

Conception et évaluation multicritères de prototypes de systèmes de culture dans le cadre de la protection intégrée contre la flore adventice en grandes cultures

Nicolas Munier-Jolain, Violaine Deytieux, Jean-Philippe Guillemin, Sylvie Granger, Sabrina S. Gaba

▶ **To cite this version:**

Nicolas Munier-Jolain, Violaine Deytieux, Jean-Philippe Guillemin, Sylvie Granger, Sabrina S. Gaba. Conception et évaluation multicritères de prototypes de systèmes de culture dans le cadre de la protection intégrée contre la flore adventice en grandes cultures. Innovations Agronomiques, 2008, 3, pp.75-88. hal-02667331

HAL Id: hal-02667331
https://hal.inrae.fr/hal-02667331

Submitted on 31 May 2020

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Innovations Agronomiques (2008) 3, 75-88

Conception et évaluation multicritères de prototypes de systèmes de culture dans le cadre de la Protection Intégrée contre la flore adventice en grandes cultures.

N. Munier-Jolain[1], V. Deytieux[2], J.P. Guillemin[1], S. Granger[1], S. Gaba[1]

[1] : UMR INRA-UB-ENESAD 1210 Biologie et Gestion des Adventices, 17 rue Sully, F-21065 Dijon cedex

[2] : INRA, Réseau PIC, UE Domaine Expérimental d'Epoisses, 17 rue Sully, F-21065 Dijon cedex

Correspondance : munierj@dijon.inra.fr

Résumé

La Protection Intégrée (PI) contre la flore adventice repose sur des combinaisons de techniques culturales visant à limiter le potentiel d'infestation des adventices dans les cultures en réduisant l'usage de traitements herbicides. Cet article présente le dispositif d'une expérimentation de longue durée visant à tester les performances de prototypes de systèmes de culture conçus selon les principes de PI. Les principales règles de décision sont présentées, en lien avec les connaissances disponibles sur la biologie des espèces adventices. Les résultats obtenus au cours des 6 premières années de l'essai indiquent que ces principes de PI permettent de maîtriser de façon satisfaisante les infestations tout en réduisant de façon importante la dépendance aux herbicides et les impacts environnementaux associés. Les aspects socio-économiques de l'évolution des systèmes de culture vers la PI sont également discutés.

Abstract

Integrated Weed Management (IWM) is based on the combination of management techniques aiming at reducing the potential for weed infestations during crop cycles, in order to reduce the use of herbicide. This paper presents a long term experiment conducted to assess the performances of cropping system prototypes designed according to IWM principles. The main decision rules are presented, along with their connexions with the available knowledge about weed biology. The results from the first six years show that IWM make it possible to control weeds with a low reliance on herbicides and reduced associated environmental impacts. Socio-economic aspects of modifying cropping systems toward IWM are also discussed.

Introduction

La protection intégrée (PI)

Les nouveaux enjeux environnementaux (réduction des pollutions diffuses, restauration de la biodiversité) fixés par les politiques agricoles (ex. réformes de la PAC) et/ou le Grenelle de l'Environnement conduisent à repenser les pratiques agricoles actuelles vers une agriculture moins dépendante de la lutte chimique. En parallèle, les enjeux de l'alimentation mondiale amènent à replacer la productivité au cœur des objectifs de l'agriculture. Ces nouveaux enjeux imposent de considérer l'ensemble des moyens possibles pour limiter l'impact des bioagresseurs des cultures tout en optimisant la production, en respectant l'environnement, en assurant la viabilité économique et en tenant compte de l'acceptabilité sociale par les acteurs.

La protection intégrée (PI) est définie comme étant un « système de lutte aménagée qui, compte tenu du milieu particulier et de la dynamique des populations des espèces considérées, utilise les techniques et méthodes appropriées de façon aussi compatible que possible en vue de maintenir les populations d'organismes nuisibles à des niveaux où ils ne causent pas de dommages économiques » (Milaire 1995). Il s'agit par conséquent d'employer les moyens de gestion valorisant les régulations physiques et biologiques pour maîtriser les infestations de bioagresseurs en agissant à différentes étapes de leur cycle de vie. Pour ce faire, la PI des cultures associe un ensemble de leviers aux effets complémentaires permettant d'empêcher le bon déroulement du cycle de vie des bioagresseurs. Il en résulte des systèmes de cultures qui combinent plusieurs techniques à effet partiel parmi lesquelles peut figurer un usage raisonné de xénobiotiques. Selon le cadre d'analyse du modèle ESR (Efficience, Substitution et Re-conception) proposé par Hill et MacRae (1995) et repris par Bellon *et al*. (2007), l'évolution des systèmes agricoles vers la PI peut mobiliser des adaptations visant (i) à améliorer l'Efficience des méthodes de lutte, (ii) à Substituer une technique de lutte par une autre (typiquement substitution d'un traitement chimique par une technique de lutte biologique ou mécanique), ou (iii) à Reconfigurer l'ensemble du système de culture. L'amélioration de l'efficience des méthodes de lutte chimique ne relève pas à proprement parler de la PI dans la mesure où elle ne mobilise en général pas les effets de régulation physique ou biologique des populations de bioagresseurs. La substitution d'une technique de lutte chimique par une solution alternative génétique ou biologique, lorsqu'elle existe, permet de remplir l'objectif de réduction d'usage des pesticides, mais sera le plus souvent confrontée à des problèmes de durabilité si la résistance de la variété utilisée est contournée ou si l'efficacité de la technique non chimique est insuffisante, ce qui conduirait à une augmentation plus ou moins rapide du niveau des infestations des bioagressseurs. La PI nécessitera donc le plus souvent d'envisager la re-conception du système, afin de lui assurer une nouvelle cohérence d'ensemble. Cette caractéristique de la PI justifie les recherches mobilisant des approches systémiques, éventuellement complémentaires d'études plus détaillées des processus individuels (par exemple : effet du travail du sol sur une espèce donnée).

Le rendement, la qualité des produits récoltés et les indicateurs économiques liés au revenu des agriculteurs sont des critères d'évaluation traditionnels des systèmes de culture. Ces critères restent pertinents pour les systèmes de PI, mais ne sont pas suffisants. L'évaluation de la performance des systèmes par rapport aux objectifs fixés nécessite de considérer en complément :

- des critères de dépendance aux pesticides (indicateurs du type IFT, Indice de Fréquence de Traitement) ;
- des critères liés aux impacts sur la santé humaine ;
- des critères liés aux impacts environnementaux : risques associés aux transferts de pesticides dans l'environnement (indicateurs du type I-Phy, Bockstaller *et al*., 1997 ; Bockstaller *et al*., 2006), contribution à l'eutrophisation des milieux, à la production de gaz à effet de serre ;
- voire des critères liés au bilan énergétique des cultures.

Par ailleurs, l'évaluation de la performance en termes de maîtrise des bioagresseurs est évidemment un élément important de l'évaluation des systèmes de culture proposés.

La Protection Intégrée contre les adventices

Au sein de la parcelle cultivée, la flore adventice (ensemble de la végétation herbacée cohabitant avec l'espèce cultivée) est généralement considérée comme nuisible du fait (i) de la compétition directe qu'elle exerce sur la culture pour les ressources (eau, lumière, éléments minéraux) à l'origine de pertes de rendement (Sen, 1988 ; Aubertot *et al.,* 2006) et (ii) de son rôle de réservoir pour certains bio-agresseurs (champignons, ravageurs) (Edwards, 2004). Du fait de l'étendue de la gamme d'herbicides

disponibles, de leur efficacité sur la quasi-totalité des espèces adventices et de leur facilité d'utilisation, la lutte contre les plantes adventices est aujourd'hui quasi-exclusivement fondée sur l'application d'herbicides. La PI est l'occasion de reconsidérer les effets des techniques culturales sur la flore adventice. Elle repose sur des combinaisons de techniques visant (i) à réduire le potentiel d'infestation (stock semencier superficiel), (ii) à esquiver les périodes de levée préférentielles des espèces présentes, (iii) à détruire les plantules levées au cours du cycle cultural, notamment par le désherbage mécanique, et (iv) à limiter la croissance des adventices, d'une part pour réduire la compétition vis à vis de la culture et donc les pertes de rendement, d'autre part pour restreindre la production semencière et le ré-alimentation du stock. L'ensemble doit permettre de limiter la dépendance aux herbicides. Prises individuellement, les techniques concernées ne permettent pas d'égaler le niveau d'efficacité des herbicides (Tableau 1), de sorte que la simple substitution n'est pas envisageable. Il faut combiner les techniques affectant la démographie des communautés adventices dans un système de culture cohérent et bien connaître les interactions entre techniques pour valoriser d'éventuelles synergies.

Cette communication repose sur une expérimentation de longue durée portant sur des prototypes de systèmes de culture conçus selon les principes de la PI contre la flore adventice. L'article présente succinctement la méthodologie de ce type d'expérimentation systémique, les règles de décisions constituant les systèmes testés et les liens entre ces règles et les connaissances disponibles, ainsi que les résultats de l'évaluation des performances des systèmes testés à l'échelle d'une rotation (6 ans).

Tableau 1 : Efficacités approximatives des différentes techniques culturales alternatives et comparaison avec l'efficacité attendue d'un herbicide

Techniques	Herbicides	Désherbage mécanique	Faux-semis	Densité de semis, écartement	Variétés compétitives	Culture de printemps dans une rotation type hiver
Efficacité	~ 98 %	47-61 %	56-72 %*	~ 75 %**	~ 75 %	20-96 %**

* Kurstjens & Kropff, 2001

** brochure 'Des parcelles plus propres avec moins d'herbicides' éditée par AgroTransfert Picardie

Expérimentation systémique : aspects méthodologiques

La méthodologie expérimentale utilisée pour la conception-évaluation de systèmes de culture est très différente de l'expérimentation factorielle classiquement utilisée en agronomie (Reau *et al*., 1996 ; Nolot et Debaeke, 2003 ; Lançon *et al*., 2007). La première étape consiste à définir les systèmes de culture en fonction des enjeux identifiés en termes d'objectifs, de contraintes, de grandes stratégies de gestion. Au cours de la deuxième étape, on définit des corps de règles de décisions susceptibles d'atteindre les objectifs fixés, sur la base des connaissances disponibles, de simulations avec des modèles, voire d'expertise, en veillant à la cohérence d'ensemble de ces règles. Puis, les corps de règles de décision sont mis en œuvre sur le terrain et des observations et des mesures sont réalisées afin de permettre d'évaluer les performances des systèmes et la pertinence des principes agronomiques sous-tendant les règles de décision. L'évaluation peut porter sur les performances d'ensemble du système de culture ou sur les règles de décision individuelles. En théorie, le prototypage de systèmes de culture prévoit des boucles de progrès, avec des ajustements des règles de décision en fonction des résultats des évaluations. Dans le cas de systèmes de PI contre la flore adventice, l'évaluation porte largement sur l'évolution démographique à long terme de la flore, donc les corps de règles doivent rester suffisamment stables au cours du temps (Debaeke *et al*., 2008).

Définition *a priori* des systèmes, dispositif expérimental

L'expérimentation systémique de longue durée de Dijon-Epoisses a été initiée en 2000 (premières récoltes en 2001). Les objectifs sont d'évaluer les performances de systèmes relevant de la PI contre les adventices. L'évaluation porte sur la maîtrise des adventices à long terme et le niveau de dépendance aux herbicides, mais aussi sur les impacts environnementaux, la faisabilité technique et la performance économique. Comme les systèmes de PI reposent largement sur un grand nombre de passages d'outils de travail du sol, que ce soit pour la réalisation de faux-semis ou pour le désherbage mécanique, l'évaluation des systèmes en termes de bilan énergétique et d'émission de gaz à effet de serre est particulièrement importante.

L'essai est situé dans la plaine de Dijon, sur des sols très argileux (35 à 45 % d'argile) à potentiel agronomique plutôt élevé. Le dispositif comporte cinq systèmes de culture : un système de référence SC1, correspondant à un système bourguignon visant à maximiser la rentabilité économique, et quatre systèmes relevant de la PI :

- **SC2 : système de PI sans labour**. Ce système correspond à des exploitations à faible main d'œuvre par hectare minimisant le temps de travail et les interventions à faible débit de chantier. Les systèmes sans labour (TSC, …) sont très dépendants des herbicides, notamment des anti-graminées. Il est donc intéressant d'évaluer si la PI permet de réduire la dépendance aux herbicides dans ce cadre. Le désherbage mécanique, considéré comme trop consommateur de temps, n'est pas envisagé sur ce système.
- **SC3 : système de PI sans désherbage mécanique**. Ce système ne comporte aucune contrainte en termes de travail du sol. Toutefois, le désherbage mécanique en cours de culture n'est pas envisagé puisqu'il est considéré *a priori* comme fortement consommateur de temps et qu'il nécessite un équipement spécifique. Ce système permet d'évaluer la possibilité d'évoluer vers la PI sans modifier le parc de matériel et sans conséquence lourde sur l'organisation du travail.
- **SC4 : système de PI typique**. Ce système mobilise l'ensemble des moyens agronomiques disponibles pour lutter contre les infestations adventices, y compris le désherbage mécanique et les herbicides en dernier recours si les autres techniques paraissent insuffisantes. Ce système a en outre la spécificité d'intégrer la betterave dans sa rotation, afin d'évaluer la possibilité de réduire la dépendance de cette culture aux herbicides, notamment par l'association de désherbage chimique et mécanique.
- **SC5 : système extrême sans herbicide**. Ce système diffère cependant d'un système biologique puisque la fertilisation repose sur des engrais minéraux et que l'usage d'insecticides, molluscicides et fongicides est autorisé de façon raisonnée.

Le dispositif expérimental comporte deux répétitions des corps de règles de décision de chaque système. Les choix techniques entre les deux répétitions peuvent différer si les états malherbologiques diffèrent. Ceci est d'autant plus probable que les deux parcelles d'un même système ne sont pas cultivées avec la même culture une année donnée (décalage dans la succession de culture). Chaque parcelle est de grande taille (1,7 ha en moyenne) permettant la caractérisation de la flore adventice en tenant compte des hétérogénéités spatiales. La caractérisation de la flore adventice repose sur trois méthodes complémentaires :

- Les mesures de densité de semences dans le sol (stock semencier) à partir de prélèvement de carottes sur une station de 100 m² identifiée au moyen de balises magnétiques enfouies. Ces mesures ont été réalisées chaque année au début de l'expérimentation, mais la fréquence des prélèvements a décru au fil du temps en raison de la lourdeur de la méthode utilisée.
- Des comptages sur « quadrats » (60 x 60 cm) réalisés de deux à quatre fois par an ;

- Des observations visuelles de flore géo-référencées au GPS réalisées au cours d'un arpentage assez exhaustif de la parcelle permettent de réaliser des cartes d'infestation et de suivre la diversité des espèces et l'évolution des tâches en surface et en densité.

Règles de décision des systèmes de Protection Intégrée

Chaque système de culture testé expérimentalement est associé à un corpus de règles de décision, qui en théorie suffit à piloter l'ensemble du système de culture. Ces règles sont issues, selon les cas, de connaissances d'experts, de simulations avec les modèles disponibles, de résultats expérimentaux. Dans la pratique, il est impossible d'expliciter des règles correspondant à toutes les interventions et adaptées à toutes les situations agronomiques rencontrées, mais les interventions techniques les plus susceptibles d'affecter la démographie des adventices sont soumises à des règles explicites fondées sur la connaissance des interactions entre la biologie des espèces et les systèmes de culture, déterminant les processus de régulation physique et biologique. Nous en donnons ici les principaux exemples :

- **Succession culturale :** Dans les quatre systèmes relevant de la PI, la succession culturale est diversifiée par rapport à la succession colza-blé-orge du système de référence. Cette diversification vise principalement à diversifier les dates de semis – et donc le positionnement des cycles culturaux - à l'échelle de la succession culturale, afin d'éviter de sélectionner les espèces au cycle de développement coïncidant avec un cycle cultural donné. La diversification de la rotation permet donc d'augmenter le temps entre deux générations successives pour une espèce donnée dans l'objectif de réduire sa présence dans le stock de semences en tirant profit de la mortalité naturelle des semences (prédation, dégradation sous l'effet des micro-organismes, épuisement des réserves, germinations n'aboutissant pas à une nouvelle multiplication de semences en raison d'une mortalité de la plante plus ou moins précoce, …). La persistance des semences dans le sol varie selon les espèces (Barralis *et al.,* 1988) : par exemple les espèces à levée automnale typiques des cultures céréalières (vulpin, gaillet, …) ont en général des taux de persistance plus faibles que les espèces à levée printanière (chénopode, amarante, …). Ainsi, pour une espèce à levée automnale, une année sans production semencière entre deux générations successives permettra une diminution du potentiel d'infestation beaucoup plus importante que pour une espèce à levée printanière. Cette constatation justifie des successions culturales diversifiées plus riches en cultures d'automne qu'en culture de printemps. La succession 'type' des systèmes de PI testés sur l'essai correspond à : **colza – céréale d'hiver – culture de printemps – céréale d'hiver – culture d'été – céréale d'hiver**. Les successions culturales sont donc d'une durée de l'ordre de 6 ans. Toutefois, la succession n'est jamais fixée *a priori* et peut être adaptée en fonction des états du milieu, de la flore adventice ou de l'environnement socio-économique. De plus, dans les systèmes permettant l'usage d'herbicides (SC2, 3 et 4), on cherche à alterner tous les 6 ans environ des cultures d'été de graminées (maïs, sorgho) et de dicotylédones (soja, tournesol) pour pouvoir alterner des herbicides à spectre d'action complémentaires tout en se limitant à des herbicides à faible risque environnemental. Enfin, on implante préférentiellement des cultures à bon pouvoir couvrant et adapté aux systèmes. Par exemple le tournesol et le lupin, cultures adaptées au binage, sont cultivés dans les systèmes SC4 et 5.
- **Dates de semis, densité et écartement :** L'esquive des périodes de levée préférentielles des adventices nécessite des adaptations des dates de semis des cultures. En automne, les adventices des céréales lèvent préférentiellement en octobre et de façon limitée en novembre. Les simulations du modèle AlomySys montre que le retard de date de semis de 3 à 4 semaines des céréales permet de réduire le potentiel de levée en début de cycle jusqu'à 90 % (Colbach *et al*., 2008). La règle pour les semis des céréales d'hiver est donc d'attendre le 25 octobre avant de semer. Par ailleurs, pour maximiser la vitesse de couverture du sol, les densités de semis sont élevées (par

exemple, 400 gr/m² pour les céréales), ce qui permet de diminuer la croissance et la production de semences des adventices (Olsen *et al.*, 2005), mais également de compenser les pertes éventuelles liées au désherbage mécanique en systèmes SC4 et 5. Pour les cultures qui ne sont pas binées, l'écartement entre les rangs est réduit autant que possible avec le matériel disponible, ce qui contribue également à maximiser l'aptitude à la concurrence du couvert cultivé (Munier-Jolain, 2001; Olsen *et al.*, 2005).

- **Travail du sol superficiel et faux-semis :** En absence de couvert végétal implanté pendant l'interculture, la stratégie de gestion repose sur des nombreux passages d'outils superficiels visant (i) à détruire les adventices présentes pour éviter la production de nouvelles semences et (ii) à stimuler la germination de semences superficielles non dormantes pour réduire le potentiel d'infestation dans la culture suivante (effet 'faux-semis'). Les passages sont nombreux (un nouveau passage après chaque épisode humide favorisant la germination), mais très superficiels (5 à 8 cm max) afin de ne pas remonter de nouvelles semences des horizons profonds, en particulier juste avant les semis. La fréquence des passages permet de maximiser à la fois les germinations et l'efficacité de destruction des plantules, qui sont d'autant plus fragiles que le travail intervient peu de temps après la levée (voire avant la levée, au stade 'fil blanc').
- **Labour : fréquence et place dans la rotation** : Le labour est un élément important de gestion du stock semencier (cf Colbach *et al*., 2008). Il permet de gérer la profondeur d'enfouissement des semences d'adventices, alors que celle-ci influence la possibilité de levée, en fonction de l'espèce, de la vigueur de la plantule, elle-même corrélée au poids moyen d'une graine des espèces concernées (Gardarin *et al*., soumis). Mais l'effet du labour sur la démographie des adventices dépend de la succession culturale (cf Encadré 1). La règle retenue pour l'expérimentation, dans les systèmes de culture en PI autorisant le labour (systèmes SC3, 4 et 5) est d'un labour entre deux cultures potentiellement infestées par la même flore (typiquement entre deux blés).
- **Choix variétal** : De nombreuses études ont démontré les différences d'aptitude à la compétition existant entre variétés d'une même espèce cultivée. Pour le blé, un essai comparatif a été réalisé une année sur des zones non traitées. Un réseau d'essai financé par le FSOV a été conduit sur ce thème en 2006-2007 et 2007-2008. Ces essais ont été pris en compte pour les choix variétaux en blé sur les systèmes en PI, successivement Virtuose et Cézanne. Malheureusement, ces deux variétés présentent des défauts par ailleurs : qualité vis-à-vis de la panification pour l'une et risque de germination sur pied pour l'autre. On ne dispose donc pas pour l'instant de la variété idéale à la fois compétitive et satisfaisant aux exigences de qualité. En colza, l'utilisation d'hybrides permet de valoriser la vigueur initiale de ces variétés, permettant d'atteindre plus facilement des objectifs de couverture du sol en automne au moment des périodes de levée des espèces automnales.
- **Désherbage** : Dans les systèmes de PI (sauf dans le système SC5), l'utilisation d'herbicides est autorisée pour contrôler les populations lorsque la combinaison de toutes les autres techniques mises en œuvre est insuffisante. Des études théoriques ont montré qu'il est inapproprié de chercher à raisonner sur un seuil d'intervention défini pour chaque couple espèce adventice - culture en vue de réduire la dépendance aux herbicides (Munier-Jolain *et al*., 2002). En raison des effets cumulatifs à long terme liés à la persistance des stocks semenciers, l'adaptation des seuils d'intervention dans un système de culture donné ne fait que déplacer le niveau moyen d'infestation sans modifier la pression de désherbage nécessaire pour stabiliser la densité des adventices au niveau objectif. Dans les systèmes testés, la décision du traitement herbicide et le choix des produits dépendent d'une décision multi-critère reposant sur (i) l'efficacité des programmes de désherbage candidats sur la flore présente et (ii) leur impact environnemental évalué avec l'indicateur I-pest/I-phy (Bockstaller *et al.*, 1997). L'outil d'aide à la décision DECID'Herb (Munier-Jolain *et al*., 2005) permet de choisir des solutions les plus conformes aux exigences multi-critères. Les impasses de désherbage sont décidées soit lorsque les niveaux d'infestation sont faibles au regard des infestations dans les cultures précédentes dans la succession (pas de tendance

constatée à la dégradation du niveau d'enherbement), soit lorsque les solutions envisageables présentent de mauvais profils environnementaux. Pour les systèmes SC4 et SC5, le désherbage mécanique est envisagé en priorité en suivant les recommandations issues des nombreux essais conduits depuis quelques années en France sur ce thème, et en tenant compte de l'expérience acquise par la ferme expérimentale dans ce domaine. Dans le système SC4, le seul permettant d'associer le désherbage chimique et le mécanique, le désherbage chimique est localisé sur le rang sur les cultures à grand écartement au semis ou en post-levée.

Encadré 1 : Fréquence du labour dans la rotation

Les simulations réalisées pour le vulpin avec un modèle démographique très simple (Munier-Jolain *et al*., 2002) montrent les interactions entre la rotation et la fréquence du labour (Figure 1). Le cas d'étude est une rotation maïs-blé, et le modèle repose sur l'hypothèse que le vulpin n'infeste que le blé, les germinations de printemps étant détruites par les préparations de sol au semis du maïs. En cas de travail superficiel tous les ans, les semences produites par les vulpins se développant dans le blé restent en surface, et sont donc en position favorable pour infester le blé suivant, deux ans après. Malgré un désherbage anti-graminées systématique dans le blé, la maîtrise de la population n'est pas assurée. En cas de labour tous les ans, les semences produites sont enfouies en profondeur, mais remontées par le labour suivant juste avant le semis du blé. L'effet de dilution du stock semencier sur l'épaisseur travaillée par les deux labours successifs permet de réduire le potentiel d'infestation, ce qui contribue à la maîtrise de la population, mais nécessite toujours un traitement presque tous les ans dans le blé. En revanche, en cas de labour un an sur deux, les semences restent en profondeur pendant deux ans avant d'être remontées en surface juste avant le semis du maïs, qui ne permet pas une nouvelle production semencière. La durée entre deux générations successives de vulpin est alors de 3 ans, au lieu d'un an dans le cas du labour tous les ans. La population de vulpin est maîtrisée, alors que l'usage des herbicides anti-graminées est limité à quelques traitements, un blé sur 8 environ. Selon ces simulations, la place du labour (avant le semis du blé ou avant le semis du maïs) n'a pas d'influence sur le comportement de la population. Ces résultats théoriques ont permis de définir la règle liée à la fréquence du labour dans les systèmes de Protection Intégrée (sauf le système SC2, sans labour par définition)

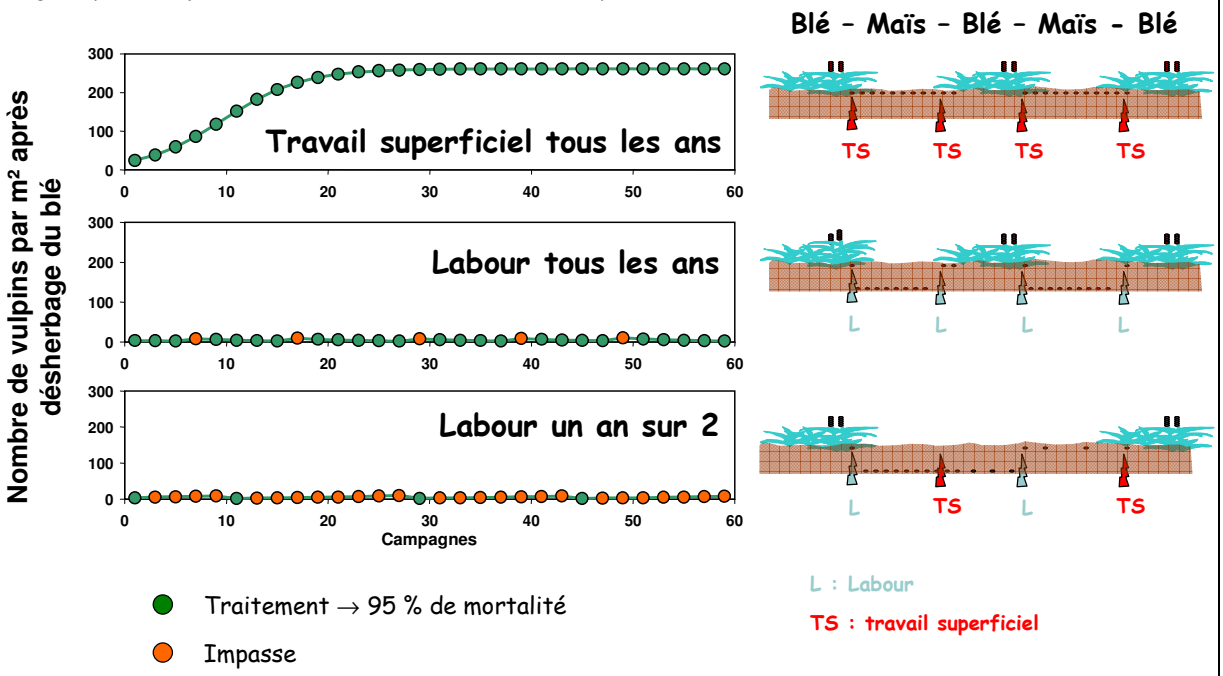


Figure 1 : Effets de la fréquence du labour sur la démographie d'une population de vulpin dans le cas d'une rotation maïs-blé. La figure de gauche présente la densité de vulpin en fonction des pratiques appliquées chaque année. La figure de droite illustre les périodes de labour (L) ou de travail superficiel (TS).

Résultats : évaluation multicritère des systèmes de PI contre la flore adventice

Dépendance aux herbicides et impacts environnementaux liés aux herbicides

L'Indice de Fréquence de Traitement (IFT) intégrant le nombre de passages et la dose appliquée (en relatif par rapport à la dose homologuée) est un bon indicateur de la dépendance aux pesticides. Sur la période 2001-2006, l'IFT-Herbicides des systèmes en PI a été divisé par 2 pour les systèmes SC2 et SC3 par rapport au système de référence, et par 3 pour le système SC4, système de Protection Intégrée 'typique' (Figure 2), montrant ainsi une forte réduction de la dépendance aux herbicides de ces systèmes. L'IFT-herbicide du système SC5 est évidemment nul.

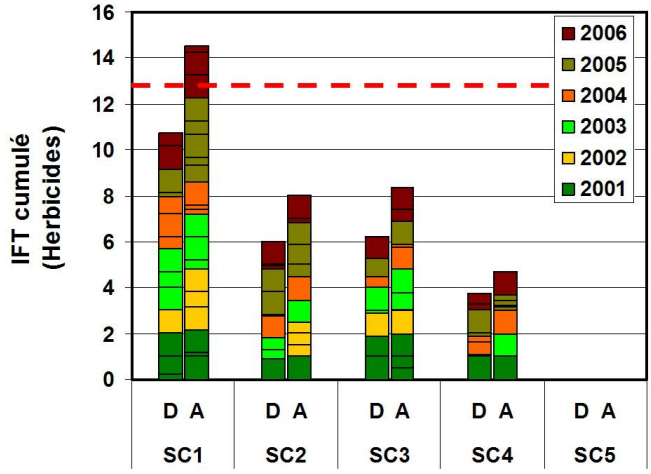


Figure 2 : Indice de Fréquence de Traitement (IFT) cumulé pour les 10 parcelles de l'essai au cours des 6 premières années 2001-2006. D et A sont les deux îlots de parcelles correspondant aux deux répétitions. La ligne horizontale en pointillés correspond à la moyenne du système de référence SC1

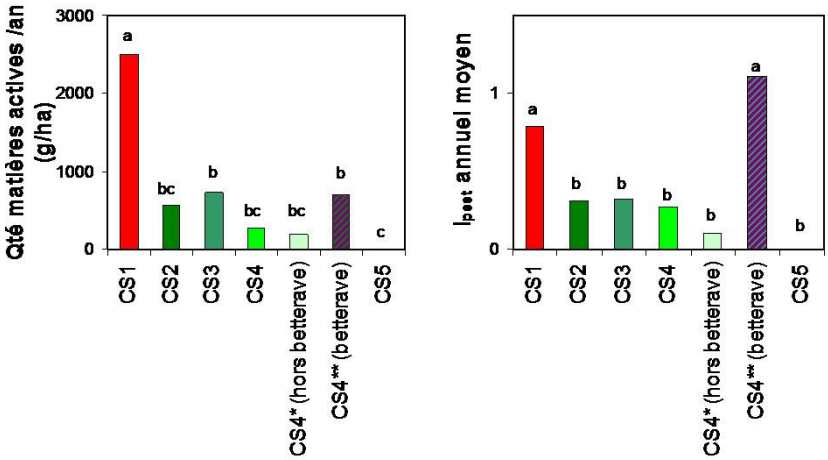


Figure 3 : Quantité moyenne de substances actives et indicateur I-pest annuel moyen sur les campagnes 2001-2006, pour les 5 systèmes de culture testés. Le système SC4 est le seul comportant une année de betterave qui affecte considérablement les indicateurs d'impacts environnementaux. La betterave est donc présentée séparément (d'après Debaeke *et al.*, sous presse).

L'évaluation des systèmes en termes de quantité de substances actives herbicides et d'indicateur d'impact I-pest (Bockstaller *et al.*, 1997), est encore plus discriminante (Figure 3). La réduction de la quantité appliquée est de l'ordre de 70 % pour les systèmes SC2 et SC3, de l'ordre de 90 % pour le système SC4. Les résultats en termes d'indicateur d'impact environnemental (I-pest) sont également satisfaisants. En betterave, malgré l'application d'herbicides en mélange à faibles doses, mais de façon répétée, et malgré le désherbage localisé sur le rang, en complément du binage de l'inter-rang qui permet de diviser par 3 la dose par hectare, la quantité de substances actives appliquées est assez importante. Par ailleurs, l'indicateur I-pest est défavorable aux mélanges de produits à faibles doses, et donc à la betterave, en raison du mode d'agrégation retenu.

Encadré 2 : Indicateurs 'Pesticides'

Les indicateurs IFT et I_{pest}-I_{phy} sont deux indicateurs 'Pesticides' complémentaires :

- L'indicateur IFT est un indicateur de dépendance aux pesticides. Il se calcule par cumul du nombre de traitements, chaque traitement étant pondéré par la dose utilisée, exprimée en valeur relative par rapport à la dose homologuée pour la cible visée.
- L'indicateur I_{pest}-I_{phy} (Bockstaller *et al*., 1997) est un indicateur d'impact environnemental. Il s'agit d'un système complexe intégrant les risques parcellaires de transfert vers les eaux des rivières et des nappes phréatiques (en fonction par exemple de la texture, de la pente de la profondeur de sol), les conditions d'application (couverture du sol par la végétation à la date de traitement) et les caractéristiques intrinsèques des substances actives (mobilité dans le sol, durée de persistance, toxicité pour les humains et divers organismes aquatiques, volatilité dans l'air…). I_{pest} et I_{phy} sont un seul et même indicateur : ils ne diffèrent que par l'échelle de présentation : de 0 (bon) à 1 (mauvais) pour I_{pest} ; de 10 (bon) à 0 (mauvais) pour I_{phy}. Les calculs présentés dans cet article correspondent au cas d'une parcelle aux risques moyens de transfert par ruissellement et par lessivage.

Autres impacts environnementaux

Les systèmes de culture testés sur le dispositif reposent largement sur des stratégies de sol nu pendant les intercultures associées à des passages d'outils superficiels nombreux pour favoriser la levée et la destruction des plantules adventices et réduire d'autant le stock semencier superficiel. Ces passages d'outils consomment du carburant et génèrent des émissions de gaz à effet de serre. En systèmes SC4 et SC5, le désherbage mécanique est une source supplémentaire de consommation d'énergie. Il est donc important d'évaluer les conséquences de ces systèmes sur la consommation d'énergie et la contribution au réchauffement climatique. Une méthode d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) (Gaillard *et al*., 2007) a été utilisée pour quantifier ces impacts. Seule la production de gaz à effet de serre (GES) est présentée ici, mais les résultats concernant la consommation d'énergie sont assez similaires.

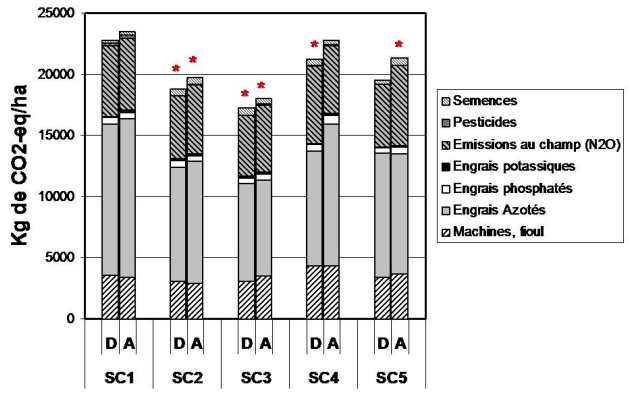


Figure 4 : Emissions de gaz à effet de serre, exprimées en équivalents CO_2 par hectare pour une échéance de 100 ans, cumulés sur 6 ans (campagnes 2001-2006) pour les 10 parcelles de l'expérimentation (d'après Deytieux *et al*., en préparation). Les émissions sont estimées avec la méthode SALCA (Gaillard *et al*., 2007). Les étoiles correspondent aux successions culturales intégrant une légumineuse

.

Selon les estimations, la contribution au réchauffement climatique est plutôt plus faible dans les systèmes relevant de la PI, comparés à la référence (Figure 4). Ceci est lié au fait que la mécanisation ne représente qu'une faible part dans les émissions de GES. La majeure partie des émissions est liée directement ou indirectement aux engrais azotés, soit par le biais de l'énergie nécessaire à la synthèse des engrais, soit par le biais des émissions d'oxydes d'azote liées aux pertes d'engrais azotés. Or, les apports d'engrais azotés ont été plus faibles dans les systèmes en PI, d'une part parce que les niveaux de fertilisation azotée sont réduits en céréales, en cohérence avec des dates de semis tardives et des objectifs de rendements réduits, d'autre part parce que la diversification des successions culturales a permis d'introduire des légumineuses (soja, féverole, lupin) qui ne reçoivent aucun engrais azoté. Selon ces résultats, il apparaît clairement que, pour diminuer l'impact des cultures sur le réchauffement

climatique, il est beaucoup plus efficace d'optimiser la fertilisation azotée que de limiter le nombre de passages d'outils lorsque ceux-ci sont utiles par ailleurs pour maîtriser des bioagresseurs. Ceci est moins vrai si l'on considère l'impact « consommation en énergie » pour lequel les engrais et la mécanisation contribuent de manière quasi équivalente.

Maîtrise de la flore adventice

La densité ou la biomasse des adventices à une date donnée ne sont pas des bons indicateurs de maîtrise de la flore. Un niveau d'enherbement plus important dans un système utilisant peu d'herbicides par rapport à un système à très forte utilisation d'herbicide peut être toléré si ces niveaux ne pénalisent pas le rendement de façon significative. De plus, un enherbement maîtrisé (choix des espèces présentes) peut être favorable aux diverses composantes de la biodiversité (ex. ressources trophiques). Le principal indicateur de maîtrise retenu est l'évolution démographique au cours du temps. Par exemple, sur le système SC4 de Protection Intégrée typique (îlot A), à faible usage d'herbicide, l'abondance des espèces n'augmente pas au cours de la période 2001-2006 (Figure 5). Les valeurs des coefficients de corrélation entre d'une part le rang de l'année (depuis le début de l'essai) et d'autre part la densité de mauvaises herbes calculées pour les 10 parcelles montrent que la densité des adventices décroît ou se maintient sur cette période (Tableau 2) pour l'ensemble des espèces ou pour les différents groupes (dicotylédones à germination automnale, dicotylédones à germination printanière, graminées), à seulement deux exceptions :

- L'augmentation de la densité de graminées (principalement vulpin) sur une des 2 parcelles du système SC2 confirme qu'il est délicat de réduire l'usage d'herbicides anti-graminées sur les systèmes sans labour. Cependant, on a aussi montré que pour ces espèces à stock semencier peu persistant, l'augmentation du potentiel d'infestation peut être très rapide pendant les années favorables à la multiplication de l'espèce, mais également que la décroissance peut être très rapide au cours d'une année sans apport de nouvelles semences.
- L'augmentation de la densité de dicotylédones printanières sur une parcelle du système SC4 s'explique par un événement défavorable. Le désherbage mixte 'chimique sur le rang-mécanique dans l'inter-rang' en betterave a été mal maîtrisé la première année où la technique a été utilisée sur le domaine expérimental. Ceci s'est traduit par une infestation et une production semencière importantes et par des levées denses de plantules dans les cultures suivantes. Toutefois, ces levées étaient soit trop tardives pour concurrencer les cultures, soit bien maîtrisées par le désherbage et n'ont par conséquent pas eu de conséquence agronomique importante. La même technique de désherbage mixte a été beaucoup mieux maîtrisée sur l'autre parcelle du système SC4 l'année suivante.

Globalement, sur l'ensemble des 8 parcelles conduites selon les principes de PI, la maîtrise de la flore est satisfaisante, même sur les systèmes sans aucun herbicide.

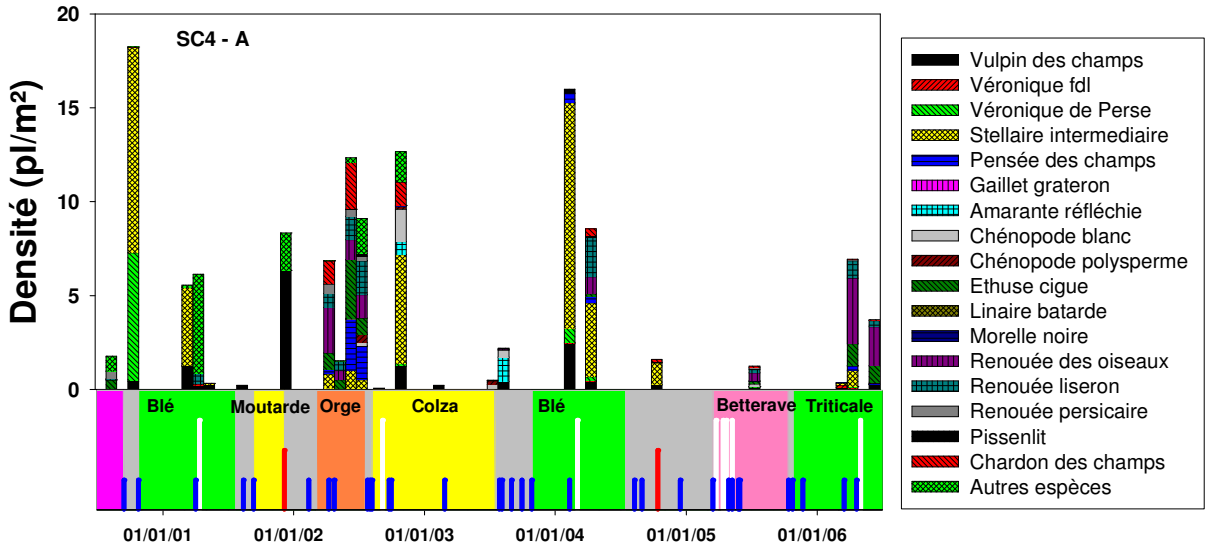


Figure 5 : Evolution démographique de la communauté adventice sur la parcelle SC4-A au cours des 6 premières campagnes de l'expérimentation

Tableau 2 : Coefficients de corrélation de Spearman entre le rang de l'année (depuis le début de l'essai) et la densité des adventices, pour les 10 parcelles de l'expérimentation, respectivement avant et après désherbage. Un coefficient de corrélation non significativement différent de 0 indique une densité stable au cours du temps et donc une infestation maîtrisée (d'après Chikowo *et al*., soumis).

		Toutes espèces		**Annuelles Dicots hivernales**		**Annuelles Dicots printemps-été**		**Annuelles Graminées**	
	Rep	Avant désherbage	Après désherbage	Avant désherbage	Après désherbage	Avant désherbage	Après désherbage	Avant désherbage	Après désherbage
SC1 - Standard	A	-1***	0.1	-1***	0.20	-0.73	-0.2	0.2	0.7
	D	-0.4	0.77	0.8	-0.67	-0.77	0.15	0.4	0.52
SC2 - PIC - TCS	A	-0.8	0.20	-0.77	-0.72*	-0.31	0.01	0.4	0.43
	D	0.66	-0.08	0.87	0.29	-0.72	0.34	0.87*	-0.05
SC3 – PIC sans désherbage méca.	A	0.16	-0.19	0.16	0.31	0.32	-0.13	-0.88*	-0.87**
	D	nc	-0.06	nc	0.34	nc	0.14	nc	-0.35
SC4 – PIC avec désherbage méca.	A	nc	0.07	nc	0.20	nc	0.12	nc	0.22
	D	nc	0.55	nc	-0.23	nc	0.87*	nc	-0.23
SC5 – zero herbicide	A	-0.2	0.07	-0.86	0.11	0.15	0.07	-0.31	-0.07
	D	-0.1	-0.14	0.05	0.00	-0.16	-0.05	0.05	0.30

nc : données manquantes

⇨ Décroissance de l'infestation : maîtrise de la flore OK
⇨ Stabilité de l'infestation : maîtrise de la flore OK
⇨ Croissance de l'infestation : défaut de maîtrise

Aspects socio-économiques : organisation du travail et performance économique

Les principes de PI tels qu'ils sont expérimentés à Epoisses présentent des éléments défavorables à l'organisation du travail à l'échelle de l'exploitation agricole, ce qui peut limiter la faisabilité et l'acceptabilité des systèmes. La multiplication des passages d'outils pour la réalisation des faux-semis et le désherbage mécanique, parfois avec des outils à faible débit de chantier, sont susceptibles de

générer des difficultés d'organisation du travail pour l'agriculteur. En contrepartie, le nombre de passages de pulvérisateur est diminué, et la diversification des successions culturales permet d'attendre une meilleure répartition des travaux dans le temps. Du point de vue économique, on attend des réductions des charges en pesticides, mais également des charges de mécanisation plus élevées et des rendements plus faibles en tendance. Des simulations de l'organisation du travail dans des exploitations agricoles fictives qui pratiqueraient les systèmes de culture testés sur l'expérimentation de longue durée ont été réalisées avec le simulateur Equip'agro (Chambre Régionale d'Agriculture de Bourgogne). Ces simulations intègrent le nombre de jours disponibles pour les travaux agricoles aux différentes périodes de l'année, en fonction des conditions climatiques, du type de sol et de la nature des interventions à réaliser. Cette analyse a montré que les opérations de travail du sol pour la réalisation de faux-semis et le désherbage mécanique s'intègrent potentiellement bien dans le calendrier de travail. En revanche, la règle des semis tardifs des céréales peut générer des tensions d'organisation du travail en raison de la baisse rapide du nombre de jours disponibles pour les semis à la fin octobre et en novembre. L'étude économique a confirmé la très forte réduction du coût des intrants pesticides en système PI (en moyenne -150 euros par ha). Mais les rendements sont en moyenne plus faibles : en blé, la production est réduite d'environ 20% du fait des semis tardifs, de la moindre fertilisation azotée, du choix variétal n'intégrant pas de façon prioritaire le critère de productivité. Pour d'autres cultures, comme le colza ou l'orge, les rendements sont équivalents à la référence. Les systèmes en PI sont aussi caractérisés par des successions diversifiées, intégrant des cultures « de diversification » semées au printemps, présentant un potentiel de rendement plus faible et moins stable entre années. Globalement, en utilisant les données issues de l'expérimentation, la mise en œuvre des systèmes de PI génèrerait une baisse du revenu agricole, de l'ordre de 100 euros par hectare dans le contexte des prix de l'année 2006. Cet écart est essentiellement lié à la faible productivité des cultures « de diversification », et non au rendement du blé ou aux charges de mécanisation. Bien qu'on puisse penser qu'il existe un potentiel pour améliorer la maîtrise et la productivité de ces cultures « de diversification », ces résultats indiquent que les systèmes de PI nécessiteront un soutien financier pour assurer leur compétitivité, soit par des prix du marché tenant compte de leur haute qualité environnementale, soit par des différentiels de soutien public.

Valorisation du dispositif expérimental et relation avec le développement agricole

De nombreuses initiatives ont vu le jour en France pour expérimenter des systèmes innovants relevant de la PI dans le contexte de la réalité des exploitations agricoles. Ces initiatives sont souvent animées en réseau par des Chambres d'agriculture et sont coordonnées par le RMT 'Systèmes de Culture Innovants'. La démarche consiste à co-construire des systèmes innovants avec les agriculteurs volontaires et à évaluer les progrès obtenus, notamment sur le plan des impacts environnementaux. La réduction de la dépendance aux herbicides est souvent considérée comme un des principaux facteurs limitants, et l'expérimentation INRA de Dijon-Epoisses joue un rôle moteur de démonstration de la faisabilité et de l'efficacité technique de la PI contre la flore adventice. De nombreux groupes d'agriculteurs et de conseillers ont visité le dispositif et pu constater sur le terrain la bonne maîtrise de la flore dans des systèmes très peu consommateurs d'herbicides. Evidemment, la co-construction avec les agriculteurs de systèmes innovants est difficile en raison des contraintes spécifiques de chaque exploitation, en particulier la contrainte économique. Les agriculteurs motivés par la réduction de la dépendance aux pesticides ont naturellement tendance à privilégier des évolutions incrémentales progressives de leurs systèmes de culture, en adoptant dans un premier temps les éléments techniques de la PI qui leur semblent les plus accessibles. Cette démarche naturelle peut cependant présenter un risque, car il est probable que les systèmes intermédiaires entre le « tout chimique » et la « PI en rupture » ne correspondent pas à des « optimum » du point de vue des performances économiques et environnementales.

La valorisation commune de ces initiatives, permise par l'organisation en réseau, est un élément important. D'une part, elle permet une cohérence d'ensemble des initiatives locales, la construction d'une expertise partagée par les différents interlocuteurs du réseau. D'autre part, la comparaison sur une base multi-critères des systèmes testés sur le territoire national, dans leur diversité, permettra de mettre en évidence les antagonismes éventuels entre différents critères d'évaluation (par exemple, la valeur environnementale et la performance économique), de caractériser la forme de ces antagonismes, permettant d'orienter les décisions des pouvoirs publics qui encadreront les évolutions probables de l'agriculture, et enfin d'identifier les systèmes les plus performants et de les analyser pour comprendre les déterminants de leur succès.

Remerciements : *Dominique Meunier, Florence Strbik, François Dugué, Pascal Farcy, Philippe Chamois et toute l'équipe 'Systèmes de Culture' du Domaine expérimental d'Epoisses contribuent à la conduite de l'expérimentation de longue durée et au suivi des parcelles. Les travaux présentés ont été soutenus financièrement par la Région Bourgogne, le projet ANR GEDUPIC et le réseau Européen ENDURE. Nous remercions également Gérard Gaillard et Thomas Nemecek d'ART (Suisse) pour leur collaboration à la mise en œuvre de la méthode SALCA.*

Références bibliographiques

Aubertot J.N., Colbach N., Félix I., Munier-Jolain N.M., Roger-Estrade J., 2006. Partie 3, chapitre 8: La composante biologique. In : T. Doré, M. Le Bail, P. Martin, B. Ney, J. Roger-Estrade (Eds.), L'agronomie aujourd'hui, Versailles, France, INRA Éditions, p. 199-224.

Barralis G., Chadoeuf R., Lonchamp J., 1988. Longévité des semences de mauvaises herbes annuelles dans un sol cultivé. Weed Research 28, 407-418.

Bellon S., Bockstaller C., Fauriel J., Geniaux G., Lamine C., 2007. To design or to redesign: how can indicators contribute. In: Donatelli, Hatfield, Rizzoli, (Eds). Farming systems design 2007: an international symposium on methodologies for integrated analysis of farm production systems; Field-farm scale design and improvement. La Goliardica Pavese, Pavia (ITA), 2007. p 137-138.

Bockstaller C., Girardin P., van der Werf H.M.G., 1997. Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems. European Journal of Agronomy 7, 261-270.

Bockstaller C., Girardin P., 2006. Evaluation agri-environnementale des systèmes de culture : la méthode INDIGO. Oléoscope 2006, 85, 4-6

Colbach N., Gardarin A., Granger S., Guillemin J.P., Munier-Jolain N., 2008. La modélisation au service de l'évaluation et de la conception des systèmes de culture intégrés. Innovations Agronomiques (sous presse).

Debaeke P., Munier-Jolain N.M., Bertrand M., Guichard L., Nolot J.M., Faloya V., Saulas P., 2008. Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: methodology and case studies. Agronomy for Sustainable Development (sous presse).

Edwards S.G., 2004. Influence of agricultural practices on fusarium infection of cereals and subsequent contamination of grain by trichothecene mycotoxins. Toxicology Letters 153, 29-35.

Gaillard G., Freiermuth R., Baumgartner D., Calanca P.L., Jeanneret P., Nemecek T., Oberholzer H. R., Prasuhn V., Richner W., Weisskopf P., 2007. Methode zur Ökobilanzierung landwirtschaftlicher Systeme. Schriftenreihe der ART.

Hill S.B., MacRae R.J., 1995. Conceptual frameworks for the transition from conventional to sustainable agriculture. Journal of Sustainable Agriculture 7, 81-87.

Kurstjens D.A.G. Kropff M.J., 2001. The impact of uprooting and soil-covering on the effectiveness of weed harrowing. Weed Research 41, 211-228.

Lancon J., Wery J., Rapidel B., Angokaye M., Gerardeaux E., Gaborel C., Ballo D., Fadegnon B., 2007. An improved methodology for integrated crop management systems. Agronomy for Sustainable Development 27, 101-110.

Munier-Jolain N.M., 2001. Effets de l'écartement entre les rangs sur la croissance et la production semencière des mauvaises herbes. In : 17ème Conférence du COLUMA - Journées Internationales sur la Lutte contre les Mauvaises Herbes. Toulouse

Munier-Jolain N.M., Chauvel B., Gasquez J., 2002. Long-term modelling of weed control strategies: analysis of threshold-based options for weed species with contrasted competitive abilities. Weed Research 42, 107-122.

Munier-Jolain N.M., Savois V., Kubiak P., Maillet-Mézeray J., Jouy L., Quéré L., 2005. DECID'Herb, a decision support system on the WEB, designed for sustainable weed management in cultivated fields. In : XIIII European Weed Research Society Symposium. Bari, Italy.

Nolot J.M., Debaeke P., 2003. Principes et outils de conception, conduite et évaluation de systèmes de culture. Cahiers Agriculture 12, 387-400.

Olsen J., Kristensen L., Weiner J., Griepentrog H.W., 2005. Increased density and spatial uniformity increase weed suppression by spring wheat. Weed Research 45, 316-321.

Reau R., Meynard J.M., Robert D., Gitton C., 1996. Des essais factoriels aux essais "conduite de culture". In : Expérimenter sur les conduites de cultures: un nouveau savoir-faire au service d'une agriculture en mutation. Paris, DERF-ACTA, p. 52-62.

Sen D.N., 1988. Key factors affecting weed-crop balance in agroecosystems. In: M.A. Altieri, M. Liebman (Eds.), Weed Management in Agroecosystems: Ecological Approaches. CRC Press, New-York, p 157-182.