

Evaluation de la faisabilité technique de systèmes de Protection Intégrée en termes de fonctionnement d'exploitation et d'organisation du travail. Comment adapter les solutions aux conditions locales ?

N. Munier-Jolain, A. Dongmo

UMR INRA-UB-AgroSup Dijon 1210 Biologie et Gestion des Adventices, 17 rue Sully, F-21065 Dijon cedex

Correspondance : munierj@dijon.inra.fr

Résumé

Une expérimentation visant à évaluer des prototypes de systèmes de Protection Intégrée contre la flore adventice est conduite depuis 2000 sur la ferme INRA de Dijon-Epoisses. Les résultats concernant les volets agronomiques et environnementaux ont été présentés lors des CIAg de Dijon en 2008. Cet article présente une méthode originale d'évaluation de la faisabilité pratique des systèmes, fondée sur la simulation de l'organisation du travail des exploitations. Des indicateurs économiques sont également présentés, montrant que si les faibles rendements peuvent être compensés par les faibles charges en culture de blé, ce n'est pas vrai pour les cultures de diversification introduites en Production Intégrée. Une méthodologie d'évaluation *a priori* des possibilités d'adaptation des systèmes de Production Intégrée au contexte pédo-climatique est présentée. Elle pourrait être utile pour renforcer l'évaluation des conséquences de l'adoption de la Production Intégrée à l'échelle du territoire national.

Mots-clés : modélisation des exploitations, évaluation multi-critères, freins à l'adoption

Abstract : Evaluating the consequences of integrated weed management on farm organisation and labour bottlenecks. How to adapt solutions to local constraints?

An experiment designed to assess IWM-based cropping systems is conducted since year 2000 at the INRA-Dijon-Epoisses farm. Results regarding the issues of weed management, crop production and environmental impacts were presented before. Here we present a method for assessing the practical feasibility of IPM-systems, based on farm modeling of labour organization. Economical indicators show that in winter crops, low yields might be compensated by low input costs, but this is not the case in spring crops introduced in IPM for diversifying crop rotations. A methodology is presented for assessing the potential for adapting IPM systems as a function of local soils and climates, which could be used to strengthen the assessment of the consequences of IPM if adopted all over the whole national territory.

Keywords: farm modelling, multi-criteria evaluation, factors hindering adoption

Introduction

La Production Intégrée (PI) correspond à un mode de production agricole, souvent présentée comme intermédiaire entre, d'une part, la production intensive à fort niveau d'intrants exogènes (engrais et produits phytosanitaires) qui constitue le système dominant actuel et, d'autre part, l'agriculture biologique qui s'interdit l'usage d'intrants de synthèse. Elle repose sur la Protection Intégrée des Cultures (PIC), un paradigme de protection des plantes qui privilégie les moyens de régulation physique et biologique des bioagresseurs des cultures, en vue de limiter le niveau des infestations ou des dégâts, réduisant donc d'autant la dépendance aux pesticides. Les pesticides sont alors employés uniquement

lorsque les autres moyens agro-écologiques ne permettent pas d'éviter les accidents risquant de pénaliser le revenu agricole. Les régulations physiques et biologiques sont gérées par des adaptations des pratiques agricoles, raisonnées aussi bien à l'échelle d'une campagne agricole sur une parcelle donnée, qu'à des échelles de temps longues, pluri-annuelles, et des échelles d'espace supra-parcellaire. La Protection Intégrée est donc une composante de la Production Intégrée, concernant directement la santé des plantes. La différence sémantique entre Production Intégrée et Protection Intégrée est du même ordre conceptuel que la différence entre Production Agricole et Protection des Cultures. Il n'y aurait donc pas de sens à classer des systèmes agricoles en Protection Intégrée vs Production Intégrée en fonction du niveau de rupture par rapport aux pratiques actuelles, comme cela a pu être proposé parfois.

La Protection Intégrée contre la flore adventice est en grandes cultures un verrou important des transitions vers des systèmes plus économes en pesticides. Dans la majorité des groupes de co-conceptions de systèmes agricoles innovants ayant travaillé au cours des années récentes, la réduction de l'usage de fongicides et de régulateurs de croissance est souvent plus convaincante que la réduction de la dépendance aux herbicides (c'est le cas par exemple pour le groupe des 8 fermes animé par AgroTransfert-Ressources et Territoires en Picardie (Reau et al., 2010)). Les agriculteurs engagés dans des démarches PI semblent donc plutôt démunis pour adapter leurs modes de gestion de la flore adventice, et cela pour deux raisons : (i) la persistance des semences d'adventices dans le sol génère des effets cumulatifs à long terme pour l'évolution démographique des populations adventices, et la perception du risque associé à un 'échec de désherbage' est très lourde car liée à la fertilité biologique à long terme des parcelles concernées ; (ii) les techniques alternatives au désherbage chimique existent, aussi bien dans le domaine de la prophylaxie que du désherbage curatif, mais elles sont souvent perçues, à juste titre, comme moins efficaces que le désherbage chimique. La PIC nécessite donc de combiner différentes techniques entre elles, imposant des modifications profondes des systèmes de culture, forcément difficiles à mettre en œuvre en pratique, d'autant qu'on a peu de références sur l'efficacité potentielle de ces combinaisons de techniques. On a en outre d'autant moins de références que les espèces adventices sont nombreuses, aux caractéristiques biologiques variées, et répondant donc potentiellement de façon très contrastée aux pratiques agricoles.

Les moyens de gestion de la flore adventice mobilisables en PIC ont été présentés en détail par Munier-Jolain et al. (2008). Ils visent soit à limiter le potentiel d'infestation dans une culture donnée de la succession, soit à limiter le potentiel compétitif relatif des adventices, à la fois pour limiter les pertes de rendement de la culture et pour limiter la multiplication de nouvelles graines qui alimentent le stock semencier, soit encore à désherber de façon non chimique les plantes qui, malgré tous les moyens préventifs, sont présentes pendant le cycle cultural. Les principaux aspects sont rappelés ici :

- La diversification des successions de culture permet notamment la diversification des périodes de semis. Une espèce adventice donnée rencontre moins fréquemment des conditions favorables à son développement, ce qui augmente le temps entre deux générations successives, temps pendant lequel le stock de semences diminue (plus ou moins rapidement en fonction des espèces et du système de culture). La diversification des cultures peut également être l'occasion d'introduire des cultures à fort pouvoir compétitif (chanvre, triticales), et/ou des prairies temporaires dont la fauche limite la multiplication semencière des adventices (Meiss et al., 2010)
- Le labour permet, lorsqu'il est utilisé, d'enfouir les semences fraîches ; lorsque sa fréquence est raisonnée en fonction de la succession culturale, cela permet de retarder de plusieurs années la remontée de semences et d'éviter leur présence dans les horizons de surface au moment du semis des cultures potentiellement infestées.
- Le passage répété d'outils superficiels pendant l'interculture, aux périodes de levée préférentielle des espèces cibles, permet un effet de 'faux-semis' qui réduit le potentiel d'infestation de la culture

suivante, à condition que les plantules germées soient complètement détruites avant le semis de la culture.

- L'adaptation des dates de semis permet selon les cas d'esquiver les levées des adventices (semis tardifs) ou d'augmenter l'aptitude à la concurrence du couvert cultivé vis-à-vis des espèces à levée plus tardives (semis précoces).
- L'aptitude à la concurrence du couvert peut également être augmentée par le choix de variétés compétitives, par des semis denses à écartements inter-rangs faibles.
- Les techniques de semis direct, sans travail du sol, souvent associées à la présence d'un mulch végétal en surface, réduisent les taux de levée des semences réparties à la surface du sol (Debaeke, 1988). La présence du mulch peut perturber la croissance précoce des plantules, voire modifier l'activité de prédateurs de semences (carabes, par exemple, voir Meiss et al., 2010), qui pourraient avoir un rôle significatif dans la régulation des populations (Westerman et al., 2003).
- Le désherbage mécanique, dans la culture en place, est le principal mode de destruction des adventices levées dans le couvert cultivé. Il peut être réalisé soit 'en plein' sur l'ensemble de la surface du champ (herse étrille, herse rotative), soit de façon localisée entre les rangs (binage, voire même sur le rang (bineuse à doigts). Le binage peut être associé avec du désherbage chimique sur le rang, réalisé soit en prélevée avec des buses de traitement positionnées sur le semoir, soit en post-levée.

Chacun de ces moyens de gestion de la flore adventice n'ayant qu'une efficacité potentielle limitée, la PI nécessite de les combiner en évitant celles qui sont incompatibles. C'est le cas notamment des stratégies de semis direct sous couverts végétaux, incompatibles avec des stratégies de faux-semis répétés qui requièrent des périodes de sol nu.

Une expérimentation 'systèmes' a été mise en place en 2000 sur le domaine expérimental INRA de Dijon-Epoisses, afin d'évaluer les performances de prototypes de systèmes de culture mettant en œuvre les principes de Protection Intégrée contre la flore adventice. Ce dispositif, également présenté lors des CIAg de Dijon en 2008, comporte 5 systèmes, dont une référence SdC1 pour lequel la lutte contre les adventices repose essentiellement sur l'usage d'herbicides, et 4 systèmes de PI : SdC2 : PI en système sans labour ; SdC3 : PI sans désherbage mécanique ; SdC4 : PI typique, incluant le travail mécanique du sol, mais caractérisé par une rotation intégrant la culture de betterave une année sur six ; SdC5 : Système sans herbicide. Chaque système est associé à un corps de règles de décision, qui est mis en œuvre sur 2 parcelles de 1,7 ha en moyenne (2 îlots de 5 parcelles, îlots 'A' et 'D', soit un dispositif total de 17 ha).

Les observations collectées entre 2001 et 2006 (soit une rotation pour les systèmes PI, deux rotations pour le système de référence) ont permis de quantifier les baisses d'usage d'herbicide permises par ces principes de PI : environ -40% dans les systèmes SdC2 et SdC3, -70 % en SdC4, et évidemment -100% en SdC5 (Munier-Jolain et al., 2008). Malgré cette faible dépendance aux herbicides, la maîtrise de la flore adventice est jugée satisfaisante, puisqu'on n'observe pas de tendance à la dégradation de l'état malherbologique des parcelles au cours du temps (Chikowo et al., 2009), ni d'augmentation du stock semencier. Des espèces souvent considérées comme très problématiques en systèmes céréaliers de la région, comme le vulpin des champs, ont presque disparu de la majorité des parcelles d'essai. En revanche, on observe une tendance au cours des années récentes à la sélection d'espèces caractérisées par des levées échelonnées et hivernales, comme le gaillet et la véronique à feuille de lierre, qui pourraient être favorisées par les semis tardifs des céréales.

Sur le plan énergétique, malgré la consommation en fioul liée aux passages d'outils répétés pour les 'faux-semis' ou pour le désherbage mécanique, la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effets de serre, exprimées par hectare cultivé et quantifiées par Analyse de Cycle de Vie (ACV, Gaillard et al., 2007) ont été plus faibles en PI. Ce résultat est lié à la plus faible consommation d'engrais

azotés, permise par (i) l'introduction de légumineuses dans les rotations diversifiées, et (ii) les objectifs de rendement inférieurs au potentiel pour les céréales d'hiver.

L'évaluation de la faisabilité technique et de l'acceptabilité des systèmes testés en station expérimentale est souvent négligée, limitée à quelques indicateurs comme le temps de travail par hectare, le nombre d'interventions, ou la marge brute. Ces indicateurs sont insuffisants, car la répartition dans l'année du temps de travail est un élément qui détermine les risques de compétition entre chantiers, et qui doit être évaluée au regard du nombre de jours disponibles pour la réalisation des interventions, sous la dépendance des conditions climatiques et du type de sol. Par ailleurs, les charges de mécanisation doivent être prises en compte pour l'évaluation de la rentabilité économique, et elles dépendent largement de la structure d'exploitation, du parc matériel disponible et nécessaire, et de son niveau d'utilisation annuelle. Or, de nombreux aspects de la PI sont de nature à impacter l'organisation du travail à l'échelle de l'exploitation agricole et sa rentabilité économique. Les travaux du sol répétés pour les faux-semis et le désherbage mécanique sont consommateurs de temps, et le désherbage mécanique nécessite des conditions d'humidité du sol qui peuvent être rares à certaines saisons. Ces facteurs défavorables peuvent être compensés par le plus faible nombre de passages de pulvérisateurs, et par une meilleure répartition des travaux dans l'année grâce à la diversification des cultures et des périodes de semis et de récolte. Du point de vue économique, les charges de produits phytosanitaires sont réduites, mais cela peut être compensé par un parc de matériel nécessairement plus important, et par des rendements en tendance plus faibles que dans un système intensif simplifié.

L'objectif de cet article est (i) de présenter la méthode d'évaluation de la faisabilité technique et de la rentabilité économique des systèmes testés sur le dispositif PI de Dijon-Epoisses, (ii) de proposer une démarche pour adapter et optimiser des systèmes de PI en fonction des conditions locales, définies par le climat, le type de sol, et la structure d'exploitation. Comme l'expérimentation est menée à l'échelle de la parcelle agricole, et que l'équipement et les ressources humaines d'une ferme expérimentale de l'INRA ne sont pas représentatifs de la réalité agricole, l'évaluation des systèmes sur ces aspects ne peut reposer directement sur des observations des temps de travaux réels. La démarche proposée repose donc sur l'utilisation d'un modèle de simulation du fonctionnement de fermes virtuelles supposées mettre en œuvre les systèmes de culture effectivement testés sur l'expérimentation.

Simulation du fonctionnement d'exploitations agricoles virtuelles en Production Intégrée

10 fermes virtuelles ont été créées, correspondant chacune à l'une des parcelles expérimentales. Comme la rotation des systèmes testés est de 3 ou 6 ans, l'assolement de chaque ferme virtuelle était composé de 6 parcelles portant chacune une des cultures récoltées au cours des campagnes 2001-2006 sur la parcelle d'essai correspondante. Chaque parcelle de l'assolement virtuel faisait 20 ha, pour un total de 133 ha de SAU (13 ha de jachère pour respecter la réglementation en vigueur au moment de la réalisation des simulations). Le modèle utilisé ne tient pas compte de la structure du parcellaire ni de la répartition spatiale des cultures, qui peuvent affecter le fonctionnement des exploitations de façon non négligeable. La main d'œuvre disponible était de un seul travailleur, soit un rapport UTH/ha de SAU proche de la moyenne des exploitations céréalières en Bourgogne. Les simulations ont été réalisées avec le simulateur Equip'Agro (fourni et paramétré par la Chambre Régionale d'Agriculture de Bourgogne), qui permet de simuler la répartition du temps de travail sur l'année et de comparer avec le temps disponible à chaque décade. Le temps disponible est déterminé par le temps maximum consacré par l'agriculteur aux travaux des champs (qui peut varier en fonction des périodes de l'année), par les travaux à réaliser à cette période et par les conditions climatiques en année médiane ou en année climatiquement défavorable. Considérant qu'un système pourrait être jugé acceptable si tous les travaux pouvaient être réalisés dans de bonnes conditions au moins 8 années sur 10, c'est la disponibilité en temps à chaque décade la 2^{ème} plus mauvaise année sur 10 qui a été retenue comme

disponibilité de référence. Cette information est disponible dans un référentiel des 'Jours Agronomiquement Disponibles' paramétré pour différentes stations climatiques et type de sol, et validé par la Chambre Régionale d'Agriculture de Bourgogne.

Dans un premier temps, le parc matériel de chaque exploitation virtuelle a été défini, correspondant aux matériels utilisés réellement pour conduire les parcelles d'essai, mais adaptés en nombre et en taille pour correspondre au niveau d'équipement réaliste des exploitations de Bourgogne. Le coût d'achat et le débit de chantier de chaque matériel ont été définis selon des informations disponibles dans des guides techniques. Dans un deuxième temps, pour chaque exploitation virtuelle, les itinéraires techniques réellement appliqués au cours des campagnes 2001-2006 sur les parcelles d'essai ont été utilisés pour déterminer les chantiers à réaliser sur les différentes parcelles de la sole à chaque décade de l'année, et le temps de travail cumulé par décade a été comparé au temps disponible. Le nombre d'heures de travail dépassant la disponibilité de référence, cumulées sur l'ensemble de l'année, a été utilisé comme indicateur de la faisabilité technique du système, en terme d'organisation du travail à l'échelle de l'exploitation.

Par ailleurs, le nombre d'hectares travaillé annuellement par chaque équipement a permis d'estimer le coût de mécanisation de chaque intervention, intégrant le coût d'amortissement et la consommation de fioul. Le prix des intrants et des produits agricoles utilisés pour le calcul des marges nettes correspond au marché en fin de campagne 2006. Le calcul de marge nette intègre les aides publiques, mais aussi la location des terres, l'amortissement des bâtiments, les frais de mutuelle, permettant de s'approcher du revenu agricole final.

Tableau 1: Distribution des périodes de tension en termes d'organisation du travail pour les 10 fermes virtuelles simulées. SdCx-A et SdCx-D sont les fermes correspondant au système de culture SdCx de l'expérimentation sur les îlots A et D, respectivement (d'après Pardo et al., 2010).

Ferme virtuelle	Temps de travail annuel	Nombre d'heures dépassant la disponibilité	Périodes à problème (nombre d'heures dépassant la disponibilité à la décade concernée)	Opérations agricoles concernées	
SdC1	SdC1-A	647	32	Oct-1 (31)	Semis des céréales
	SdC1-D	711	27	Oct-1 (5) Oct-2 (20)	Semis des céréales
SdC2	SdC2-A	415	0	-	-
	SdC2-D	397	4	-	-
SdC3	SdC3-A	563	45	Nov-1 (30) Nov-2 (9)	Travail du sol superficiel Semis des céréales
	SdC3-D	510	4	-	-
SdC4	SdC4-A	650	47	Déc-1 (17)	Labour d'hiver
				Déc-2 (12)	Travail du sol superficiel
	SdC4-D	709	61	Oct-3 (22) Nov-1 (32)	Travail du sol superficiel Semis des céréales
SdC5	SdC5-A	612	8	Déc-1 (5)	Travail du sol superficiel
	SdC5-D	591	2	-	-

Répartition annuelle des temps de travaux en Production Intégrée

De façon *a priori* surprenante, la PI n'est pas associée à une augmentation du temps de travail annuel par hectare (Tab. 1). Si tous les systèmes de PI ont été caractérisés par une augmentation du temps consacré au travail du sol superficiel, ceci est partout compensé par les gains de temps sur le labour et sur les traitements phytosanitaires, à la fois traitements herbicides et autres. La seule exception est le temps consacré au désherbage dans le système SdC4, en raison du très faible débit de chantier du désherbage de post-levée localisé sur le rang, notamment sur culture de betterave. De façon logique, le

système SdC2 est le moins gourmand en temps, grâce à l'absence de labour et au débit de chantier plus important des semis avec un semoir de semis direct à disques.

Les éventuelles tensions en terme d'organisation du travail sont déterminées en partie par le nombre d'heures de travail cumulées par décade, mais surtout par la disponibilité nette qui varie de façon très importante au cours de l'année, quasi nulle en hiver, augmentant de façon importante à partir du mois d'avril pour diminuer dès le mois de septembre, avec une chute drastique à partir de fin octobre (Fig. 1). Ces tensions sont importantes pour le système de référence SdC1, principalement concentrées au début du mois d'octobre pour les semis des céréales (plus de 30 heures de travail en conditions délicates 2 années sur 10). Cette tension est liée à la forte sole de céréales d'hiver (blé et orge d'hiver représentent les 2/3 de la sole) qu'il faut semer à la même période. Ce résultat explique pourquoi les agriculteurs céréaliers de la région sont très prompts à commencer les semis de céréales dès la fin septembre dans cette région, bien que des semis aussi précoces ne puissent être associés à aucun avantage agronomique.

Pour les systèmes de PI, l'indicateur de tension d'organisation du travail est très variable. Il est très faible en système SdC2, pour lequel le faible nombre d'heures travaillées et leur meilleure répartition dans l'année contribue à éliminer tout problème, et de façon plus inattendue en système SdC5, qui bénéficie essentiellement d'une bonne répartition des travaux permise par la diversification des cultures. En revanche, les problèmes sont en moyenne plus importants en systèmes SdC3 et SdC4, avec environ 50 heures de travail en conditions délicates 2 années sur 10. Les tensions concernent essentiellement le travail du sol de préparation du semis des céréales et le semis des céréales lui-même, fin octobre et début novembre. Elles sont directement liées à la règle de retard de date de semis après le 25 octobre permettant d'esquiver la levée des adventices d'automne, mais repoussant les travaux à une période où le nombre de jours disponibles diminue très rapidement, ce que la plus faible surface en céréales n'arrive pas à compenser (seulement la moitié de la sole en céréale d'hiver, en raison de la diversification des cultures).

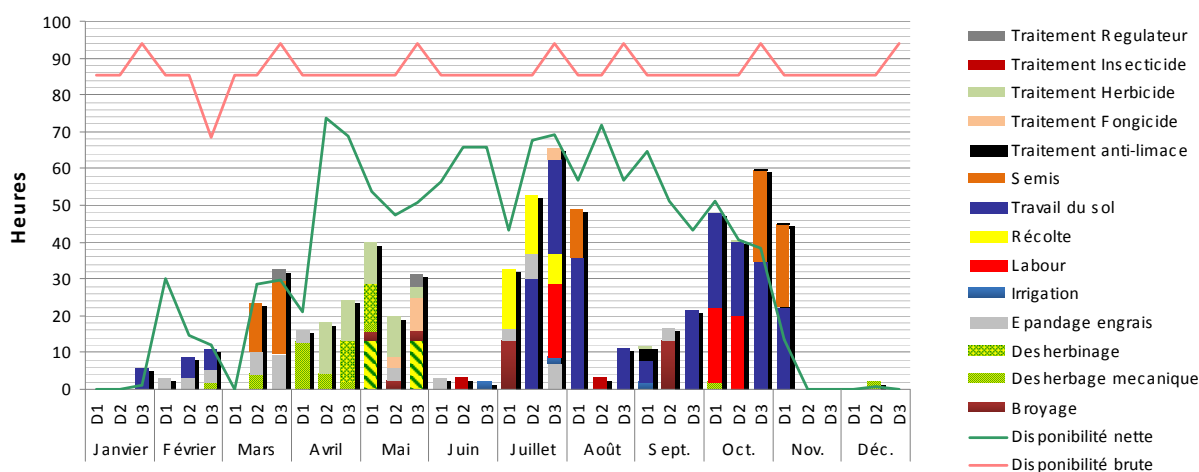


Figure 1 : Comparaison de la répartition du travail sur une ferme virtuelle en PI typique (système SdC4-D) avec la disponibilité nette déterminée par les conditions climatiques

En revanche, dans aucune des 8 fermes virtuelles en PI, on n'observe de tension en termes d'organisation du travail entre les mois de février et le début octobre. En particulier, le temps consacré aux travaux du sol superficiels répétés pour les opérations de faux-semis s'étale de mi-juillet à début octobre, à des périodes où la disponibilité nette est excédentaire. De la même façon, les opérations de désherbage mécanique, réputées gourmandes en temps, sont concentrées entre mi-mars et fin mai, à des périodes calmes du point de vue de la compétition entre chantiers. Les seuls désherbages

mécaniques d'automne concernent les colzas, et peuvent être réalisés début octobre à une période climatique généralement favorable en Bourgogne. Pour les céréales (comme pour les légumineuses d'hiver), le semis tardif à partir de fin octobre a également pour effet de reporter au printemps les interventions de désherbage mécanique, à une période où le nombre de jours disponibles augmente de façon importante. En outre, l'association de semis tardifs d'automne avec du désherbage mécanique au printemps produit en général des situations très favorables à la bonne efficacité du désherbage mécanique : en effet, le semis tardif génère un décalage de stade entre la culture et les adventices, qui ne commencent alors à lever qu'en sortie d'hiver. Aux périodes printanières sèches favorables au désherbage mécanique, on obtient donc des adventices très sensibles car peu développées, et une culture bien implantée pouvant supporter sans dommage des réglages agressifs des outils.

Cette analyse de la faisabilité pratique des systèmes de PI démontre que leur mise en œuvre n'est pas nécessairement aisée sur le terrain. Pour l'expérimentation de Dijon-Epoisses, ce résultat a été pris en compte pour modifier les règles de décision, en acceptant des semis précoces, début octobre, pour la culture de triticales. Cette culture est très compétitive, et il est alors raisonnable de remplacer une stratégie d'esquive par une stratégie d'étouffement. Cette culture correspond à 1/6^{ème} de la sole, le blé (1/3 de la sole) restant avec des semis tardifs. Cette décision a pour vertu de diversifier encore la gamme des périodes de semis à l'échelle de la rotation, ce qui devrait limiter la sélection d'espèces adventices à levée hivernale. Par ailleurs, des problèmes organisationnels au moment des semis peuvent également se résoudre par la mécanisation, car il existe aujourd'hui des semoirs au débit de chantier bien supérieurs à ceux qui ont été utilisés dans les simulations réalisées dans notre travail.

Rentabilité économique

Les économies permises par la PIC sur le poste 'Produits phytosanitaire' sont très importantes, variant de 120 à 170 €.ha⁻¹ (moyenne 150 €.ha⁻¹). Elles concernent évidemment les herbicides (Fig. 2A), mais également les fongicides, les insecticides, les molluscicides et les régulateurs de croissance. Ces derniers ne sont plus appliqués qu'exceptionnellement, sur orge, pour éviter la casse du col de l'épi. La baisse des fongicides est essentiellement liée au choix de variétés résistantes en céréales et aux semis tardifs, dont la combinaison a permis une baisse de -75% à -100% d'IFT-fongicides en blé-triticales selon les années. La baisse des insecticides et des molluscicides est principalement liée à la moindre surface implantée en colza, culture soumise à des pressions d'insectes ravageurs et de limaces plus importante que la moyenne.

En revanche, les charges de mécanisation tendent à augmenter légèrement dans les systèmes de PI (de l'ordre de 20 à 30 €.ha⁻¹), en lien avec le parc matériel plus important (Fig. 2B). Les simulations présentées n'intègrent pas la possibilité de réduire les charges de mécanisation par le partage de matériel en CUMA, organisation collective qui en outre est de nature à favoriser l'adoption d'innovations techniques.

Le poste 'semences' augmente aussi de façon significative, en raison des densités souvent plus élevées en PI, pour maximiser l'aptitude à la concurrence du couvert vis-à-vis des adventices, et également parce que certaines cultures de diversification sont des cultures à grosses semences relativement coûteuses (féverole, tournesol, par exemple). Au total, le niveau des charges reste en moyenne inférieur de l'ordre de 70 €.ha⁻¹ par rapport au système de référence, sauf dans le système SdC4 où les charges de mécanisation, d'irrigation et de récolte spécifique à la culture de betterave (culture présente uniquement sur les fermes de ce système) augmentent les charges de façon importante.

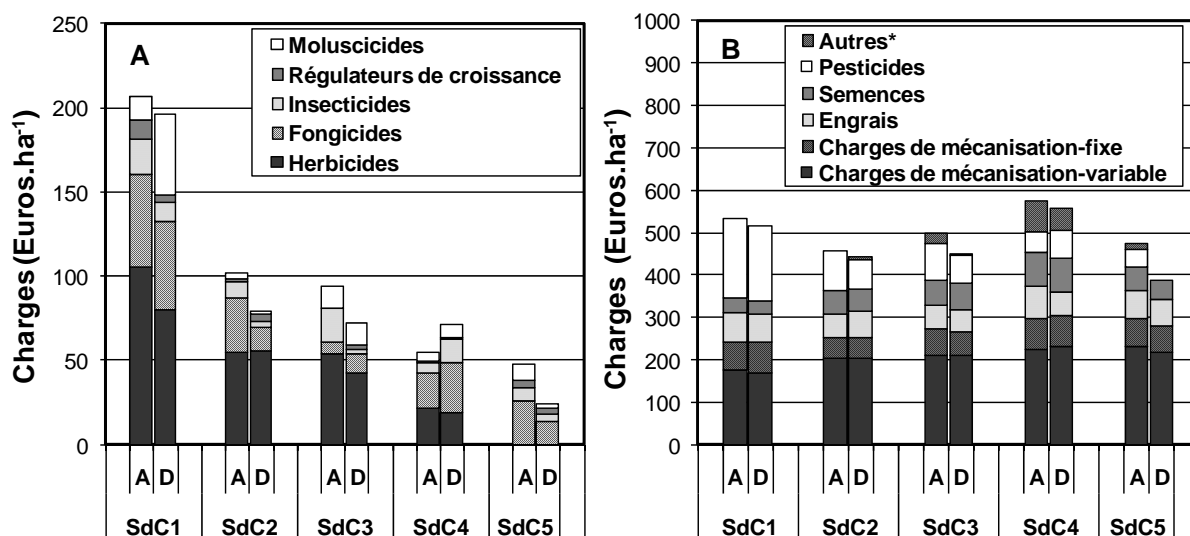


Figure 2 : Niveau de charges des 10 fermes virtuelles. (A) pesticides ; (B) ensemble des intrants. La catégorie 'autres*' désigne les coûts d'irrigation, et pour le système SdC 4, le coût de la récolte de la betterave supposée réalisée par un entrepreneur extérieur.

La rentabilité économique dépend beaucoup du rendement des cultures et du prix des produits agricoles. Le produit brut, estimé avec les rendements réels obtenus sur l'expérimentation, pour les prix du marché 2006, est toujours plus faible en PI par rapport au système de référence. Les rendements en blé ont été en moyenne plus faibles de 18%, en raison des choix variétaux ne privilégiant pas la productivité mais la tolérance aux maladies et la compétitivité du couvert, mais également en raison du retard de date de semis permettant d'esquiver les levées d'adventices d'automne. Pour d'autres cultures, comme le colza et l'orge d'hiver, les rendements ont été équivalents en système de PI. Mais à l'échelle du système, le produit brut est surtout affecté par le rendement faible et variable des cultures de diversification, semées au printemps (orge de printemps, soja, tournesol, moutarde). Lorsque l'on considère le bilan économique à l'échelle de la seule culture de blé, les économies de charges compensent les baisses de rendement, et la rentabilité économique est équivalente en PI et en système de référence. En revanche, à l'échelle plus pertinente de l'ensemble du système de culture, le faible produit brut des cultures de diversification n'est pas compensé par la baisse des charges, et la marge nette est au final réduite de l'ordre de 100 €.ha⁻¹ en moyenne.

Tableau 2: Produit brut et marge nette des 10 fermes virtuelles. SdCx-A et SdCx-D sont les fermes correspondant au système de culture SdCx de l'expérimentation sur les îlots A et D, respectivement (d'après Pardo et al., 2010).

Ferme virtuelle	Produit brut (€ ha ⁻¹)		Marge nette (€ ha ⁻¹)	
	Valeur Récolte	DPU		
SdC1	A / D	921 / 816	330 / 330	397 / 327
SdC2	A / D	777 / 655	330 / 330	345 / 263
SdC3	A / D	598 / 585	330 / 330	178 / 208
SdC4	A / D	850 / 866	355 / 355	331 / 357
SdC4*	A / D	592 / 635	330 / 330	233 / 222
SdC5	A / D	820 / 631	330 / 330	364 / 273

* SdC4* : système pour un assolement sans betterave

Ces résultats économiques ne doivent en aucun cas être utilisés pour remettre en cause le principe de diversification des assolements, qui contribue de façon considérable à la gestion de la flore adventice (comme d'autres bioagresseurs), et donc a permis de réduire le niveau d'usage de pesticides et d'herbicides en particulier. Ils ne doivent pas non plus être utilisés comme argument pour disqualifier la PI et remettre en cause les objectifs de réduction de la dépendance aux pesticides, et cela pour plusieurs raisons :

- Il serait probablement hâtif de tirer des conclusions définitives sur la base des résultats de 10 parcelles d'essai sur 6 années ; la contre-performance du système SdC3 sur l'îlot A, par exemple, est très liée au très faible rendement d'une culture de moutarde de printemps (6 Qx.ha⁻¹ en 2003) ayant subi une forte attaque de méligèthes à la floraison. Le même système expérimenté dans une autre région à moindre pression 'méligèthe' (probablement avec une sole régionale de colza plus faible), ou avec une autre culture de printemps, aurait donné des résultats économiques plus satisfaisants. D'autres résultats d'essais de système à faible usage de pesticides sont nécessaires pour confirmer la robustesse des résultats présentés ici.
- Le différentiel de rentabilité économique observé pour les exploitations simulées, en moyenne de 100 €.ha⁻¹ pour un contexte de prix 2006, est de l'ordre de grandeur des niveaux de soutien assuré par les Mesures Agri-Environnementales (MAE) 'faible usage de pesticides et d'herbicides' pour les zones sensibles. La PI resterait donc rentable dans ce contexte de soutien public des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement.
- Les prototypes de systèmes de culture testés sur le dispositif expérimental de Dijon-Epoisses ont été raisonnés pour optimiser la gestion de la flore adventice, sans prendre en considération *a priori* les performances économiques des rotations mises en place. La prise en compte de critères économiques dans la définition des rotations devrait permettre de limiter le niveau de la contre-performance économique, tout en respectant les principes de PI, y compris le principe de diversification des périodes de semis.
- La contre-performance économique des cultures de diversification peut au moins en partie s'expliquer par une relative mauvaise maîtrise technique de ces cultures, caractérisées par exemple par une offre variétale limitée et un effort d'amélioration variétale limité au cours des décennies passées. Des gains de rendement de ces cultures pourraient donc être attendus si ces cultures devenaient moins marginales, et soutenues par un accompagnement de recherche-développement de l'ensemble de la profession.

Adaptation des principes de Protection Intégrée aux conditions locales : proposition d'une méthodologie pour une analyse a priori

Les résultats expérimentaux tels que ceux présentés dans cet article sont indispensables pour mettre en évidence la performance technique de prototypes de systèmes de culture, et pour évaluer leur performance socio-économique. Pour autant, l'évaluation *a priori* des conséquences des changements de pratiques à l'échelle du territoire national nécessite d'évaluer comment les principes de PI peuvent s'adapter à la diversité des conditions locales, définies par les types de sols, les climats et les structures d'exploitations. Les mêmes principes de diversification ne vont pas générer les mêmes choix de rotation et d'assolement dans des régions différentes. Les conséquences du passage à la PI sont probablement très différentes entre les milieux, parce que les rotations et assolements actuels sont différents, parce que les rendements sont différents, et parce que les rotations et assolements choisis en PI peuvent être différents. La méthode d'analyse *a priori* qui est proposée a donc pour objectifs :

- (i) d'évaluer quels sont les contextes agricoles les plus favorables au passage à la PI, soit parce que le différentiel de rentabilité entre les systèmes actuels et les systèmes PI est favorable, soit parce que les systèmes PI génèrent un revenu agricole qui reste élevé par rapport à la moyenne

nationale, soit encore parce que les contraintes climatiques et les structures d'exploitations sont compatibles avec une mise en œuvre dans de bonnes conditions,

- (ii) d'évaluer, pour un contexte donné, les possibilités d'optimisation des assolements, dans le cadre des principes rotationnel de la PI, pour réconcilier PI et rentabilité économique.

La démarche proposée pour atteindre cet objectif consiste à suivre les étapes suivantes :

- lister les principes de PI, éventuellement les hiérarchiser ;
- identifier des exploitations agricoles contrastées, éventuellement en s'appuyant sur des réseaux ou des bases de données existants (par exemple le réseau ROSACE des Chambres d'Agricultures), caractériser leurs parcs matériels, leurs assolements, les itinéraires techniques précis, les contraintes agronomiques déterminant les pratiques actuelles. Cette étape peut nécessiter des enquêtes chez les exploitants, si les informations ne sont pas disponibles ou accessibles ;
- simuler le fonctionnement actuel des exploitations avec un simulateur d'organisation du travail comme Equip'Agro (ou d'un système équivalent, comme le logiciel SIMEQ d'ARVALIS), pour identifier d'éventuelles périodes de tension organisationnelle, estimer les charges de mécanisation et calculer des indicateurs économiques comme la marge nette à l'échelle de l'exploitation ;
- collecter, pour chaque milieu, toutes les données technico-économiques disponibles pour la gamme de cultures de diversification candidates dans la région, sans se limiter aux cultures majeures de la région, et sans se préoccuper, à cette étape de l'analyse, de l'existence ou non de marchés et de systèmes de collecte organisée dans la région. Les données à collecter sont au minimum les rendements moyens, les prix de vente attendus, les niveaux de charges opérationnelles et de mécanisation, et cela pour des itinéraires techniques respectant les principes de PI, en termes de travail du sol, de date de semis, de variété, de densité, de désherbage mécanique... Il est probable que, pour un milieu donné, toute l'information requise n'est pas accessible à l'heure actuelle, et cette étape nécessite donc de recourir à une certaine dose d'expertise pour s'approcher au plus près des réalités agricoles de la région considérée ;
- optimiser les rotations et assolements pour chaque exploitation, avec un outil d'optimisation approprié capable d'intégrer les règles d'assolement et de rotation propre à la PI (diversification des périodes de semis, fréquence de culture de légumineuse...)
- simuler à nouveau le fonctionnement des exploitations agricoles, cette fois dans la configuration PI (rotation, assolements et itinéraires techniques), pour évaluer les conséquences à la fois en terme de faisabilité technique et de performance économique, et comparer les indicateurs au système actuel ;
- présenter les résultats aux agriculteurs des exploitations simulées, pour recueillir leurs réactions, éventuellement identifier des contraintes non prises en compte dans l'analyse, qui peut justifier la simulation d'un nouveau scénario plus réaliste par rapport aux contraintes locales.

Cette démarche est actuellement mise en œuvre dans le cadre d'un projet 'post-doctoral' à Dijon. Le travail comporte évidemment une dimension méthodologique forte. L'ambition à terme, après validation de la méthode, serait de la mettre en œuvre à grande échelle en s'appuyant notamment sur les données et l'expertise organisée dans le réseau RMT 'Systèmes de culture innovants'. Elle permettrait à la fois d'aider à la définition des prototypes de systèmes qui sont testés dans ce réseau, et de produire des résultats pouvant renforcer les conclusions de l'expertise collective ECOPHYTO R&D terminée en 2009.

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 co-encadrés par André Leseigneur (AgroSup-Dijon) et soutenus financièrement par la Région Bourgogne, le projet ANR GEDUPIC et le réseau européen ENDURE.*

Références bibliographiques

- Debaeke P., 1988. Dynamique de quelques dicotylédones adventices en culture de céréale. I. Relation flore levée - stock semencier. *Weed Research* 28, 251-263.
- 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.
- Meiss H., Médiéenne S., Waldhardt R., Caneill J., Reboud X., Munier-Jolain N.M., 2010. Perennial alfalfas affect weed community trajectories in grain crop rotations. *Weed Research*, sous presse.
- Meiss H., Le Lagadec L., Munier-Jolain N.M., Waldhardt R., Petit S., 2010. Weed seed predation increases with vegetation cover in perennial forage crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, sous presse.
- Munier-Jolain N.M., Deytieux V., Guillemin J.P., Granger S., Gaba S., 2008. 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* 3, 75-88.
- Pardo G., Rivavololona 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? *European Journal of Agronomy*, sous presse.
- Reau R., Mischler P., Petit M.S., 2010. Evaluation au champ des performances de systèmes innovants en cultures arables et apprentissage de la protection intégrée en fermes pilotes. *Innovations Agronomiques* 8, 83-103
- Westerman P.R., Wes J.S., Kropff M.J., Van der Werf W., 2003. Annual losses of weed seeds due to predation in organic cereal fields. *J. Appl. Ecol.* 40, 824-836.