

Gestion intégrée de la flore adventice dans les systèmes de culture sans labour

Bruno Chauvel
Clément Tschudy
Nicolas Munier-Jolain

Inra
UMR « Biologie et gestion des adventices »
AgroSup-Inra-Université de Bourgogne
17, rue Sully
21065 Dijon cedex
France
<bruno.chauvel@dijon.inra.fr>
<clem-ts@no-log.org>
<munierj@dijon.inra.fr>

Résumé

Les techniques culturales sans labour (TCSL) ont une influence importante sur certaines étapes du cycle de vie des espèces adventices. La concentration des semences dans les horizons de surface tend à favoriser le développement des espèces aptes à germer rapidement (faible dormance) ou à faciliter le développement des espèces vivaces. Si une plus grande dépendance aux herbicides est observée avec la réduction du travail du sol, la mise en œuvre des principes de la protection intégrée (PI) peut permettre de réduire l'usage de ces molécules tout en assurant une gestion satisfaisante de la flore adventice. La compatibilité entre TCSL et PI est démontrée par les résultats d'une expérimentation de longue durée visant à évaluer des systèmes PI, dont un système en TCSL caractérisé par des travaux du sol superficiels répétés fréquemment pour favoriser la germination des espèces adventices pendant l'interculture. Sur ces parcelles, l'indice de fréquence de traitements herbicides (IFT) a fortement diminué durant les six années de la rotation par rapport au système de référence. Dans le même temps, la densité du stock semencier et de la flore levée en culture est restée maîtrisée. Le vulpin (*Alopecurus myosuroides* Huds.) a montré une évolution très fluctuante dans ces systèmes, les densités de plantes augmentant et diminuant très rapidement en fonction des caractéristiques agronomiques des pratiques de l'année.

Mots clés : mauvaise herbe ; protection intégrée ; travail du sol.

Thèmes : productions végétales ; sols.

Abstract

Integrated management of the weed flora in low-tillage farming systems

Low tillage cultural practices have a significant influence on some stages of the demographic cycle of weed species. The concentration of seeds in the soil surface layers tends to favour the development of species capable of germinating rapidly (low dormancy) and to favour perennial species. Although a higher reliance on herbicides is observed with reduced tillage, applying the principles of Integrated Weed Management (IWM) can reduce herbicide use while ensuring satisfactory management of the weed flora. The compatibility of IWM and low-tillage systems was demonstrated in a long-term experiment designed to evaluate various IWM-based systems, including the frequent application of shallow tillage to enhance weed seed germination before sowing the crop. In these fields, as compared to the reference standard system, the Treatment Frequency Index for herbicides was drastically decreased over the six years of crop rotation. During the same period, the soil seed bank and the above ground flora were kept under control. The demography of blackgrass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) fluctuated considerably in these systems, increasing or decreasing very rapidly according to the agronomic practices of the current year.

Key words: integrated protection; tillage; weeds.

Subjects: soils; vegetal productions.

Pour citer cet article : Chauvel B, Tschudy C, Munier-Jolain N, 2011. Gestion intégrée de la flore adventice dans les systèmes de culture sans labour. *Cah Agric* 20 : 194-203. doi : 10.1684/agr.2011.0491

Tirés à part : B. Chauvel

Le travail du sol constitue encore aujourd'hui la base de l'implantation des cultures annuelles dans une large majorité des systèmes de culture en France et dans le monde. Le choix des outils, la date et la fréquence des interventions sont dictés par des règles de décision liées à la parcelle (type de sol, pente...), à la spécificité de la culture semée et aux stratégies de conduites des cultures retenues par l'agriculteur. La présence d'organismes vivants qui peuvent se révéler plus ou moins nuisibles (flore adventice, limaces, petits mammifères...) ou de résidus végétaux peut aussi influencer sur les pratiques en modifiant le type d'outils, la date et le nombre de passages ou la profondeur du travail réalisé.

Les techniques culturales sans labour (TCSL) connaissent actuellement un fort engouement des agriculteurs en France (Labreuche *et al.*, 2007) du fait d'un certain nombre d'avantages, supposés ou confirmés, mais toujours particulièrement attractifs, liés à la réduction du temps de travail et aux économies de carburant (Labreuche et Baudart, 2006) qui peuvent générer des gains économiques variables (Crochet *et al.*, 2008). L'augmentation générale de la surface des exploitations et la faible diversité des assolements impliquent des pointes de travail que l'agriculteur tente de réduire en minimisant les temps d'intervention, ce que peut permettre les TCSL. Mais le développement de ce type de pratiques est aussi fortement lié à des préoccupations environnementales concernant le fonctionnement biologique (Mikanova *et al.*, 2009) et la protection du sol : réduction de l'érosion éolienne et hydrique (Labreuche *et al.*, 2007), restauration de la porosité des sols (Maillard *et al.*, 1995 ; Roger-Estrade *et al.*, 2011), stockage accru de carbone dans les horizons de surface (Maillard *et al.*, 1994) et réduction des émissions de gaz à effet de serre (Labreuche *et al.*, 2011). Ainsi, c'est un ensemble de préoccupations environnementales et économiques qui amène les agriculteurs à réduire la profondeur de travail du sol et à délaissier de façon plus ou moins totale l'utilisation de la charrue. La prise en compte des composantes biologiques et de la qualité biologique des sols (Chaussod, 1996) n'est pas totalement absente du raisonnement

des agriculteurs qui s'orientent vers les TCSL. En effet, la perturbation liée au labour profond avec retournement diminue la durabilité des organes de survie et la potentialité d'installation des champignons mycorhiziens (Galvez *et al.*, 2001) et est domma-geable pour les populations d'animaux fouisseurs tels que les vers de terre (Nuutinen, 1992), ainsi que pour certains insectes auxiliaires comme différentes espèces de carabidés (Shearin *et al.*, 2008). Mais, de manière concomitante, les plus faibles perturbations liées au travail superficiel vont aussi entraîner une diminution de la régulation des populations de petits mammifères, de limaces, et de la flore adventice des parcelles cultivées. En effet, si le labour a pour objectif principal de faciliter la mise en place de la culture suivante, cette technique a également un rôle fondamental dans la gestion des communautés de plantes adventices. Les pratiques de non-travail du sol associées au semis direct (*no tillage*) induisent un changement encore plus radical en modifiant le fonctionnement biologique de la parcelle et la structure des communautés (Légère *et al.*, 2005) et en procurant un avantage aux espèces vivaces (Zanin *et al.*, 1997) qu'elles n'avaient pas dans les systèmes où la surface du sol est régulièrement perturbée.

C'est dans les parcelles où sont effectués des labours que sont généralement observés les stocks semenciers les plus faibles (Beuret, 1989 ; Murphy *et al.*, 2006). La réduction du travail du sol, en maintenant les semences près de sa surface (Yenish *et al.*, 1992), peut modifier de façon importante la composition et l'abondance des espèces de la flore adventice et nécessite en conséquence l'adaptation des stratégies de gestion pour compenser la possible augmentation des levées de mauvaises herbes (Mayor et Maillard, 1995). On verra dans la suite de cet article que les systèmes sans labour actuels tendent à utiliser plus d'herbicides que les systèmes avec labour, alors même qu'il y a une demande provenant de la société pour des pratiques agricoles moins dépendantes des pesticides : ainsi, le plan ECOPHYTO 2018 prévoit une division « si possible » par 2 du niveau d'usage de pesticides en France d'ici 2018. Il est donc légitime de poser la question de la compatibi-

lité entre les TCSL et l'objectif de réduction de l'usage d'herbicides dans le cadre de stratégies de protection intégrée (PI) valorisant d'autres modes de régulation, agronomiques et biologiques, des infestations de plantes adventices.

Cet article répond à un double objectif : dans un premier temps, nous décrivons, sur la base d'une revue des connaissances, les processus impliqués dans l'impact, à court et moyen terme, de l'abandon du labour sur l'évolution des communautés de mauvaises herbes, processus liés aux interactions entre le travail du sol et la biologie très variable des espèces adventices. Dans un second temps, nous discutons des possibilités de réduction de l'usage d'herbicides par l'adoption des principes de PI qui sont compatibles avec les TCSL, lorsque le choix des TCSL a été fait pour des raisons agronomiques ou économiques indépendantes de la gestion de la flore adventice. Nous nous appuyons pour cela largement sur les résultats d'une expérimentation de longue durée conduite sur le domaine expérimental de l'Inra à Bretenière (Côte d'Or) pour tester des prototypes de systèmes de culture relevant de la PI.

Impact des TCSL sur la dynamique de la flore adventice

L'intensité et la fréquence de la perturbation engendrée par le travail du sol font de la parcelle cultivée un habitat qui n'a presque pas d'équivalent dans les écosystèmes naturels. Seuls certains milieux, tels que les zones d'étiage des rivières soumises à un régime de crues et de décrues, les zones soumises à des incendies (Bossuyt et Honnay, 2008) ou des zones perturbées par l'activité d'animaux (Harlan, 1987 ; Lavorel *et al.*, 1998), sont assujettis à des perturbations d'intensité et de fréquences similaires à la parcelle cultivée (Jauzein, 1995). Comme dans la parcelle cultivée, les perturbations fréquentes dans ces milieux dits primaires sont susceptibles de favoriser des espèces végétales dont la

dynamique dépend du stock de semences.

Dans le cas particulier de la flore adventice des champs cultivés, les interactions complexes, d'une part entre les composantes du système de culture (travail du sol, succession culturale, itinéraire de conduite de chaque culture) et d'autre part entre le système de culture, le climat et la diversité biologique des espèces adventices, rendent difficile la prédiction de l'effet d'une nouvelle technique culturale sur une communauté d'espèces adventices donnée. Cela est d'autant plus vrai que le travail du sol peut avoir une action directe sur la flore en place par son action mécanique, mais également une action indirecte en modifiant les conditions du milieu, par exemple la structure du sol, son état hydrique ou la densité d'inoculum primaires de parasites telluriques... Enfin, les agriculteurs disposent d'une grande diversité d'outils de travail du sol (outils animés, à disques indépendants, à dents...) qui en fonction des conditions du milieu (texture, structure, humidité du sol...) vont permettre de réaliser les différentes étapes de préparation à la mise en place de la culture suivante. Chacun de ces outils, par ses caractéristiques mécaniques, modifie et crée des conditions du milieu qui sont particulières. Ainsi, les opérations de déchaumage, de faux semis et de préparation du lit de semence vont à chaque passage influencer directement et indirectement sur le positionnement dans le profil du stock semencier des adventices et donc sur la population de mauvaises herbes qui sera présente dans la culture.

Action directe

Une espèce végétale doit posséder un ensemble de caractéristiques biologiques, adaptées aux conditions du milieu, pour réaliser efficacement les différentes étapes de son cycle biologique nécessaires à sa réussite dans l'agrosystème. Cela inclut des caractéristiques liées à l'établissement des plantules et à la capacité des semences à germer, à leur maintien à court terme (capacité à survivre dans l'environnement, à réaliser un cycle biologique complet) ainsi qu'à moyen terme (production de semences pour

alimenter le stock semencier pour les espèces annuelles, maintien de réserves souterraines en assimilats, productions de bourgeons végétatifs assurant la repousse dans les cultures successives pour les vivaces).

Établissement des plantules

Les processus affectés par l'abandon du labour sont principalement liés à la germination des semences et à l'établissement des plantules. En effet, dans les systèmes en TCSL, les semences sont majoritairement présentes dans les horizons de surface (0-5 cm), alors que le labour, ou plus exactement la répétition de labours successifs, dilue le stock semencier sur la profondeur travaillée (*figure 1*; [Moss, 1988 ; Carter et Ivany, 2006]). Environ 90 % des semences se trouvent dans les cinq premiers centimètres du sol en cas de semis direct sans travail du sol, environ 40 % en travail superficiel (Mulugeta et Stoltenberg, 1997 ; Swanton *et al.*, 2000). Or, pour la majorité des espèces adventices, la germination et la levée ne sont possibles que pour des semences enfouies à très faible profondeur, dans ces premiers centimètres, en raison de la petite taille des semences et de la disponibilité limitée de réserves pour la croissance hétérotrophe de la plantule avant son émergence à la surface du sol (Roberts *et al.*, 1982 ; Gardarin *et al.*, 2009). À même niveau de stock semencier global, le potentiel d'infestation représenté par le stock superficiel est donc plus élevé en système de TCSL qu'en système incluant la pratique du labour (Ball, 1992).

Dans le cadre d'une gestion intégrée, le labour peut ainsi se révéler une technique particulièrement efficace de gestion de la flore après une forte production de semences.

Toutefois, on observe chez les espèces adventices de nombreux phénomènes de dormance qui permettent aux semences contenues dans le sol de se maintenir en vie pendant plusieurs années et de germer ultérieurement. Cet état de dormance correspond à une adaptation biologique importante des espèces annuelles adventices des cultures à la perturbation que constitue le labour. La dormance des semences permet d'étaler les germinations dans

le temps, à l'échelle de l'année mais également sur le plus long terme, de limiter les risques de germinations fatales de semences enfouies par le labour. À l'exception de quelques espèces telles que le vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides* Huds. ; [Colbach *et al.*, 2002a ; Colbach *et al.*, 2002b]) et l'ambrosie à feuilles d'armoise (*Ambrosia artemisiifolia* L. ; [Bazzaz, 1979]), les phénomènes d'induction et de levée de dormance sont mal connus et sont très variables suivant les espèces. Lors d'un labour, il semble que la remontée de semences profondément enfouies induise une levée de dormance, et favorise donc la germination dans des conditions plus favorables permettant d'augmenter les chances de multiplication de l'espèce.

À l'inverse, les TCSL tendent à favoriser les espèces dont les semences sont peu dormantes, aptes à germer massivement et rapidement dès que les conditions adéquates de température et d'humidité du sol sont rencontrées. Cette particularité est corrélée avec une faible durée de vie dans le sol ; cependant, en absence de labour, elle permet d'assurer une nouvelle génération de plantes tous les ans, et donc une nouvelle multiplication de semences si les conditions de croissance générées par la succession des cultures sont favorables tous les ans. Debaeke et Orlando (1994) ont observé une augmentation de l'abondance des graminées, espèces généralement à faible dormance, dans des systèmes avec travail superficiel ou semis direct sans travail (Mamarot, 2005). Au contraire, l'abondance des espèces dicotylédones, espèces dont les semences sont généralement plus dormantes, tend à augmenter dès lors que le sol est travaillé (*figure 2*). Toutes les études abordant le sujet confirment que les graminées sont favorisées par les faibles fréquence et intensité des perturbations liées au travail du sol en TCSL, en particulier dans les cultures de céréales d'hiver (Froud-Williams *et al.*, 1981 ; Derksen *et al.*, 1993 ; Zanin *et al.*, 1997). Il est intéressant de noter que cette tendance est conforme à ce qui est observé dans les milieux naturels où une perturbation intense et régulière ralentit l'installation des graminées dans le milieu (Grime, 2001).

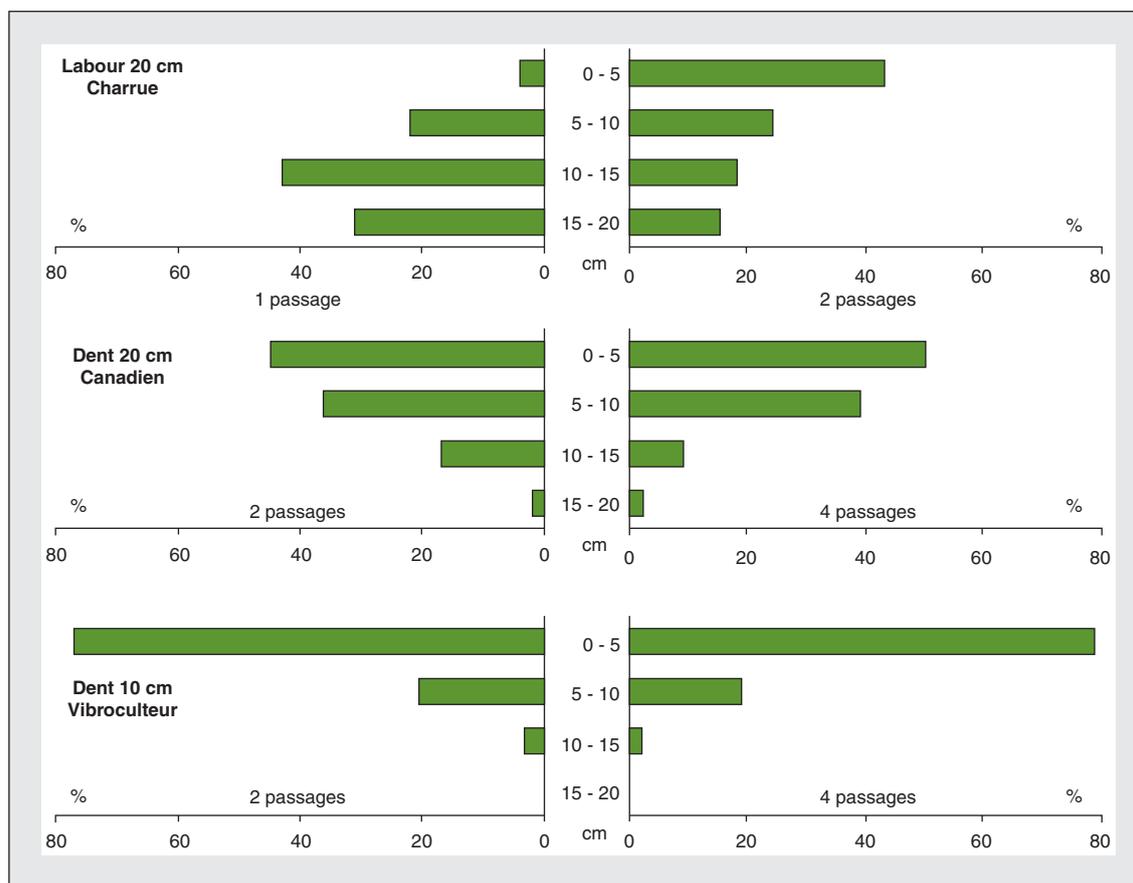


Figure 1. Effets de pratiques successives sur la distribution de billes de plastiques (% pour chaque profondeur) dans les horizons de sol de 0 à 20 cm ([d'après Moss, 1988]).

Figure 1. Effect of repeated cultivation (1, 2 or 4 passages) on plastic bead distribution in soil layers (0 to 20cm). ([from Moss, 1988]).

Cette aptitude des espèces adventices graminéennes germant en automne-hiver à coloniser les milieux peu perturbés peut être expliquée par la faible persistance des semences, souvent caractérisée par le taux annuel de décroissance de la capacité germinative des semences enfouies. Cet indice est lui-même difficile à évaluer car il nécessite des expérimentations lourdes et de longue durée. Les travaux de Chadoeuf *et al.* (1984) permettent cependant de bien mettre en évidence la faible persistance des graminées hivernales (vulpin – *A. myosuroides* Huds. – en particulier), et au-delà de nombreuses espèces adventices inféodées aux systèmes céréaliers, le gaillet (*Galium aparine* L.) étant l'exemple d'espèce dicotylédone de ce type la plus emblématique (figure 3).

Maintien des espèces adventices dans la parcelle cultivée

La levée d'une cohorte de plantules dans la parcelle ne présage pas du maintien de l'espèce dans le milieu. Les caractéristiques biologiques (traits) des plantes doivent être adaptées aux conditions abiotiques et biotiques pour terminer le cycle et produire des semences. La majorité des travaux sur ce sujet a été réalisée en caractérisant la réponse d'une ou plusieurs espèces à une technique spécifique dans des conditions expérimentales particulières (Singh *et al.*, 1995 ; Chauvel *et al.*, 2009). Il est donc difficile de généraliser les résultats obtenus, alors qu'une approche fondée sur les traits favorisés par les différents types de travail du sol (les traits sont les caractéristiques

biologiques mesurables ou observables sur un individu donné, impliqués dans la réponse des espèces aux conditions du milieu ou dans des fonctions écosystémiques) permettrait une meilleure évaluation des changements de flore liés à la mise en place des TCSL.

De manière « générale », le labour entraîne la sélection d'espèces thérophytes, c'est-à-dire à cycle de vie annuel (Froud-Williams *et al.*, 1983 ; Zanin *et al.*, 1997), capables de produire des semences entre deux perturbations. À l'inverse, les espèces bisannuelles et pérennes, géophytes dotées de rhizomes, de bulbes ou de bulbilles pour assurer la survie pendant la saison froide et la multiplication végétative, sont bien adaptées aux TCSL (Buhler *et al.*, 1994 ; Zanin *et al.*, 1997). Dans le cas particulier de

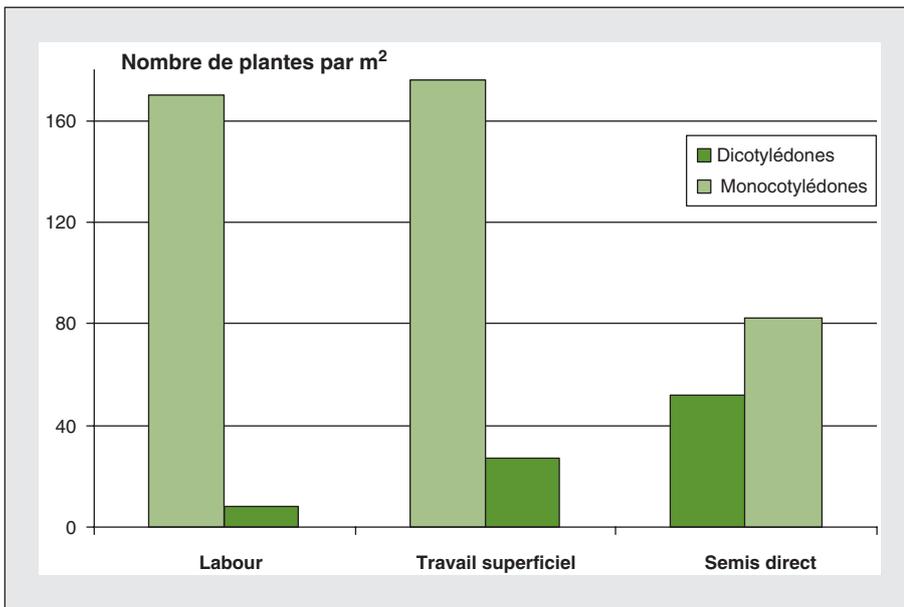


Figure 2. Effet du travail du sol sur la constitution des communautés adventices ([d'après Debaeke et Orlando, 1994]).

Figure 2. Effect of soil tillage on weed community composition ([from Debaeke and Orlando, 1994]).

l'absence totale de travail du sol (c'est-à-dire en semis direct), l'évolution de la flore pourrait certainement être encore plus radicale avec la multiplication des espèces vivaces, géophytes majoritaires, voire sans doute de quelques espèces ligneuses, de type chaméphytes (Zanin *et al.*, 1997). Cependant, ces possibles évolutions sont encore très mal connues, par manque de données ou de recul sur le sujet.

Action indirecte

Effets des mulchs sur la dynamique de germination

L'accumulation des pailles en surface du sol est une des conséquences attendues des TCSL, en particulier dans les pays ou régions où il est interdit de brûler les pailles pour des raisons environnementales, comme c'est le cas en Europe depuis la mise

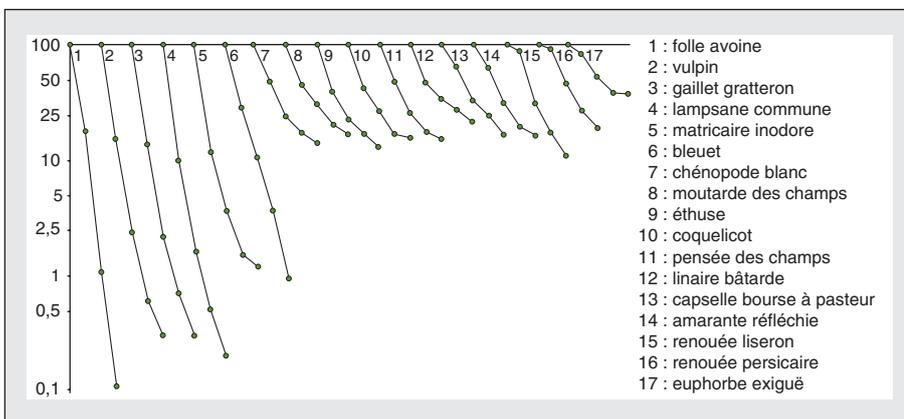


Figure 3. Évolution sur trois ou quatre années (une observation par an, 12 mois entre deux observations successives) de la viabilité des semences enfouies à 30 cm dans le sol, pour 17 espèces adventices fréquentes ([d'après Chadoeuf *et al.*, 1984]).

Figure 3. Changes in seed viability of common weed species over 3 4 years ([from Chadoeuf *et al.*, 1984]). Sur l'abscisse du graphique, figurent les numéros - de 1 à 17 - indiquant le nom des espèces ; en ordonnées, figure le pourcentage de semences encore viables.

en place des mesures environnementales liées à la Politique agricole commune (PAC). Peu d'études ont été menées pour déterminer l'effet des mulchs sur la germination des semences d'espèces adventices. Le mulch de paille, qui peut atteindre 6-8 t/ha, constitue une barrière physique qui peut empêcher la levée des plantules (Moonen et Barberi, 2006 ; Jodaugiene *et al.*, 2006). Cet effet varie avec les conditions du milieu et dépend fortement des conditions d'humidité (Teasdale et Mohler, 1993).

Réduction de l'efficacité des pratiques de désherbage

L'accumulation des pailles et autres résidus de culture en surface peut diminuer l'efficacité des produits herbicides à absorption radiculaire (Geissbühler *et al.*, 1975). La prise en compte de cet effet limite la gamme des molécules herbicides utilisables en TCSL, l'accumulation des pailles pouvant à la fois réduire l'efficacité globale du programme de désherbage sur l'ensemble de la communauté adventice et augmenter le risque de sélection de populations résistantes (Mamarot, 2005) si cela conduit à utiliser très fréquemment des matières actives à absorption foliaire. De la même façon, l'accumulation de pailles en surface peut fortement diminuer l'efficacité du désherbage mécanique en gênant l'action vibrante des dents des herses étrilles (bourrage des dents), voire interdire la mise en œuvre de la technique (Quéré et Druésne, 2006). Dans ce cas, un travail du sol plus profond peut, quand cela est possible, favoriser l'enfouissement des pailles et accélérer leur dégradation.

La simplification du travail du sol est issue d'une réflexion liée à la limitation des effets négatifs du travail du sol pour améliorer la durabilité des systèmes de culture, à une meilleure gestion de la fertilisation azotée et à une meilleure organisation du travail. Il semble que les conséquences sur la flore adventice (perte de la régulation liée au labour et sélection d'une flore bien adaptée) n'aient sans doute pas été correctement évaluées ; le passage en TCSL s'est alors traduit généralement, au moins à court terme, par une

augmentation de densité des espèces adventices et par une augmentation de la pression du désherbage chimique (figure 4).

L'utilisation systématique des mêmes familles de produits herbicides contre les populations de graminées adventices s'est inévitablement traduite par la sélection de populations résistantes aux herbicides (vulpin – *A. myosuroides* Huds., folle avoine – *Avena fatua* L. et ray-grass – *Lolium* sp. ; [Gasquez, 2000]). Les situations de résistance aux herbicides ne se limitent pas aux parcelles gérées en TCSL, mais la régulation liée au labour atténue les risques de fortes augmentations de densité.

L'actuel développement des TCSL s'inscrit dans un contexte visant à réduire l'utilisation des produits phytosanitaires. Or le passage en TCSL, et en particulier au semis direct, s'est généralement traduit par une utilisation plus importante d'herbicides, non seulement pendant la culture mais aussi pendant l'interculture (Torresen *et al.*, 2003). La mise en place de pratiques complémentaires de gestion apparaît donc comme une obligation pour maintenir la durabilité des systèmes de culture dans le cadre notamment du développement de la protection intégrée.

TCSL et protection intégrée sont-elles compatibles ?

La PI consiste à mettre en œuvre les moyens agronomiques, voire écologiques, contribuant à limiter de façon préventive (prophylaxie) la présence des bioagresseurs ou les dégâts occasionnés par leur présence (El Titi, 1992 ; Chikowo *et al.*, 2009). Ces moyens préventifs sont associés à une lutte curative raisonnée qui peut être réalisée par voie chimique ou non chimique. L'efficacité attendue des moyens de lutte alternatifs devrait permettre de réduire la fréquence des besoins de traitement, contribuant ainsi à limiter la dépendance des cultures aux pesticides ainsi que les transferts de résidus de pesticides depuis les agrosystèmes vers différents compartiments de l'environnement et les organismes non-cibles. La PI apparaît donc comme une voie possible répondant aux cahiers des charges agri-environnementaux qui se développent dans de nombreux pays et pourrait répondre en France aux

objectifs du plan ministériel ECO-PHYTO 2018. Dans le cas particulier de la maîtrise de la flore adventice, la PI repose sur la combinaison de techniques diverses dont l'efficacité ne peut être que partielle lorsqu'elles sont considérées individuellement, mais dont la combinaison doit permettre de maîtriser des infestations avec un faible niveau d'usage d'herbicides. La pratique du labour, par la gestion du stock semencier qu'elle favorise, est considérée par la majorité des agronomes comme un élément de la panoplie de moyens de lutte à mobiliser dans le cadre de la PI. Ce point de vue semble cohérent avec la plus grande dépendance aux herbicides de beaucoup de systèmes sans labour. Il est donc justifié de poser la question de la compatibilité entre les TCSL et la PI.

Une expérimentation de longue durée a été mise en place en 2000 par l'Inra dans la région de Dijon (France), pour contribuer à répondre à cette question. Cette expérimentation vise à évaluer les performances agronomiques, économiques et environnementales de prototypes de systèmes de culture construits sur la base des principes de la PI. Il s'agit d'une expérimentation « système », et non d'une expérimentation factorielle classique. Elle ne cherche donc pas à démontrer l'effet d'un facteur particulier (par exemple le type de travail du sol), toutes choses égales par ailleurs, mais à évaluer globalement des systèmes dans leur cohérence d'ensemble par rapport à des objectifs définis *a priori*. Dans notre cas, l'objectif principal est de réduire le niveau de dépendance aux herbicides par rapport à un système de référence correspondant aux pratiques locales dominantes des agriculteurs. Cette expérimentation permet donc d'évaluer les performances de plusieurs systèmes de culture en PI, dont une version en TCSL. Dans le système TCSL, le travail du sol est limité aux horizons superficiels (8 cm de profondeur maximum) avec des outils à disques ou à dents équipés de pattes d'oie pour favoriser la destruction des adventices ; ce travail superficiel est répété fréquemment pendant la période d'interculture, comme décrit ci-dessous. Dans le système de référence correspondant aux pratiques locales, qui comporte un labour

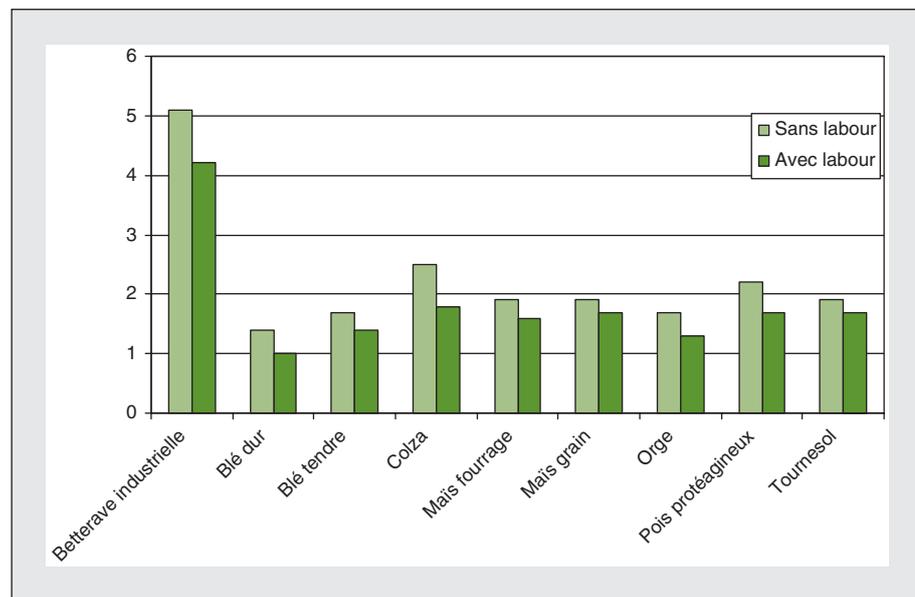


Figure 4. Nombre moyen de passages avec un herbicide sur les grandes cultures en 2005-2006 ([d'après Agreste, 2008]).

Figure 4. Average number of herbicide treatments in France during 2005-2006 in ploughed versus never-ploughed fields ([from Agreste, 2008]).

annuel, la lutte contre les espèces adventices repose essentiellement sur un choix raisonné des herbicides les mieux adaptés à la flore présente. Dans le système en PI-TCSL, la gestion de la flore adventice repose sur toutes les mesures préventives disponibles, hormis le labour, à savoir :

- la diversification de la rotation, avec introduction de cultures de printemps et d'été. Alors que le système de référence repose sur une rotation sur 3 ans colza-blé-orge, la rotation en PI-TCSL est sur une base de 6 ans, du type colza-blé-orge d'hiver-soja-triticales-orge de printemps, ou colza-blé-orge de printemps-sorgho-féverole d'hiver-triticales ;

- l'adaptation des dates de semis, en particulier des céréales d'hiver et des cultures d'été, retardées pour esquiver les périodes de levées préférentielles des espèces présentes ;

- la répétition des passages d'outils superficiels pendant l'interculture visant à favoriser la germination et la destruction des plantules (effet « faux semis »), ce qui nécessite de ne pas planter de couverts végétaux pendant cette période ;

- le choix de variétés compétitives, ou à croissance initiale vigoureuse, avec semis à forte densité et écartement interrang faible ;

En revanche, ce système ne prévoit pas de désherbage mécanique des cultures : le binage a été considéré *a priori* comme trop consommateur de

temps de travail pour être utilisé dans un système correspondant plutôt à une exploitation de grande surface avec relativement peu de main-d'œuvre disponible ; par ailleurs, la herse-étrille est peu compatible avec la présence de résidus en surface, le plus souvent abondants en TCSL.

Le système de référence (REF) et le système de protection intégrée avec TCSL (PI-TCSL) sont conduits sur des parcelles d'environ 2 hectares, avec deux répétitions par système. Le sol est relativement profond (60 à 90 cm), argileux (30 à 45 % d'argile), à fort potentiel de production. Le climat est de type tempéré à tendance continentale. Au cours des six premières campagnes de l'expérimentation, soit deux rotations pour le système REF et une rotation pour le système PI-TCSL, la dépendance aux herbicides a effectivement été réduite en système PI-TCSL, puisque l'indice de fréquence de traitement (IFT) moyen a été de 1n2, contre 2n1 en système de référence (tableau 1). Cette réduction, bien qu'insuffisante au regard du plan ECOPHYTO 2018, a été permise essentiellement par des suppressions de traitements dans les cultures de blé, d'orge et de colza dues à la décision de ne pas appliquer de traitements herbicides (impasses de désherbage), beaucoup plus que par des réductions de doses par rapport au système de référence. Ces impasses qui concernent tous les herbicides, ont été

permises par les faibles densités de plantes adventices observées en début de cycle qui se trouvaient réduites grâce aux mesures préventives prises en amont, et par une appréciation du risque malherbologique réduit du fait des systèmes de culture de PI prévus. L'intérêt de la PI est encore plus manifeste avec l'indicateur d'impact environnemental I-Pest caractérisant les risques toxicologiques et écotoxicologiques liés aux transferts de résidus de pesticides dans l'environnement. Cet indicateur tient compte de la sensibilité de la parcelle aux transferts de pesticides, des conditions d'application des produits, et des caractéristiques intrinsèques des produits. Il varie de 0 pour les traitements à risque environnemental considéré comme nul à 1 pour des traitements à risque maximal (van der Werf et Zimmer, 1998). Alors que la valeur annuelle moyenne d'I-Pest a été de 0,8 pour le système de référence sur la période considérée, elle n'est que de 0,3 pour le système PI-TCSL, indiquant donc une réduction sensible des risques environnementaux associés aux transferts de résidus d'herbicides. En effet, non seulement les traitements ont été moins fréquents, mais on a choisi des herbicides à profils écotoxicologiques plus favorables sur ce système.

Au cours de la même période, la maîtrise de la flore adventice sur les deux parcelles en PI-TCSL a été aussi satisfaisante que dans le système de référence pourtant plus consommateur d'herbicides. Les espèces dominantes sur ces parcelles sont le vulpin (*A. myosuroides* Huds.), la morelle noire (*Solanum nigrum* L.), la véronique à feuilles de lierre (*Veronica hederifolia* L.), et la renouée persicaire (*Polygonum persicaria* L.). La flore n'a jamais atteint des niveaux d'infestation susceptibles de générer des pertes de rendement significatives. Les densités de mauvaises herbes après désherbage éventuel n'ont jamais dépassé cinq plantes par mètre carré toutes espèces confondues, sauf dans le cas d'une culture de soja infestée par environ 15 morelles noires par mètre carré en 2002. Plus important, aucune tendance à l'augmentation des niveaux d'infestation n'a été observée au cours de cette période, contrairement à ce qui pouvait être redouté suite à une baisse de l'intensité du

Tableau 1. Indice de fréquence de traitement herbicide (IFT, nombre de traitements à dose pleine par hectare et par an) et indice d'impact environnemental I-Pest estimés en moyenne annuelle sur les campagnes 2001-2006 sur les deux répétitions du système de référence (REF) et du système en protection intégrée et travaux superficiels (PI-TCSL).

Table 1. Herbicide treatment frequencies (TFI, number of treatments at full dose per hectare and per year) and mean environmental impact index (I-Pest) estimated over 2001-2006 on two replications of the control system (REF) and IWM-based system with no ploughing (PI-TCSL).

	REF	PI-TCSL
IFT herbicide moyen (doses pleines/ha/an)	2,1	1,2
dont herbicides anti-graminées	1,5	0,7
I-Pest moyen	0,8	0,3
dont herbicides anti-graminées	0,6	0,2

I-Pest est un indicateur d'impact environnemental développé par l'Inra (van der Werf et Zimmer, 1998). Une valeur faible correspond à un faible risque écotoxicologique lié aux transferts de résidus d'herbicides.

désherbage (Chikowo *et al.*, 2009). La bonne maîtrise dans la durée de la flore de surface est également attestée avec le stock semencier (*figure 5*). Le dénombrement des semences dans le sol a reposé sur des carottages de sol réalisés à cinq reprises, en septembre-octobre, entre 2000 et 2005 (100 carottes par parcelle, séparées en horizons superficiel et profond, lavées et tamisées pour séparer la matière organique, qui a ensuite été triée manuellement sous loupe binoculaire). Le stock de semences de deux parcelles en PI-TCSL n'est pas plus important fin 2005 qu'au début de l'expérimentation. Mais si ces observations de stock semencier confirment la bonne maîtrise de la flore, elles illustrent également le comportement assez chaotique de la population d'une espèce annuelle comme le vulpin. Le stock semencier, qui reste superficiel en raison de l'absence de travail profond, peut augmenter rapidement au cours des années favorables au développement de l'espèce, en particulier les années de céréales d'hiver lorsqu'il n'y a aucun désherbage antigraminéen appliqué. Mais il peut également diminuer très rapidement, lorsqu'il y a une interculture longue avant une culture de printemps

ou d'été et que les conditions sont favorables à la réussite des faux semis avant l'implantation des céréales, ou bien encore lorsque le désherbage chimique en culture est suffisamment efficace pour éviter toute nouvelle production de semences. Cette diminution rapide du stock est liée à la faible persistance des semences de cette espèce, mais est également facilitée par la concentration en surface des semences, qui maximise l'impact des faux semis : en effet, dans ce cas toutes les semences sont touchées par l'action de stimulation de la germination par le passage d'outil superficiel, qui est d'autant plus efficace qu'il y a peu de dormance des graines chez cette espèce (Colbach *et al.*, 2002a ; Colbach *et al.*, 2002b). Les résultats de cette expérimentation démontrent la compatibilité entre PI et TCSL dans les conditions de l'expérience. Ils sont aujourd'hui encore très originaux, puisque les expérimentations visant à tester des systèmes de PI sont peu nombreuses et toutes plus récentes, donnant moins de recul sur les effets cumulatifs sur le long terme. Ils sont en revanche très encourageants du point de vue de la faisabilité technique, pour les groupes d'agriculteurs engagés dans des démarches de

réduction des intrants phytosanitaires, qui sont souvent par ailleurs en TCSL, en particulier en France. Au cours des premières années de cet essai, la stratégie TCSL testée reposait largement sur la multiplication de passages d'outils superficiels pendant la période de l'interculture. Ce type de stratégie peut avoir des inconvénients pour d'autres aspects et n'est pas compatible avec la mise en place de couverts végétaux en interculture. En effet, les passages d'outils répétés favorisent la minéralisation de la matière organique et de l'azote et limitent le potentiel de stockage de carbone du sol. En raison de ces inconvénients potentiels, et afin de mieux intégrer la diversité des critères d'évaluation des systèmes de culture pour répondre aux enjeux actuels de l'agriculture, les parcelles en PI-TCSL de l'essai ont été orientées au cours de la deuxième rotation vers une stratégie de couverture du sol permanente avec des couverts végétaux et des mulchs, et vers le semis direct. Le recul est encore insuffisant pour permettre une évaluation complète de ce type de stratégie. Par ailleurs, la faisabilité technique de systèmes de culture associant un faible usage d'herbicides et une bonne

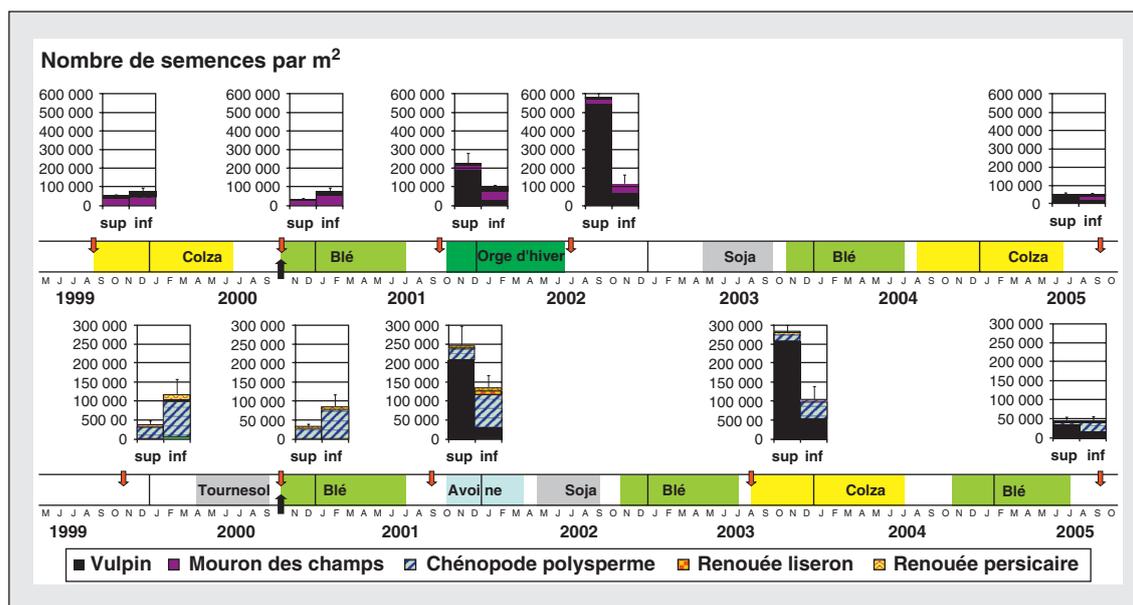


Figure 5. Évolution du stock semencier (en nombre de semences par mètre carré) sur les deux parcelles du système PI-TCSL entre 2001 et 2005.

Figure 5. Soil seed bank evolution (seed number per square meter) on two plots in the experiment: Integrated Weed Management-based cropping systems with no ploughing, between 2001 and 2005.

Les flèches rouges indiquent les dates de prélèvement de sol. Les deux barres de chaque histogramme correspondent aux semences situées dans les zones superficielles (0-10 cm) et profondes (10-30 cm), respectivement.

maîtrise de la flore adventice ne signifie pas nécessairement que ces systèmes soient faciles à mettre en œuvre par la profession agricole. La principale limite est économique : sur cette expérimentation, les rendements tendent à être plus faibles en PI par rapport à la référence, notamment en culture de blé, en raison des semis plus tardifs, des choix variétaux déterminés non par la productivité mais par l'aptitude à l'étouffement des mauvaises herbes et de la fertilisation azotée ajustée en conséquence. En fonction du contexte économique, ce n'est pas nécessairement préjudiciable à la performance économique si les pertes de rendement peuvent être compensées par des charges également plus faibles. Mais les résultats économiques de l'essai montrent clairement que la diversification des rotations pour des raisons agronomiques risque d'affecter la performance économique (Pardo *et al.*, 2010). Il y a donc un enjeu agricole très fort autour de la problématique de diversification des productions agricoles dans le cadre d'une agriculture plus respectueuse de l'environnement. L'analyse de la faisabilité technique en exploitation agricole des systèmes testés montre également que la complexification des systèmes en PI et certaines règles de gestion de la flore adventice (en particulier la règle des semis tardifs des céréales) génèrent potentiellement des tensions en terme d'organisation du travail et de jours agronomiquement disponibles (Pardo *et al.*, 2010). En outre, il n'existe pas une stratégie unique de gestion de la flore adventice : la stratégie doit être adaptée en fonction des contraintes du milieu, qui permettent ou interdisent telle ou telle option technique. Les résultats d'une expérimentation « système » menée sur un site donné, n'ont donc pas vocation à être généralisés à l'ensemble du territoire agricole.

Conclusion

Les travaux du sol, en changeant les conditions édaphiques autour des semences contenues dans le sol, modifient les conditions de germination-levée et influent de façon importante sur le cycle des espèces adventices. La simplification du travail du sol, en concentrant les semences

dans les horizons de surface, tend à accroître le nombre de plantes en position de lever ce qui, en l'absence de pratiques de gestion intégrée, peut se révéler source de problèmes (Derksen *et al.*, 1993).

En raison de la contribution du labour dans la gestion du stock semencier, les systèmes en TCSL tendent à être plus dépendants des herbicides que les systèmes faisant appel au labour, en particulier des herbicides antigraminés. La réduction du nombre de molécules disponibles pose alors le problème du risque de sélection d'espèces résistantes dans des systèmes qui seraient trop dépendants du désherbage chimique (Gasquez, 2000). Pour autant, la mise en œuvre des principes de la PI pour maîtriser la flore adventice peut permettre de réduire l'usage d'herbicides y compris dans le cadre des TCSL. Toutefois, lorsque la PI repose sur des passages répétés d'outils pour la réalisation de faux semis, les conséquences en terme de temps de travail, de consommation d'énergie et de minéralisation de la matière organique limitent le gain global apporté par les TCSL.

L'alternance des pressions de sélection reste théoriquement un bon moyen pour éviter la sélection d'espèces adventices adaptées aux pratiques de l'agriculteur. La possibilité de labourer suite à un échec de désherbage constitue donc une solution uniquement théorique dans la mesure où le passage à une simplification du travail du sol est généralement considéré par les agriculteurs comme sans retour (risque de dilution de la matière organique, perte de la porosité...), le labour apparaissant alors comme une technique obsolète (Huggins et Reganold, 2009). Aussi, la sélection de mauvaises herbes agressives ne peut-elle être évitée que par la mise en place de rotations des cultures suffisamment diversifiées et d'un ensemble de pratiques relevant de la PI.

Mais de même qu'il n'existe pas qu'un seul système modèle de TCSL, il n'existe pas un seul système modèle de PI. La voie des semis directs sur couverts permanents pourrait être un moyen de concilier les différents objectifs poursuivis, de la maîtrise de la flore adventice aux consommations d'énergie, en passant par les temps de travaux réduits et le stockage de carbone dans les sols. Mais le recul

sur l'évaluation multicritère de ce type de système est encore insuffisant aujourd'hui. ■

Remerciements

Cet article a été le support d'une communication présentée lors de la séance de l'Académie d'agriculture de France du 10 juin 2009 intitulée « *Développement des techniques de cultures sans labour (TCSL) : implications agronomiques et environnementales* ».

Les auteurs remercient Pascal Farcy et l'ensemble du personnel du domaine expérimental Inra de Bretenière (21) pour la réalisation de l'essai longue durée. François Dugué, Dominique Meunier et Florence Strbik sont aussi remerciés pour l'ensemble des mesures biologiques réalisées sur l'essai. La plateforme expérimentale est financée par le programme ADVHERB de l'ANR SYSTERRA.

Références

- Agreste, 2008. Dans le sillon du non-labour. *Agreste Primeur* (207) : 1-4. <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/primeur207.pdf>
- Ball DA, 1992. Weed seedbank response to tillage, herbicides, and crop rotation sequence. *Weed Sc* 40 : 654-9.
- Bazzaz FA, 1979. The physiological ecology of plant succession. *Annu Rev Ecol Syst* 10 : 351-71.
- Beuret E, 1989. Influence des pratiques culturales sur l'évolution de la flore adventice : étude du potentiel semencier des sols. *Rev Suisse Agric* 21 : 75-82.
- Bossuyt B, Honnay O, 2008. Can the seed bank be used for ecological restoration? An overview of seed bank characteristics in European communities. *J Veg Sci* 19 : 875-84.
- Buhler DD, Stoltenberg DE, Becker RI, Gunsolus JL, 1994. Perennial weed populations after 14 years of variable tillage and cropping practices. *Weed Sci* 42 : 205-9.
- Carter MR, Ivany JA, 2006. Weed seed bank composition under three long-term tillage regimes on a fine sandy loam in Atlantic Canada. *Soil Tillage Res* 90 : 29-38.
- Chadoeuf R, Barralis G, Lonchamp JP, 1984. *Évolution du potentiel semencier de mauvaises herbes annuelles dans un sol cultivé*. VIII^e Colloque international sur la biologie, l'écologie et la systématique des mauvaises herbes. Paris : ANPP.
- Chaussod R, 1996. La qualité biologique des sols : évaluation et implications. *Etude et Gestion des Sols* 3 : 261-78.
- Chauvel B, Guillemin JP, Colbach N, 2009. Evolution of a herbicide-resistant population of *Alopecurus myosuroides* Huds. in a long-term cropping system experiment. *Crop Prot* 28 : 343-9.

- Chikowo R, Faloya V, Petit S, Munier-Jolain NM, 2009. Integrated Weed Management systems allow reduced reliance on herbicides and long-term weed control. *Agric Ecosyst Environ* 132 : 237-42.
- Colbach N, Chauvel B, Dürr C, Richard G, 2002a. Effect of environmental conditions on *Alopecurus myosuroides* germination. I. Effect of temperature and light. *Weed Res* 42 : 210-21.
- Colbach N, Dürr C, Chauvel B, Richard G, 2002b. Effect of environmental conditions on *Alopecurus myosuroides* germination. II. Effect of moisture conditions and storage length. *Weed Res* 42 : 222-30.
- Crochet F, Nicoletti JP, Bousquet N, 2008. Simplification du travail du sol : un intérêt économique variable d'une exploitation à l'autre. *Perspectives Agricoles* 344 : 22-5.
- Debaeke P, Orlando D, 1994. Simplification du travail du sol et évolution de la flore adventive : conséquences pour le désherbage à l'échelle de la rotation. In: Monnier GTG, Lesaffre B. ed. *Simplification du travail du sol*. Inra, Paris, 16 mai 1991.
- Derksen DA, Lafond GP, Thomas AG, Loeppky HA, Swanton CJ, 1993. Impact of agronomic practices on weed community - tillage systems. *Weed Sci* 41 : 409-17.
- El Titi A, 1992. Integrated farming: an ecological farming approach in European agriculture. *Outlook Agric* 21 : 33-9.
- Froud-Williams RJ, Chancellor RJ, Drennan DSH, 1981. Potential changes in weed floras associated with reduced-cultivation systems for cereal production in temperate regions. *Weed Res* 21 : 99-109.
- Froud-Williams RJ, Drennan DSH, Chancellor RJ, 1983. Influence of cultivation regime on weed floras of arable cropping systems. *J Appl Ecol* 20 : 187-97.
- Galvez L, Douds DJ, Drinkwater L, Wagoner P, 2001. Effect of tillage and farming system upon VAM fungus populations and mycorrhizas and nutrient uptake of maize. *Plant Soil* 228 : 299-308.
- Gardarin A, Dürr C, Colbach N, 2009. Effects of seed depth and soil aggregates on the emergence of weeds with contrasting seed traits. *Weed Res* 50 : 91-101.
- Gasquez J, 2000. *Extension des graminées adventives résistantes aux antigraminées foliaires en France*. XI^e Colloque international sur la biologie des mauvaises herbes 2000, AFPP, Dijon, France.
- Geissbühler H, Martin H, Voss G, 1975. The substituted ureas - behaviour in soils. In: Kearney P, Kaufman DD, eds. *Herbicides*. New York : Marcel Dekker.
- Grime JP, 2001. *Plant Strategies, Vegetation Processes, and Ecosystem Properties*. Chichester (Great Britain): John Wiley & Son.
- Harlan JR, 1987. *Les plantes cultivées et l'homme*. Paris : Presses universitaires de France ; Agence de coopération culturelle et technique.
- Huggins D, Reganold J, 2009. Le labour obsolète. *Pour Sci* 378 : 71-6.
- Jauzein P, 1995. *Flore des champs*. Paris : Inra ; SOPRA.
- Jodaugiene D, Pupaliene R, Urboniene M, Pranciatis V, Pranciatis I, 2006. The impact of different types of organic mulches on weed emergence. *Agron Res* 4 : 197-201.
- Labreuche J, Baudart C, 2006. Charges de mécanisation - des opportunités à saisir et à peser. *Perspectives Agricoles* 325 : 23-34.
- Labreuche J, Le Souder C, Castillon P, Ouvry JF, Real B, Germon JC, et al., 2007. Évaluation des impacts environnementaux des techniques culturales sans labour en France. ADEME-ARVALIS Institut du végétal-INRA-APCA-AREAS-ITB-CETIOM-IFVV. Angers : Ademe éditions. www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=51256&p1=00&p2=11&ref=17597.
- Labreuche J, Lellahi A, Malaval C, Germon JC, 2011. Impact des techniques culturales sans labour sur le bilan énergétique et le bilan des gaz à effet de serre des systèmes de culture. *Cah Agric* 20 : 201-15. doi : 10.1684/agr.2011.0492.
- Lavorel S, Touzard B, Lebreton JD, Clement B, 1998. Identifying functional groups for response to disturbance in an abandoned pasture. *Acta Oecol* 19 : 227-40.
- Légère A, Stevenson F, C, Benoit DL, 2005. Diversity and assembly of weed communities: contrasting response across cropping systems. *Weed Res* 45 : 303-15.
- Maillard A, Vez A, Ryser JP, 1994. Résultats d'un essai de culture sans labour depuis plus de 20 ans à Changins. II. Propriétés chimiques du sol. *Rev Suisse Agric* 26 : 133-9.
- Maillard A, Neyroud JA, Vez A, 1995. Résultats d'un essai de culture sans labour depuis plus de 20 ans à Changins. III. Propriétés physiques du sol. *Rev Suisse Agric* 27 : 5-10.
- Mamarot J, 2005. Gérer les mauvaises en non-labour. Des références obtenues en Midi-Pyrénées. *Phytoma, La Défense des Végétaux* 582 : 60-4.
- Mayor JP, Maillard A, 1995. Résultats d'un essai de culture sans labour depuis plus de 20 ans à Changins. IV. Stock semencier et maîtrise de la flore adventive. *Rev Suisse Agric* 27 : 229-36.
- Mikanova O, Javurek M, Simon T, Friedlova M, Vach M, 2009. The effect of tillage systems on some microbial characteristics. *Soil Tillage Res* 105 : 72-6.
- Moonen AC, Barberi P, 2006. An ecological approach to study the physical and chemical effects of rye cover crop residues on *Amaranthus retroflexus*, *Echinochloa crus-galli* and maize. *Ann Appl Biol* 148 : 73-89.
- Moss SR, 1988. *Influence of cultivations on the vertical distribution of weed seeds in the soil*. VIII^e Colloque international sur la biologie, l'écologie et la systématique des mauvaises herbes. Dijon : AFPP.
- Mulugeta D, Stoltenberg DE, 1997. Weed and seedbank management with integrated methods as influenced by tillage. *Weed Sci* 45 : 706-15.
- Murphy SD, Clements DR, Belaussof S, Kevan PG, Swanton CJ, 2006. Promotion of weed species diversity and reduction of weed seedbanks with conservation tillage and crop rotation. *Weed Sci* 54 : 69-77.
- Nuutinen V, 1992. Earthworm community response to tillage and residue management on different soil types in southern Finland. *Soil Tillage Res* 23 : 221-39.
- Pardo G, Riravololona M, Munier-Jolain NM, 2010. Using a farming system model to evaluate cropping system prototypes: are labour constraints and economic performances hampering the adoption of integrated weed management? *Eur J Agron* 33 : 24-32.
- Quérel L, Druenes C, 2006. Le désherbage mécanique comme alternative ou complément chimique. *Perspectives Agricoles* 325 : 60-4.
- Roberts HA, Chancellor RJ, Hill TA, 1982. *The biology of weeds. Weed control handbook: principles*. H. A. Roberts, ed.
- Roger-Estrade J, Labreuche J, Richard G, 2011. Techniques Culturales Sans Labour (TCSL) et protection physique des sols ; *Cah Agric* 20 : 186-93.
- Shearin A, Reberg-Horton S, Gallandt E, 2008. Cover crop effects on the activity-density of the weed seed predator *Harpalus rufipes* (Coleoptera : Carabidae). *Weed Sci* 56 : 442-50.
- Singh S, Malik RK, Panwar RS, Baylan RS, 1995. Influence of sowing time on winter wild oat (*Avena ludoviciana*) control in wheat (*Triticum aestivum*) with isoproturon. *Weed Sci* 43 : 370-4.
- Swanton CJ, Shrestha A, Knezevic SZ, Roy RC, Ball-Coelho BR, 2000. Influence of tillage type on vertical weed seedbank distribution in a sandy soil. *Can J Plant Sci* 80 : 455-7.
- Teasdale JR, Mohler CL, 1993. Light transmittance, soil-temperature, and soil-moisture under residue of hairy vetch and rye. *Agron J* 85 : 673-80.
- Torresen KS, Skuterud R, Tandsæther HJ, Hagemo MB, 2003. Long-term experiments with reduced tillage in spring cereals. I. Effects on weed flora, weed seedbank and grain yield. *Crop Prot* 22 : 185-200.
- van der Werf H, Zimmer C, 1998. An indicator of pesticide environmental impact based on a fuzzy expert system. *Chemosphere* 36 : 2225-49.
- Yenish JP, Doll JD, Buhler DD, 1992. Effects of tillage on vertical distribution and viability of weed seed in soil. *Weed Sci* 40 : 429-33.
- Zanin G, Otto S, Riello L, Borin M, 1997. Ecological interpretation of weed flora dynamics under different tillage systems. *Agric Ecosyst Environ* 66 : 177-88.