventices n'est donc pas gérable actuellement. De nouveaux matériels arrivent aujourd'hui sur le marché et laissent présager des délais d'anticipation significativement réduits : de l'ordre de la seconde. Dans ces conditions, cette technologie retrouverait son intérêt pour des applications localisées. Le délai de ces nouvelles technologies reste cependant à évaluer.

3.2.3. Détection et application en temps réel

L'autre stratégie consiste à réaliser la détection au moment de passer l'outil de désherbage. L'intérêt est de se situer au plus proche de la culture, ce qui permet une détection potentiellement très fine des adventices. Les contraintes sont (i) une multiplication des capteurs pour observer tous les rangs et inter rangs de la parcelle lors du passage de l'engin ; (ii) une vitesse de traitement et une réactivité très élevées de l'outil de désherbage (mécanique ou chimique) pour prendre en compte la mesure réalisée lors du même passage.

Les capteurs de mesure sont généralement situés à proximité des actionneurs (buses de pulvérisation ou dents de binage) dont le fonctionnement est conditionné par l'analyse des données acquises. Deux grands types de capteurs peuvent être considérés, correspondant à des méthodes d'analyses différentes.

Les capteurs multispectraux non imageurs (Weedseeker de Trimble par exemple) mesurent la réflectance moyenne sur une surface d'environ 30 cm de diamètre pour une distance de mesure conseillée de 70 cm. Dans cette zone, qui peut être un inter-rang large ou des chaumes, la végétation est détectée par l'analyse de composition spectrale, ce qui déclenche l'ouverture de la buse du pulvérisateur. Cela est possible du fait de l'analyse très simple qui est faite des mesures : un dépassement de seuil. Dans le cas du Weedseeker, l'indicateur mesuré est le NDVI qui est la différence normalisée entre la réflectance dans le proche infrarouge, très élevée pour la végétation et moyenne pour le sol nu, et la réflectance dans le rouge qui, elle, est très faible pour la végétation et moyenne sur le sol nu.

Les capteurs imageurs (caméras RGB ou multispectrales) acquièrent des images avec une résolution spatiale de l'ordre du millimètre. Dans ce cas, l'image doit être analysée pour identifier des adventices. Chaque pixel de l'image doit être affecté à une classe (adventice, culture ou sol nu) comme dans le cas d'une analyse pour une application ultérieure. Les caractéristiques spatiales et spectrales des pixels peuvent être utilisées. La spécificité de ces données tient à la plus grande finesse d'analyse qui est possible du fait de la forte résolution spatiale. La forme de chaque plante individuelle peut être analysée, par sa surface, son périmètre, sa compacité, son nombre de feuilles, ... Les algorithmes d'intelligence artificielle valorisent particulièrement bien ces informations. En indiquant au logiciel à quelle classe appartient un pixel, il est possible de lui « apprendre » à reconnaître une forme similaire dans une autre image. Des travaux portent sur l'identification automatique des espèces, sur la base de la forme des feuilles. Ces méthodes sont en rapide développement actuellement et voient leurs performances progresser. La principale contrainte est le temps d'analyse, bien plus long que l'analyse des données issues de capteurs non imageurs, et qui limite, pour l'instant, son utilisation.

Une fois que les grandes catégories d'objets (rang de culture, sol nu, adventices) sont détectées, l'action de mise en œuvre du désherbage peut prendre plusieurs formes. La première est une aide au positionnement précis d'un outil mécanique au milieu du rang pour ne pas endommager la culture et passer au plus près du rang et de la culture. La seconde est une action chimique ou mécanique localisée sur une adventice détectée. Ces actions peuvent être mise en œuvre par un outil « intelligent » porté par un tracteur ou par un robot autonome.

Les deux cas de figures sont en cours de tests par Arvalis Institut du végétal. Le premier type d'approche peut être illustré par le système « Bilberry » dont le principe est d'avoir des capteurs sur la rampe du pulvérisateur. Pour l'instant, les capteurs produisent une carte de préconisation qui sera appliquée par la suite. L'objectif est, à terme, de commander instantanément l'ouverture ou la fermeture des buses en fonction des adventices présentes. Le robot autonome Ecorobotix, lui, est à ranger dans la seconde catégorie. Il détecte les adventices en temps réel grâce à une caméra et pulvérise à l'endroit souhaité à l'aide de deux bras. Il se guide grâce à la détection des rangs de la culture et fonctionne à l'énergie solaire.

CONCLUSION

La gestion des adventices est un enjeu majeur pour la production de grandes cultures, et notamment de céréales, et ne peut plus se limiter à une lutte chimique curative. En effet, l'efficacité de cette dernière s'érode, des populations d'adventices résistantes aux herbicides se développent et les matières actives autorisées sont de moins en moins nombreuses. Il est donc indispensable de faire appel à d'autres moyens de gestion des adventices. La construction de stratégies durables nécessite de raisonner à l'échelle du système de culture et de combiner un maximum levier pour obtenir une bonne maîtrise de l'enherbement.

Parmi les leviers mobilisables, la diversification de la rotation et le recours au labour sont les deux les plus efficaces, mais aussi les plus contraignants à mettre en œuvre. Le décalage de la date de semis dans les parcelles les plus sales est une option intéressante pour éviter les levées. Enfin, l'effet des faux semis et des cultures intermédiaires est surtout marqué à l'interculture.

Au-delà de ces leviers agronomiques classiques, les agroéquipements peuvent apporter de nouvelles solutions qu'il convient d'intégrer dans les stratégies de gestion des adventices. Ainsi, l'utilisation d'un semoir de semis direct pour limiter le bouleversement du sol lors du semis peut limiter les levées d'adventices de l'ordre de 30%. A la récolte, l'exportation des menues pailles permet de limiter le renouvellement du stock semencier. En parcelle fortement infesté de ray-grass, ceci se traduit à moyen terme par un moindre développement du ray-grass et une moindre perte de rendement.

Les agroéquipements destinés à la lutte contre les adventices bénéficient des avancées technologiques. Ceci permet d'améliorer la précision et le confort de travail, voire d'automatiser certaines tâches ou opérations.

Par exemple, le binage mécanique bénéficie de l'essor des systèmes de guidage, qu'ils soient positionnés sur la bineuse ou sur le tracteur. Ceux-ci augmentent la précision du binage et diminuent la fatigue visuelle du chauffeur. Par conséquent, il devient possible d'étendre cette technique aux cultures à faibles écartement telles que les céréales à pailles. Le recours au GPS permet de plus de relever automatiquement les éléments en fourrière.

Le matériel d'application des herbicides a également beaucoup évolué, améliorant la précision des applications. Dans la continuité, la localisation de la pulvérisation est un domaine d'avenir.

Celle-ci pourra avoir lieu en une seule étape (détection et application en temps réel) ou en deux (détection pour constituer une carte de préconisation, puis application). L'application en temps réelle se heurte actuellement au temps de traitement de l'image.

Si elle doit être très précise pour localiser les plus petites adventices, l'identification des pixels (sol, plante, adventice) ralenti le débit de chantier. Lorsque la détection est décalée par rapport à l'application, le temps de traitement de l'image n'est plus une contrainte. Par contre, la constitution de la carte de préconisation demande une précision absolue pour que les buses ou les tronçons s'ouvrent bien au-dessus des adventices.

Bien que de nouvelles perspectives s'ouvrent avec l'évolution

des agroéquipements et des technologies embarquées, certaines limites demeurent, telles que les contraintes en termes de nombre de jours disponible et de débit de chantier nécessaire.

D'autres techniques innovantes sont à étudier, telles que le désherbage électrique ou le bombardement des adventices par des rafles de maïs.

Si les leviers agronomiques sont de plus en plus connus, les nouvelles technologies n'en sont qu'à leurs prémices. Pour se généraliser dans les grandes cultures, ces solutions devront être rentables et acceptables par les agriculteurs.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aliaga C., Jouanneau E., Verdier J.-L., Baron B., Gorichon J., 2015. Leviers agronomiques et adventices : Des itinéraires efficaces tout en conservant les marges. *Perspectives Agricoles*, 51-52.
- Arvalis-Institut du végétal, 2017. Gestion durable des adventices : Céréales à paille. Arvalis, 170 p.
- Bàrberi P., Lo Cascio B., 2001. Long-term tillage and crop rotation effects on weed seedbank size and composition. *Weed Research*, 41, 325-340.
- Bonin L., Garnier J.-F., Fontaine L., 2011. Désherbage mécanique des céréales à paille : efficacité et impact sur le rendement. In : ITAB (Eds), *Désherbage mécanique: des solutions à partager*, 8-14. Rennes.
- Cadoux S., Sauzet G., Vuillemin F., 2015. Modifier son système de culture et ses pratiques d'implantation pour réduire la dépendance aux herbicides. In : GIS GC HP2E et RMT Florad (Eds), *Comment maîtriser les adventices dans de nouveaux contextes de production?*, 18-20. Paris.
- Cardina J., Herms C.P., Doohan D.J., 2002. Crop Rotation and Tillage System Effects on Weed Seedbanks. *Weed Science*, 50, 448-460.
- Cardina J., Regnier E., Harrison K., 1991. Long-Term Tillage Effects on Seed Banks in Three Ohio Soils. *Weed Science*, 39, 186-194.
- Chassine J., Bonin L., Labreuche J., Vacher C., 2009. Impact du travail du sol pendant l'interculture et du type de semis sur la présence de ray-grass dans le blé tendre. In : AFPP (Eds),
- Cloutier D.C., Leblanc M.L., 2002. Effect of the combination of the stale seedbed technique with cultivations on weed control in maize. In : EWRS (Eds), *Proceedings of 5th European Weed Research Society Workshop on Physical Weed Control*, 17. Pisa, Italy. Consultable : http://www.ewrs.org/pwc/doc/2002_Pisa.pdf#page=64 [Consulté le 11 août 2017].
- Desbourdes C., al., 2015. Le binage mécanique assisté par GPS. In : Ed Arvalis (Eds), *Agriculture de précision: positionnement GPS, gestion intraparcellaire et évaluation des performances*, 37-41. Paris.
- Desbourdes C., Perriot B., 2012. La modulation intraparcellaire avec l'injection directe: une opération encore délicate. *Perspectives Agricoles*, 37-41.
- Fogelfors H., 1982. Collection of chaff, awns and straw when combining and its influence on the seed bank and the composition of the weed flora. In : Dept. of Plant husbandry and Research Information Centre, Swed. Univ. Agr. Sci (Eds), *Weeds and weed control*, 339-345. Upsala.
- Gée C., 2017. Analyse des mécanismes impliqués dans la détection automatisée des adventices. In : INRA (Eds), *Gestion des adventices dans un contexte de changement*, 56-57. Paris. Consultable : <http://prodinra.inra.fr/ft?id=104DBE0A-63AE-49FB-B7CF-697ED9CE4821>.
- Jouy L., Guilbert F., 1998. Influence des pratiques culturales sur l'évolution de la flore adventice en grandes cultures. In : AFPP (Eds), 17ème conférence du COLUMA, Dijon.
- Kudsk P., Streibig J.C., 2003. Herbicides – a two-edged sword*. *Weed Research*, 43, 90-102.
- Levesque G., 2017. Analyse pluri-critères d'un essai travail du sol de longue durée. Arvalis, Boigneville,
- Lutman P.J.W., Moss S.R., Cook S., Welham S.J., 2013. A review of the effects of crop agronomy on the management of *Alopecurus myosuroides* D.-S. Kim, éd. *Weed Research*, 53, 299-313.
- Métais P., Labreuche J., Dubois B., Vacher C., Bonin L., Gautellier Vizios L., 2016. Mise en rotation d'un essai travail du sol en monoculture de blé : impact sur le ray-grass. In : AFPP (Eds), 23ème conférence du COLUMA, Dijon.
- Métais P., Bureau S., Gaudillat D., Geille A., 2016. Impact de la récupération des menues pailles sur le ray-grass (*lolium* sp) dans les céréales. In : AFPP (Eds), 23ème conférence du COLUMA, Dijon.
- Métais P., Vuillemin F., Cordeau S., 2017. Étude de l'effet du travail du sol et des couverts sur les adventices dans des contextes de production variés. In : INRA (Eds), *Gestion des adventices dans un contexte de changement*, 53-55. Paris.
- Perriot B., al., 2013. Pulvérisation en grandes cultures: les clés de la réussite. Arvalis, Paris,
- Schwartz L.M. et al., 2015. Seedbank and Field Emergence of Weeds in Glyphosate-Resistant Cropping Systems in the United States. *Weed Science*, 63, 425-439.
- Shirliffe S.J., Entz M.H., 2005. Chaff collection reduces seed dispersal of wild oat (*Avena fatua*) by a combine harvester. *Weed Science*, 53, 465-470.
- Spandl E., Durgan B.R., Forcella F., 1999. Foxtail (*Setaria* spp.) Seedling Dynamics in Spring Wheat (*Triticum aestivum*) are Influenced by Seeding Date and Tillage Regime. *Weed Science*, 47, 156-160.

- Swanton C.J., Shrestha A., Knezevic S.Z., Roy R.C., Ball-Coelho B.R., 2000. Influence of tillage type on vertical weed seedbank distribution in a sandy soil. *Can. J. Plant Sci.*, 80, 455-457.
- Toqué C. et al, 2013. Méthodologie et Premiers Résultats de l'Analyse de 20 ans de Références sur Quatre Systèmes d'Exploitation. In : AFPP (Eds), 22 ème conférence du COLUMA, Dijon.
- Vacher C., Aliaga C., 2015. Effects of combination of different agronomic practices on weed in french cereals rotation. In : EWRS (Eds), *Weed management in changing environments*, 217. Montpellier.
- Van Der Weide R.Y., Bleeker P.O., Lotz L., 2002. Simple innovations to improve the effect of the false seed bed technique. In : EWRS (Eds), *Proceedings of 5th European Weed Research Society Workshop on Physical Weed Control*, 3. Pisa, Italy. Consultable : http://www.ewrs.org/pwc/doc/2002_Pisa.pdf#page=64 [Consulté le 11 août 2017].
- Vandersteen, J. et al, 2011. Dynamic of Black-Grass Populations Depending on the Sowing Time of Winter Wheat. *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*, 76, 485-490.
- Vuillioud P., Delabays N., Feri P., Mercier E., 2006. Résultats de 35 ans de culture sans labour à Changins. *Revue Suisse d'Agriculture*, 38, 81-87.
- Walsh M., Parker W., 2002. Wild radish and ryegrass seed collection at harvest: chaff carts and other devices. Perth, WA: Department of Agriculture Western Australia Agribusiness Crop Updates, 37-38.
- Walsh M.J., Powles S.B., 2007. Management Strategies for Herbicide-resistant Weed Populations in Australian Dryland Crop Production Systems. *Weed Technology*, 21, 332-338.