

Évaluation des systèmes de culture économes en herbicides : faisabilité technique et rentabilité économique au niveau de l'exploitation agricole

Aimé Landry Dongmo
Nicolas Munier-Jolain

Inra
UMR 1210 Biologie et gestion
des adventices
17, rue Sully
BP 86510
21065 Dijon cedex
France
<dongmonal@yahoo.fr>
<munierj@dijon.inra.fr>

Résumé

La diversification des assolements et des rotations est une composante importante de la protection intégrée des cultures (PIC) qui peut apparaître comme difficile à appliquer par les exploitations agricoles pour des raisons économiques et organisationnelles. Cet article a pour but d'effectuer une analyse *a priori* de la faisabilité technique et de la rentabilité économique d'un système PIC au niveau d'une exploitation agricole avec un assolement à la fois conforme aux contraintes de la PIC et optimisé sur le plan économique. Les outils *Atouprix* et *Simeq* développés par Arvalis, sont utilisés pour optimiser l'assolement sous contrainte PIC, et simuler l'organisation du travail à l'échelle de l'exploitation en tenant compte de la variabilité interannuelle du climat. L'étude de cas présentée correspond à une exploitation agricole « grandes cultures » de Bourgogne. L'évaluation économique avec divers scénarios de prix montre que la rentabilité des systèmes PIC optimisés peut atteindre celle du système actuel. Les pertes de rendement observées sont compensées par les faibles charges en intrants et en mécanisation. Toutefois, en année climatique difficile (1 année sur 5), le producteur devra mobiliser des stratégies permettant de faciliter l'organisation du travail (réserve de main-d'œuvre, adaptation des outils, plus grande flexibilité du temps de travail) ou adapter les itinéraires techniques pour résoudre les contraintes liées au faible nombre de jours disponibles. La méthodologie proposée pourra être appliquée sur une gamme de situations contrastées en termes de sols, de climats, de structures d'exploitations, pour identifier les régions agricoles et les situations qui seraient les plus favorables à l'adoption de systèmes PIC.

Mots clés : diversification ; exploitation agricole ; modélisation ; protection intégrée ; rotation culturale.

Thèmes : économie et développement rural ; productions végétales.

Abstract

Assessment of cropping systems with low herbicide inputs: Technical feasibility and economic profitability at the farm level

The diversification of crop rotations is a key component of integrated weed management (IWM), but this measure can be difficult to apply for economic reasons. This paper presents an *ex ante* assessment at the farm level of both technical feasibility and profitability of an IWM-based farming system with economically optimized crop rotation established in accordance with IWM requirements. A farm model was used to simulate labour organization at the farm level, taking into account the between-year variability of climatic conditions. The case study presented is based on a real farm growing grain crops in Burgundy, eastern France. The economic profitability of the optimized IWM-based system, estimated with various price contexts, can reach that of the current simplified system. Low yields are compensated for by reduced input costs. However, during years with unfavourable climatic conditions (1 out of 5 years), the farmer would have either to find solutions to increase working capacities and avoid labour bottlenecks (temporary additional workers, improvement of the working capacity of tools, increase in working

Pour citer cet article : Dongmo AL, Munier-Jolain N, 2011. Évaluation des systèmes de culture économes en herbicides : faisabilité technique et rentabilité économique au niveau de l'exploitation agricole. *Cah Agric* 20 : 468-79. doi : 10.1684/agr.2011.0528

Tirés à part : N. Munier-Jolain

flexibility), or to adapt crop management for overcoming the lack of working days availability at specific periods. The method used in this study could be applied for a range of contrastive situations, soils, climates and farm structures, in order to identify those situations most favourable to a shift toward integrated pest and weed management in arable lands.

Key words: crop rotation; diversification; farms; integrated protection; modelling.

Subjects: economy and rural development; vegetal productions.

L'agriculture mondiale mène aujourd'hui un combat sur deux fronts. Elle doit répondre aux enjeux alimentaires mondiaux tout en conservant les ressources naturelles dans un état satisfaisant pour les générations futures. En Europe, les objectifs de réduction des pollutions diffuses, de restauration de la biodiversité et d'amélioration de la qualité sanitaire des produits de consommation fixés par les politiques agricoles (réformes de la politique agricole commune, plan ministériel français *ECOPHYTO 2018*), obligent à repenser les pratiques agricoles pour rendre la protection des plantes moins dépendante des pesticides (Munier-Jolain *et al.*, 2008). Tous les pesticides sont concernés, mais il y a un enjeu particulier pour les herbicides. D'une part ce sont les pesticides qui sont le plus retrouvés dans les eaux superficielles et profondes (Croll, 1991 ; Holman *et al.*, 2000 ; Haarstad et Ludvigsen, 2007). D'autre part, les agriculteurs européens considèrent la gestion des adventices comme le verrou majeur de la protection intégrée des cultures (PIC) (Mischler *et al.*, 2009). Ils craignent à juste titre que toute baisse d'usage d'herbicides ne se traduise par une augmentation des niveaux d'infestation à moyen terme, du fait de la persistance des semences adventices dans le sol et des effets cumulatifs d'une année à l'autre.

En France, une expérimentation a été mise en place en 2000 sur le domaine expérimental Inra de Dijon-Époisses. Elle portait sur la conception/évaluation de 4 prototypes de systèmes de culture à faible usage d'herbicides, conçus selon les principes de la PIC. Les résultats sur une rotation de 6 ans ont montré que la PIC permet une diminution d'usage d'herbicides de l'ordre de 70 % par rapport au système conventionnel lorsque l'ensemble des moyens alternatifs disponibles sont

combinés entre eux (Munier-Jolain *et al.*, 2008). Le suivi de l'évolution à moyen terme de la flore et des stocks semenciers montre que les stratégies PIC permettent bien de maîtriser l'enherbement (Kurstjens et Kropff, 2001 ; Chikowo *et al.*, 2009). Une analyse de cycles de vie (ACV, Gaillard *et al.*, 2007) a montré que les systèmes PIC sont plus économes en énergie et limitent les émissions de gaz à effet de serre par hectare lorsque la diversification des rotations est mise à profit pour introduire des légumineuses ne nécessitant pas d'apport d'engrais azotés (Munier-Jolain *et al.*, 2008).

La faisabilité technique de la lutte repose sur la capacité de l'agriculteur à réaliser les opérations techniques (faux semis pour réduire le stock de graines d'adventices dans le sol, sarclage, binage, etc.) qui se substituent partiellement ou totalement aux traitements chimiques habituels et contribuent à la maîtrise de la flore adventice dans un système complètement reconçu. Selon les résultats de l'essai de Dijon-Époisses (Munier-Jolain *et al.*, 2008 ; Pardo *et al.*, 2010), la diversification de la rotation, élément incontournable de la PIC contre la flore adventice, pourrait être la clef de la rentabilité économique des systèmes PIC, car elle risque de se traduire par l'introduction de cultures a priori moins bien maîtrisées techniquement et moins rentables que celles des assolements simplifiés actuels. Les performances techniques et économiques de la PIC dépendent à la fois du milieu pédoclimatique, du rendement potentiel des cultures de diversification candidates dans ce milieu, des itinéraires techniques envisagés, de la structure d'exploitation et du contexte économique.

Le travail présenté dans cet article poursuit l'évaluation économique préalable des prototypes de systèmes PIC

testés à Dijon-Époisses. L'hypothèse de recherche est qu'il existe des possibilités d'amélioration des performances économiques des systèmes PIC en optimisant les rotations tout en respectant les principes agronomiques contribuant à la maîtrise des adventices. L'article porte particulièrement sur les résultats économiques de tels systèmes optimisés, et sur la faisabilité en termes d'organisation du travail à l'échelle de l'exploitation. Les résultats présentés correspondent à une exploitation agricole particulière de la plaine de Dijon (Bourgogne, France), mais le travail réalisé comporte une forte dimension méthodologique qui va au-delà de cette exploitation.

Matériel et méthode

Une exploitation agricole modèle

L'étude s'appuie sur une exploitation « grandes cultures » de la plaine de Dijon, assez représentative des systèmes de culture pratiqués actuellement en région Bourgogne. L'agriculteur exploite 142 hectares, avec un système de type « conventionnel » fondé sur la rotation colza-blé-orge dans un contexte pédoclimatique à fort potentiel agricole pour les cultures d'hiver, de printemps et d'été. La main-d'œuvre disponible est limitée à une personne à temps plein (l'agriculteur). Comme dans la majorité des exploitations de la région, la protection des plantes est assurée essentiellement par l'application de pesticides ; en particulier, le contrôle des adventices repose principalement sur les herbicides. L'une des particularités de cette exploitation est le niveau faible de l'indice de fréquence de traitement (IFT) moyen sur l'ensemble des pesticides (4,2, alors que l'IFT de référence régional est de

5,9). L'exploitation est engagée depuis peu dans une stratégie de réduction marquée des doses de pesticides sans modification profonde du système de culture. Bien que présentant à moyen terme un risque de surinfestation des parcelles ainsi traitées suite aux résistances ou à l'accumulation du stock de semences dans le sol (Neve et Powles, 2005), ces pratiques permettent néanmoins à court terme d'améliorer le revenu de l'exploitation par une réduction des charges de traitement pesticides conjuguée avec un niveau de production stable.

Des hypothèses de travail

La méthode d'étude s'appuie sur trois hypothèses de travail :

- **H1.** L'agriculteur est « neutre au risque » et raisonne donc ses pratiques sur la base des performances moyennes des cultures, sans tenir compte des variations interannuelles ;
- **H2.** L'agriculteur applique la même rotation sur toute son exploitation, et cultive toutes les cultures de cette rotation chaque année, si bien que l'assolement une année donnée est la projection de la rotation ;
- **H3.** Le contexte économique est stable au cours du temps. L'optimisation de la rotation en fonction de ce contexte génère donc un assolement constant. L'étude intègre différents scénarios de prix, mais ces scénarios ne correspondent pas à des séquences temporelles d'évolution des prix.

Une démarche d'évaluation *a priori*

La démarche proposée pour l'évaluation *a priori* de la PIC se déroule en six étapes :

- reconstitution précise des itinéraires techniques actuels (*ITK actuels*) ;
- définition de nouveaux itinéraires techniques relevant de la protection intégrée (*ITK PIC*) ;
- définition de la rotation (et donc de l'assolement) économiquement optimal sous contraintes *PIC*, combinant les *ITK PIC* définis précédemment avec les règles rotationnelles *PIC*, décrites ci-dessous. Cette optimisation est réalisée sous différents scénarios de prix ;
- pour chaque scénario de prix, estimation et comparaison de la ren-

tabilité économique du système actuel et du système *PIC* optimisé ;

- évaluation de la faisabilité technique, en termes d'organisation du travail, par simulation du fonctionnement de l'exploitation dans son système actuel et dans les différents systèmes *PIC* correspondant aux différents scénarios de prix ;
- évaluation du niveau d'utilisation d'herbicides pour les différents systèmes.

Reconstitution/construction des itinéraires techniques

La reconstitution des itinéraires techniques actuels (*ITK actuel*) a été réalisée par enquête auprès de l'exploitant, en recueillant les itinéraires qu'il a effectivement mis en œuvre sur chaque parcelle représentative de son exploitation au cours de l'année 2008-2009 et les rendements obtenus (*tableau 1*).

La construction des *ITK* de protection intégrée contre la flore adventice (*ITK PIC*) pour chaque culture potentielle, s'est faite à dire d'expert en mobilisant les principes de la *PIC* à partir des références existantes (Gran-Aymerich, 2006 ; Munier-Jolain *et al.*, 2008). Les *ITK PIC* diffèrent des *ITK actuels* par un certain nombre de spécificités. Un déchaumage précoce permet de limiter la grenaison des adventices présentes à la récolte, des faux semis répétés pendant l'interculture sont réalisés pour réduire le stock semencier superficiel, un travail du sol très superficiel est systématiquement réalisé à la date du semis pour détruire toutes les adventices et semer sur une parcelle parfaitement propre (*tableau 1*). Les céréales d'automne et de printemps bénéficient de 2 faux semis, excepté lorsque la culture précédente est une culture d'été récoltée tardivement. Le blé est semé tardivement, après le 20 octobre, pour esquiver la période de levée préférentielle des adventices d'automne. Le désherbage mécanique est systématiquement prévu dans toutes les cultures, éventuellement complété par du désherbage chimique, en particulier dans les cultures disposant de solutions herbicides à la fois à large spectre et bon profil écotoxicologique. Les blés par exemple reçoivent un herbicide à large spectre qui peut être complété par un antichardon si le précédent est un protéagineux. Les

aménagements prévus pour la gestion de la flore adventice peuvent avoir des conséquences sur d'autres éléments des *ITK PIC*. Par exemple, les semis tardifs du blé, les faibles niveaux de fertilisation azoté et le choix de variétés peu sensibles aux maladies permettent de limiter les traitements fongicides à un seul passage à demi-dose (Pardo *et al.*, 2010). Chaque *ITK PIC* est associé à un rendement espéré moyen.

L'évaluation des marges pour chaque *ITK actuel* et *ITK PIC* s'appuie sur le descriptif des *ITK*, en affectant un coût à chaque intervention, permettant ainsi d'estimer des indicateurs de rentabilité économique pour chaque culture des systèmes *actuel* et *PIC* (*tableau 2*). Les charges de mécanisation sont calculées sur la base des barèmes d'entraide 2009 (région Nord-Est de la France) pour chaque opération.

Optimisation de l'assolement

La rotation des cultures est un élément important de la rentabilité économique. Mais la rotation est également déterminée par des règles agronomiques, qui sont plus nombreuses dans le cadre de la protection intégrée que dans les systèmes à forts niveaux d'intrants exogènes largement pratiqués en France aujourd'hui. Les règles fixées pour la définition des rotations *PIC* sont les suivantes :

- diversification des périodes de semis pour les cultures de la rotation, avec environ 1/6^e de semis d'automne précoce (colza), 3/6^e de semis d'automne tardifs (blé, orge, triticale, féverole d'hiver, ou pois d'hiver), 1/6^e de semis de printemps précoce (orge de printemps, lupin, moutarde, ou pois de printemps), et 1/6^e de semis de printemps tardif (maïs, sorgho, soja ou tournesol). Cette règle permet de diversifier les dates de semis tout en gardant une dominante de culture d'automne, justifiée par le fait que les semences d'adventices à levée automnale ont généralement une persistance moindre que celles d'adventices de printemps, et sont donc plus affectées par les choix des rotations diversifiées ;
- au moins 1/6^e de la rotation en culture de légumineuse pour contribuer à l'amélioration du bilan énergétique, et compenser les coûts énergétiques du travail du sol et du désherbage mécanique ;

Tableau 1. Nombre de passages d'outils et rendement espéré pour chaque itinéraire technique.

Table 1. Number of agricultural operations and expected yield for each crop management system.

Détail des opérations	Cultures	Colza		Blé		Orge H		Orge P		Tri	Fe P	To	Soj	Sor	Ma	Lu	Pois	Mo	
		Ac	Pic	Ac	Pic	Ac	Pic	Ac	Pic	Pic	Pic	Pic	Pic	Pic	Pic	Pic	Pic	Pic	Pic
Engrais de fond	T145ch + centrifugeuse	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
Déchaumage	T175 + cover crop			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Faux semis	T145 + vibro			2	1			2	1									1	
Travail profond	T200 + charrue labour	1	1	1	1			1			1	1	1			1	1	1	1
Reprise du sol	T175 + herse rotative	1	1	1	1			1			1	1	1	1	1	1	1	1	1
Préparation semis	T145 + vibro		1	1	1			1	1	1	1	3	3	3	3	1	1-2		
Préparation semis	T175 + canadien	1		1		1		1											
Roulage	T145 + rouleau	1						1	1										
Semis (date)	T175 + semoir Roger	N	N	N	T	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Antilimace	T145 + distributeur	1	1			1	1												
Dés herb. mécanique	T145 + herse étrille		1	1	1			2	1	1	2	2	1	1			1	1	
Dés herb. mécanique	T145 + bineuse		1								2				1	2			
Dés herb. mécanique	T145 + désherbineuse*											2			1				2
Épandage azote	T145 + centrifugeuse	2	2	3	4	2	2	2	2	2		1		1	1				3
Traitement herbi.	T145 + pulvérisateur	2		2	1	1		2	1				1	2	1			1	1
Traitement insect.	T145 + pulvérisateur	2	2													1	1		4
Traitement fongi	T145 + pulvérisateur	1	1	2	1	2	2	1	1		1					1	1		
Traitement régul.	T145 + pulvérisateur					2	2	1	1		1								
Récolte (Rdt en qx)	Moissonneuse 300 ch	38	35	78	68	85	80	58	54	70	50	30	25	80	80	32	45	20	

Ac : actuel ; Pic : PIC ; N : normale ; T : tardif après le 20 octobre ; T145: tracteur 145 ch ; Orge H : orge d'hiver ; Orge P : orge de printemps ; Tri : triticales ; Fe P : féverole de printemps ; To : tournesol ; Soj : soja ; Sor : sorgho ; Ma : maïs ; Mo : moutarde ; Lu : lupin ; Vibro : vibroculteur pattes d'oies ; Dés herb : désherbage ; chaque désherbinage* est accompagné du traitement simultané d'herbicide localisé sur le rang ; Rdt : rendement.

– cohérence temporelle des successions : pour chaque culture candidate, on définit la liste des précédents possibles : par exemple, le semis de colza n'est pas possible après une culture d'été, récoltée trop tard. On évite également tout précédent « céréales à paille » avant la culture de blé.

L'outil *ATOUPRIX* (ARVALIS-Institut du végétal), est un optimisateur reposant sur la programmation linéaire. Il a été utilisé pour déterminer l'assolement le plus performant économiquement respectant les contraintes rotationnelles *PIC*, en combinant les

ITK PIC des différentes cultures candidates pour la diversification, et cela pour cinq scénarios de prix de vente des produits agricoles (*tableau 3*). Ces scénarios correspondent aux prix enregistrés en Bourgogne entre 2006 et 2009, période pendant laquelle les prix agricoles ont subi de grandes fluctuations, ce qui permet de couvrir une large gamme de contextes économiques. La diversité des contextes considérés permet d'étudier la sensibilité des assolements, mais ne vise pas à intégrer la variabilité inter-annuelle des prix dans les prises de décisions stratégiques.

Simulation du fonctionnement de l'exploitation agricole en systèmes *actuel* et *PIC*

L'assolement issu de l'optimisation, les *ITK* associés à chaque culture de l'assolement, les débits de chantiers (temps par hectare pour chaque opération) et les conditions pédoclimatiques requises pour chaque opération, permettent de simuler le fonctionnement de l'exploitation agricole sous système *actuel* et *PIC*, et d'évaluer les contraintes en termes d'organisation du travail.

Tableau 2. Exemple de matrice technico-économique construite pour l'itinéraire technique blé.

Table 2. An example of the techno-economic matrix for wheat crop management.

	Débit de chantier (ha/h)	Intrants	Dose
<i>ITK blé actuel</i>			
Engrais de fond	6	Super 46	80 kg/ha
Travail profond	1,1		
Reprise du sol	1,3		
Préparation semis	6		
Semis	3	Semences (variété Aubusson)	180 kg/ha
Épandage engrais	6	0-21-21-10	200 kg/ha
Traitement herbicide	7	Atlantis + Primus + adjuvant	0,3 + 0,07 + 0,15 L/ha
Traitement herbicide	7	Dieze	0,37 L/ha
Épandage engrais	6	Ammonitrate	358 kg/ha
Traitement fongicide	7	Jao + virtuose	0,5 + 0,5 L/ha
Épandage engrais	6	Ammonitrate	100 kg/ha
Traitement fongicide	7	Menara + Acanto + Bravo500	0,4 + 0,25 + 1,25 L/ha
Récolte 78 q	3		
<i>ITK blé PIC</i>			
Engrais de fond	6	Super 46	80 kg/ha
Déchaumage	2		
Faux semis	3,8		
Faux semis	3,8		
Préparation semis	3,8		
Semis tardif fin oct.	3	Semences (variété Soissons)	198 kg/ha
Désherbage méca	9		
Épandage engrais	6	0-21-21-10	200 kg/ha
Traitement herbicide	7	Archipel + adjuvant	0,3 + 0,15 L/ha
Épandage engrais	6	Ammonitrate	142 kg/ha
Épandage engrais	6	Ammonitrate	100 kg/ha
Épandage engrais	6	Ammonitrate	119 kg/ha
Traitement fongicide	7	Opus	0,8 L/ha
Récolte 68 quintaux	3		

Cette simulation est réalisée avec l'outil *SIMEQ* (ARVALIS-Institut du végétal). Cet outil permet d'estimer les dates effectives de réalisation des activités en fonction de règles d'organisation : intervalle de date optimale souhaitée pour la réalisation de chaque opération (par exemple, les semis du blé en système *PIC* peuvent commencer à partir du 20 octobre, et la date butoir est fixée au 1^{er} décembre) ; priorité dans la réalisation des activités qui se chevauchent ; temps de travail maximum par jour (12 heures en juillet et août, 8 heures en octobre et 7 heures le reste de l'année), etc. La simulation s'appuie sur une série de 20 années climatiques pour déterminer la fréquence de réussite ou d'échec dans la réalisation des différentes opérations prévues. Les tensions d'organisation du travail sont quantifiées par la fréquence (sur la séquence simulée) des opérations « problématiques », non réalisées à la date butoir fixée pour chaque opération, et par l'équivalent en temps de travail de ces opérations. Ces indicateurs sont utilisés pour évaluer la faisabilité technique des systèmes, à l'échelle de l'exploitation. On sépare dans l'analyse fréquentielle de l'organisation du travail les 16 années les plus favorables (« années normales ») et les 4 années les plus difficiles (« années difficiles ») du point de vue climatique.

Évaluation du niveau d'utilisation d'herbicides

L'IFT permet d'évaluer la dépendance d'une production donnée aux pesticides. Au niveau de chaque parcelle, l'IFT est calculé par le cumul du nombre de traitements, chaque traitement étant pondéré par la quantité de produit appliqué par hectare, exprimée en valeur relative par rapport à la dose homologuée pour la cible visée.

Résultats

Conception des systèmes de culture *PIC*

Charges de production et marges nettes associées aux itinéraires techniques

Le bilan des charges et des produits associés aux différents *ITK actuels* et *PIC* (tableau 4) montre que le *blé PIC*

Tableau 3. Scénarios de prix (euros/tonne) des produits agricoles.

Table 3. Price scenarios (euros/ton) of agricultural products.

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5
Blé	93	125	230	143	97
Orge de printemps	85	135	135	210	100
Orge d'hiver	80	135	135	180	82
Mais	89	156	156	89	73
Tournesol	222	310	310	350	240
Colza	200	260	260	340	250
Triticale	75	122	122	130	76
Moutarde de printemps	500	440	440	600	1 089
Féverole	125	148	148	160	125
Soja	170	283	283	346	320
Sorgho	75	177	177	109	75
Lupin*	105	230	230	110	105
Pois d'hiver*	100	130	130	120	100
Pois de printemps*	100	130	130	120	100

* « hypothèse d'experts »

génère approximativement la même marge nette que le *blé actuel* dans les 5 scénarios de prix retenus, avec un léger avantage au *blé actuel* lorsque le prix du blé est élevé (scénarios 3 & 4). Le rendement relativement faible du *blé PIC* (-1 t/ha par rapport au *blé actuel*) est compensé par les faibles coûts de mécanisation et d'intrants. Par contre le *colza actuel* est toujours plus rentable que le *colza PIC*, la pénalité de -0,3 t/ha estimée pour le rendement du *colza PIC* n'étant pas complètement compensée par les charges plus faibles. Malgré la pénalité de rendement estimée à 0,5 t/ha pour l'*orge d'hiver PIC*, sa marge nette est le plus souvent plus importante que celle de l'*orge d'hiver actuel*, en raison des charges de production plus faibles en *PIC*. Les *orges de printemps PIC* et *actuel* ont des marges souvent très similaires.

Optimisation de la rotation et de l'assolement

L'optimisation économique, avec *ATOUPRIX*, des rotations sous

contrainte *PIC* a permis de générer cinq assolements (*PIC* 1 à *PIC* 5) (*figure 1*), correspondant respectivement aux cinq scénarios de prix proposés (*tableau 3*). Ces assolements *PIC* 1 à *PIC* 5 obtenus sont évidemment plus diversifiés que l'assolement actuel. La nature de la diversification au sein de chacun, est dictée par la marge nette de chaque culture proposée, calculée par *ATOUPRIX*. Les cultures de diversification introduites sont principalement le sorgho, le soja, la moutarde, le lupin et la féverole de printemps, et un peu de maïs dans le scénario 1. Les cultures de triticale, de tournesol, de pois d'hiver, n'apparaissent jamais dans l'assolement optimal.

Marge nette des différents assolements

La marge nette de chaque système de culture prend en compte l'aide publique sous forme de DPU ([droits à paiement unique], fixés à 330 euros/ha, une valeur moyenne pour une

exploitation céréalière de la région, attribuée à l'ensemble de la sole de l'exploitation, à l'exception de la moutarde). La marge nette calculée pour chaque assolement à la fois dans le scénario de prix pour lequel il a été optimisé, et dans les quatre autres scénarios de prix, montre que les assolements *PIC1* et *PIC5* ont un écart type plus faible et sont donc plus robustes que les autres face à la volatilité des prix (*figure 2*). Cette bonne robustesse peut être reliée à un assolement bien diversifié et équilibré. Au contraire, le système *PIC 3* est plus sensible à la volatilité des prix, en lien avec un assolement moins diversifié, dominé par la culture de blé, ajusté par rapport à un scénario de prix du blé très élevé (230 euros/tonne). En moyenne, les systèmes *PIC* sont déficitaires de 9 euros/hectare seulement par rapport au système *actuel*. Le scénario 4 est le seul contexte de prix pour lequel tous les *assolements PIC* testés sont moins rentables (-169 euros/ha de différence en moyenne) que l'*assolement actuel*, cela en raison de la substitution d'une partie de cultures traditionnelles (colza, blé, orges) à forte marge nette par les cultures de diversification qui sont moins rentables dans ce contexte (*figure 2, tableau 4*).

Faisabilité technique des systèmes de culture *PIC*

Le système *actuel* nécessite en moyenne 14 passages d'outils et 3,7 heures nettes de travail par hectare cultivé (*figure 3*). Contrairement aux idées reçues, les systèmes *PIC* ne génèrent pas d'augmentation du nombre de passages. De même, l'augmentation du temps de travail n'est pas systématique dans les systèmes *PIC*, et le cas échéant, la charge supplémentaire de travail reste inférieure à 0,5 heure par hectare cultivé. En effet, l'augmentation du temps de travail liée aux travaux superficiels du sol pour les faux semis, et au désherbage mécanique, est compensée par la baisse du nombre de traitements phytosanitaires, par la baisse du temps consacré aux épandages d'engrais, en particulier sur les cultures de légumineuses, et par la moindre fréquence du labour en système *PIC*.

Tableau 4. Charges (hors main-d'œuvre) et marges nettes (sans aides) obtenus (euros/ha) pour chaque itinéraire technique pour différents scénarios de prix, en tenant compte du précédent.

Table 4. Charges (without labour costs) and margin (without subsidies, euros/hectare) for each crop management system and preceding crop in different price scenarios.

Culture	Précédent	Charges mécanisation	Charges intrants	Marge nette (sans aide)				
				Scé1	Scé2	Scé3	Scé4	Scé5
Blé PIC	maïs, sorgho	206	306	121	339	1 053	461	148
	protéagineux	215	290	128	346	1 060	468	155
	oléagineux	182	322	128	346	1 060	468	155
Blé actuel	colza, orge P	219	393	113	363	1 182	503	145
Colza PIC	toute culture	249	254	197	407	407	687	372
Colza actuel	céréale A	236	294	230	458	458	762	420
Orge H PIC	protéagineux	186	217	237	677	677	1 037	253
	autre	186	253	201	641	641	1 001	217
Orge H actuel	orge P, blé	190	330	160	627	627	1 010	177
Orge P PIC	céréale A	232	231	-4	266	266	671	77
Orge P actuel	orge H, blé	236	264	-6	284	284	719	81
Triticale PIC	toute culture	150	224	151	480	480	536	158
Féverole PIC	céréale A	280	204	141	256	256	316	141
Lupin PIC	céréale A	297	239	-200	200	200	-184	-200
Soja PIC	céréale A	275	108	43	325	325	483	418
Maïs PIC	céréale A	322	97	293	829	829	293	165
Sorgho PIC	céréale A	275	85	240	1 056	1 056	512	240
Moutarde PIC	céréale A	345	167	488	368	368	688	1 666
Pois P PIC	céréale A	289	223	-62	73	73	28	-62
Pois H PIC	céréale A	268	211	-28	107	107	62	-28
Tournesol PIC	céréale A	339	97	229	493	493	613	283

Scé : scénario ; A : automne ; H : hiver ; P : printemps ; E : été

En revanche, les opérations ne sont pas réparties de la même façon dans le temps, et certaines opérations spécifiques de la *PIC* requièrent des conditions climatiques assez restrictives. Le modèle d'organisation du travail, simulant les systèmes sur 142 hectares sur une séquence de 20 années climatiques, indique que les opérations « problématiques » sont plus fréquentes dans les systèmes *PIC* que dans le système *actuel*, et correspondent à un temps de travail

difficile à insérer dans le calendrier de travail plus important (*figure 4*). Les difficultés de réalisation en système *PIC* concernent essentiellement le désherbage mécanique en culture, qui nécessite des conditions météorologiques sèches pendant la courte période où les plantules adventices sont facilement destructibles par cette opération. Elles concernent également le semis des blés (avec son travail superficiel du sol associé), en raison de la règle de semis tardif qui

s'applique à une période à tendance humide où le nombre de jours favorables diminue rapidement, et le semis de culture de printemps. Ces opérations posent des problèmes de faisabilité ne représentant néanmoins que quelques hectares, et un temps de travail correspondant limité, qui est réparti sur l'ensemble de l'année (*figures 4 et 5*). Pour une exploitation agricole de « grande culture » cultivant 142 hectares, ce temps de travail correspondant aux opérations

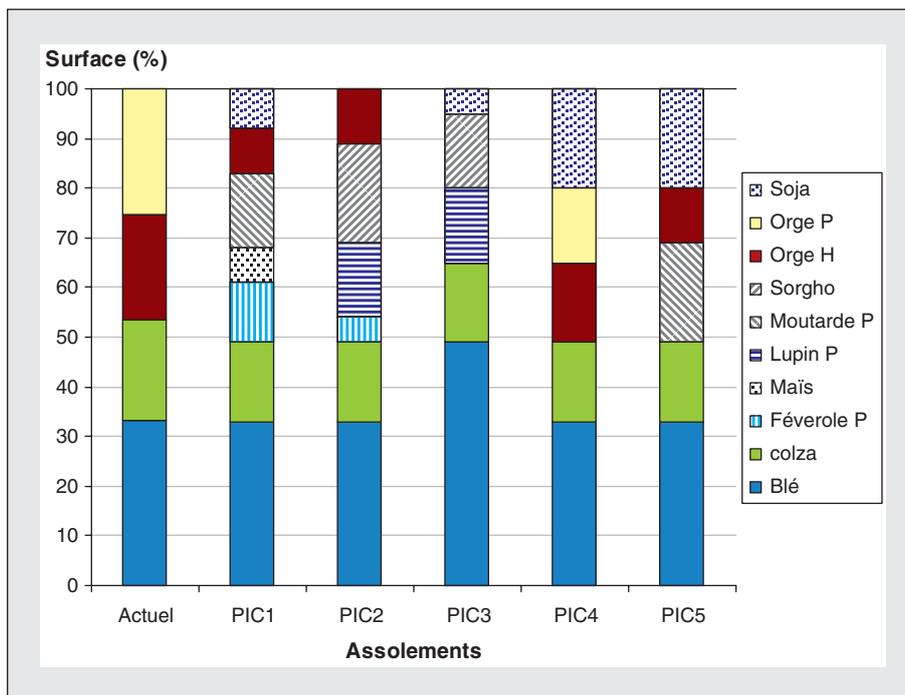


Figure 1. Contribution des cultures dans l'assolement *actuel* et les assolements *PIC* optimisés pour les cinq scénarios de prix.

Figure 1. Contribution of crops in the IWM-based rotations optimized for five price scenarios.

P : printemps ; H : hiver.

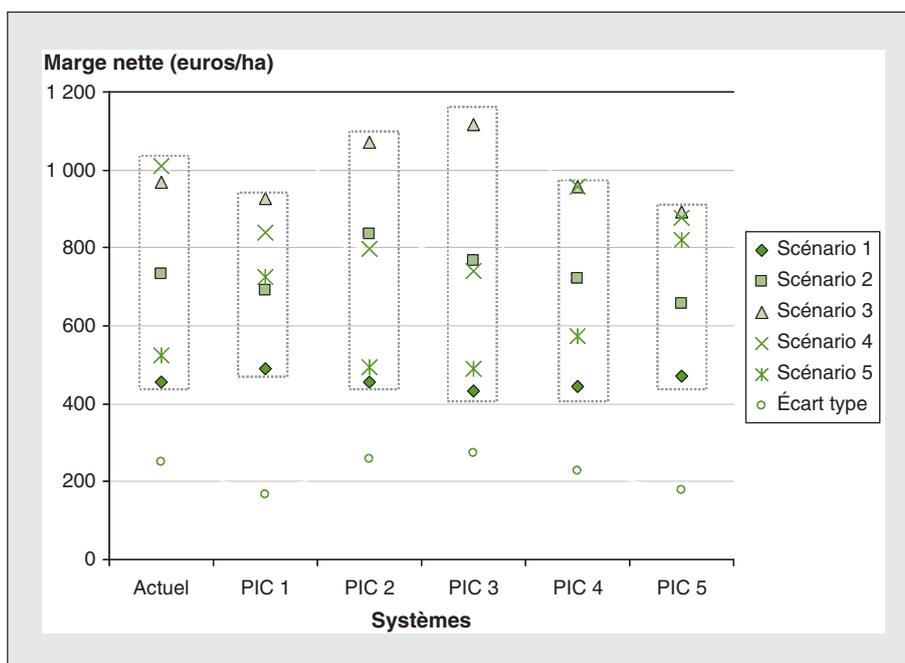


Figure 2. Marge nette des systèmes *actuels* et *PIC* pour les 5 scénarios de prix. La marge nette intègre les aides publiques mais pas les coûts des bâtiments et assurances.

Figure 2. Net margin of current and IWM crop rotations for 5 price scenarios. Net margin includes subsidies but not the costs of buildings and insurance.

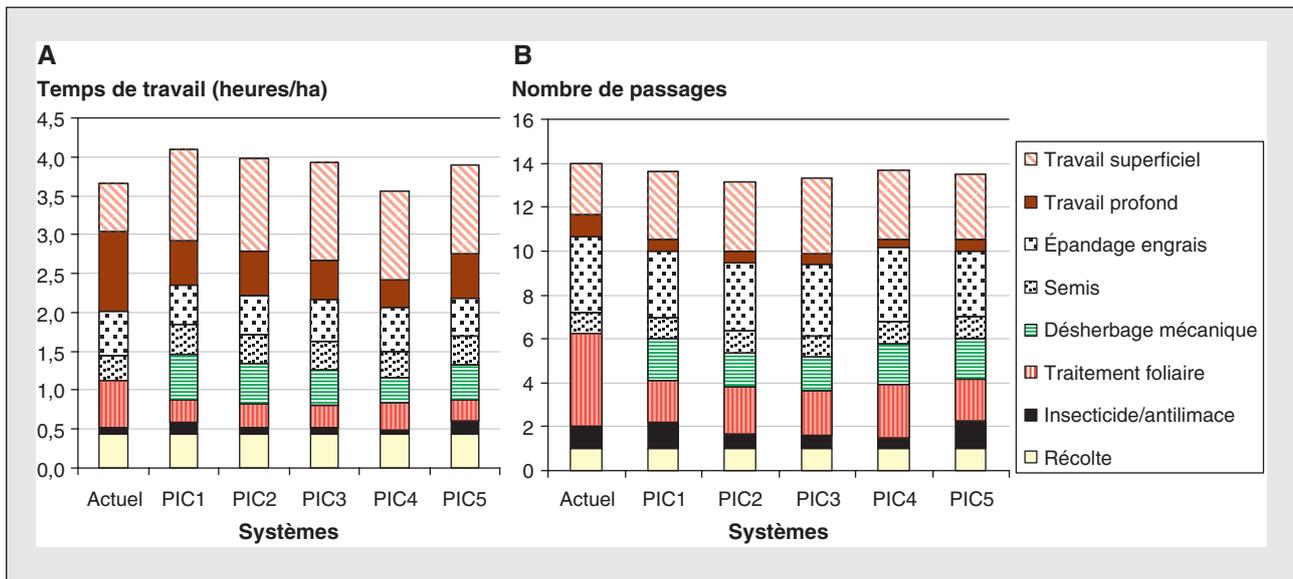


Figure 3. Temps de travail par hectare (A) et nombre total de passages d'outils (B) pour l'ensemble des opérations du système *actuel* et des cinq systèmes *PIC* optimisés.

Figure 3. Net working time per hectare (A) and total number of agricultural operations (B) in the current system and the five IWM optimized systems.

« problématiques » est compris entre 4 heures et 11 heures par an en moyenne sur 20 années. Mais en réalité, les conditions climatiques de

l'année affectent beaucoup les tensions d'organisation du travail. En « année normale » (16 années sur 20) les opérations « problématiques » en sys-

tème *PIC* représentent 2 à 11 heures de temps de travail (figure 4A), contre 14 à 33 heures en « année difficile » (4 années sur 20, figure 4B).

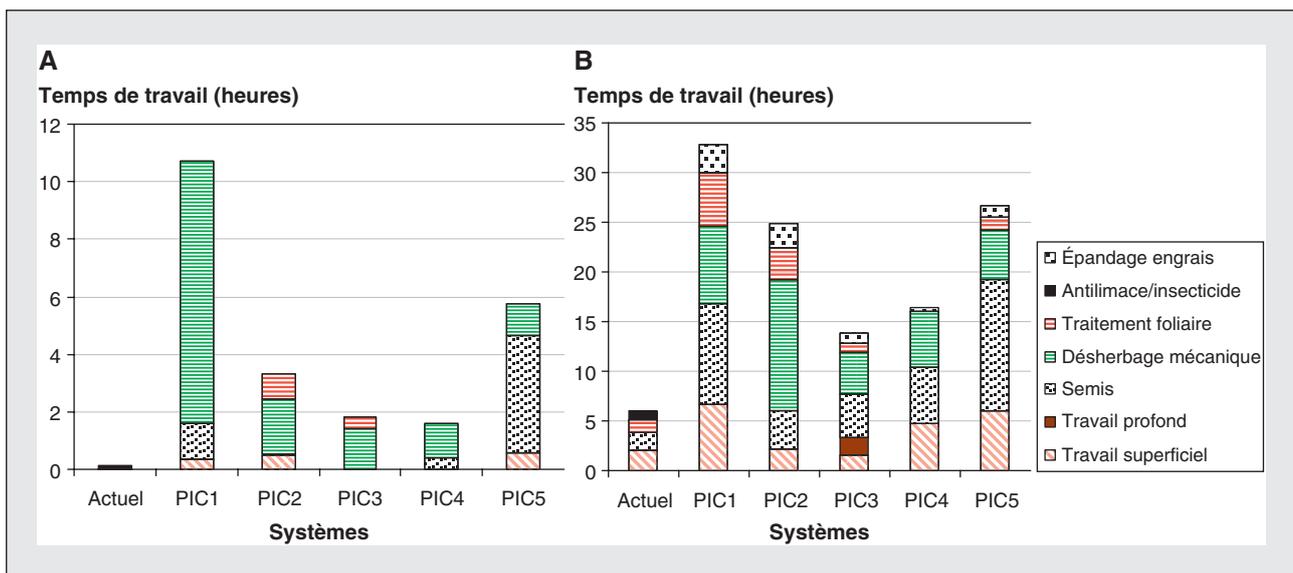


Figure 4. Temps de travail correspondant aux opérations « problématiques », au cours d'une année normale (A : moyenne des 16 années aux années climatiquement les plus favorables) ou d'une année difficile (B : moyenne des 4 années climatiquement les plus défavorables), pour le système *actuel* et les systèmes *PIC* optimisés selon les 5 scénarios de prix.

Figure 4. Working time corresponding to the problematic operations on 142 hectares cultivated during a normal year (A) or an unfavourable year (B) for the current system and the IWM systems optimized.

Les simulations correspondent à l'exploitation de 142 hectares, avec une UTH (unité de travail humain). Une opération est classée « problématique » lorsque le modèle de simulation de l'organisation du travail indique qu'elle n'a pas pu être réalisée avant la date butoir fixée, parce que les conditions climatiques n'étaient pas favorables, ou parce que le chantier était en concurrence avec d'autres opérations prioritaires.

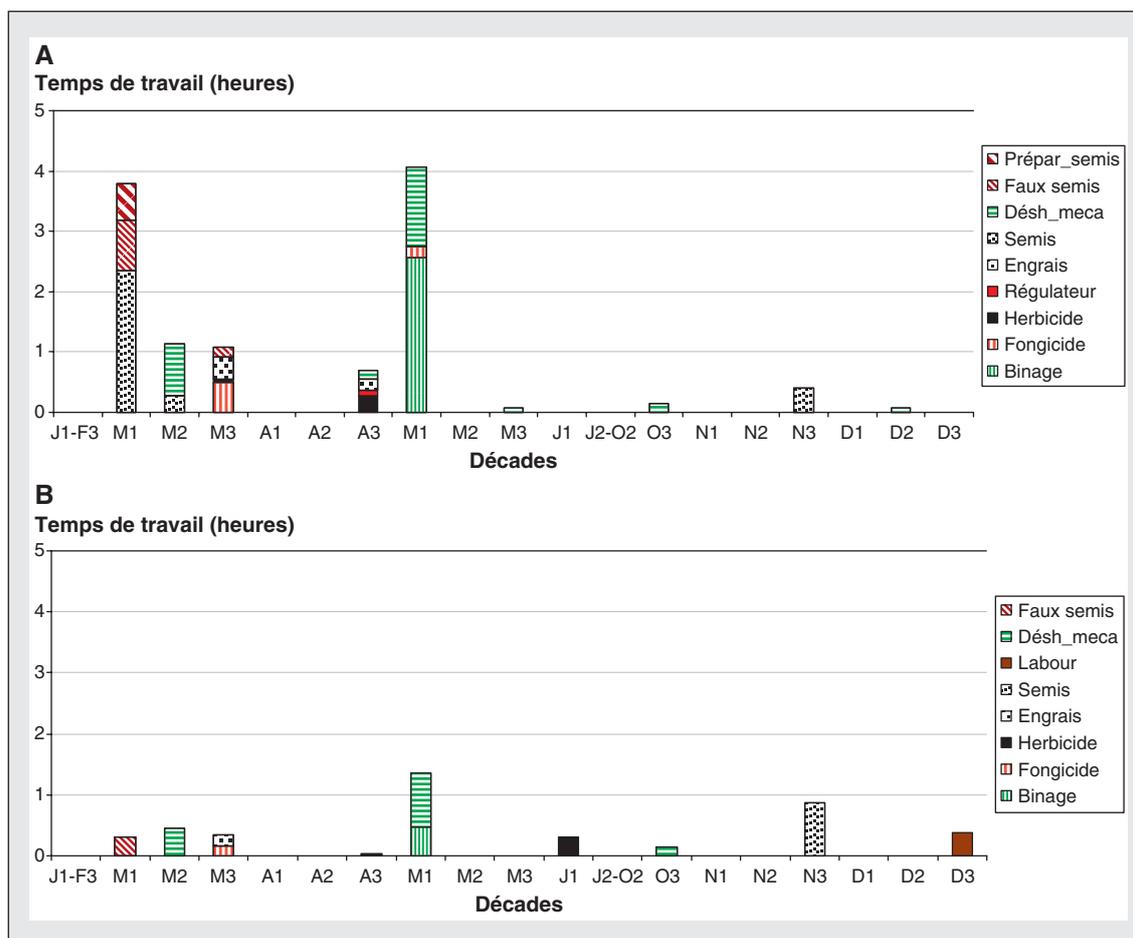


Figure 5. Répartition annuelle des opérations « problématiques » au cours d'une année difficile, exprimées en temps de travail, pour les systèmes PIC1 (A) et PIC3 (B).

Figure 5. Annual distribution of problematic operations during an unfavourable year, expressed as working time, for the IWM systems optimized PIC1 (A) and PIC3 (B).

Les solutions permettant de réaliser ou de contourner les opérations « problématiques » sont présentées et discutées dans la conclusion.

Effets des systèmes PIC sur l'utilisation de pesticides

L'exploitation agricole retenue dans le cas de cette étude est déjà engagée dans une démarche de réduction de dose des traitements pesticides plutôt marquée. Les IFT des systèmes PIC proposés pour les 5 scénarios de prix sont réduits de 48 à 63 % pour l'ensemble des pesticides par rapport au système *actuel* (de 60 % à 72 % par rapport à la moyenne régionale), et de 44 à 60 % par rapport au système *actuel*

si l'on ne considère que les herbicides (*figure 6*). La baisse d'utilisation d'herbicide dans les systèmes PIC par rapport au système *actuel* est répartie sur toutes les cultures de la rotation, avec par exemple une baisse importante dans le blé et l'abandon complet du désherbage chimique dans le colza (dans lequel on prévoit un désherbage mécanique en plusieurs passages), l'orge d'hiver (espèce très compétitive). Les cultures pour lesquelles on conserve des herbicides sont celles qui sont peu compétitives contre la flore adventice (pois par exemple) ou d'autres comme le blé qui bénéficient d'herbicides à large spectre très efficaces, et donc très efficaces sur l'ensemble de la succession culturale.

Discussion et conclusion

Dans les exploitations de grandes cultures, le contexte de prix des produits et les conditions pédoclimatiques ont une forte influence sur le choix des assolements, les tensions d'organisation du travail pour réaliser les opérations culturales prévues et la rentabilité des différents systèmes de production. Ces éléments ont été pris en compte dans cette analyse *a priori* pour évaluer des systèmes de culture optimisés dans le cadre de règles agronomiques de gestion de la flore adventice avec peu d'herbicides, dans une

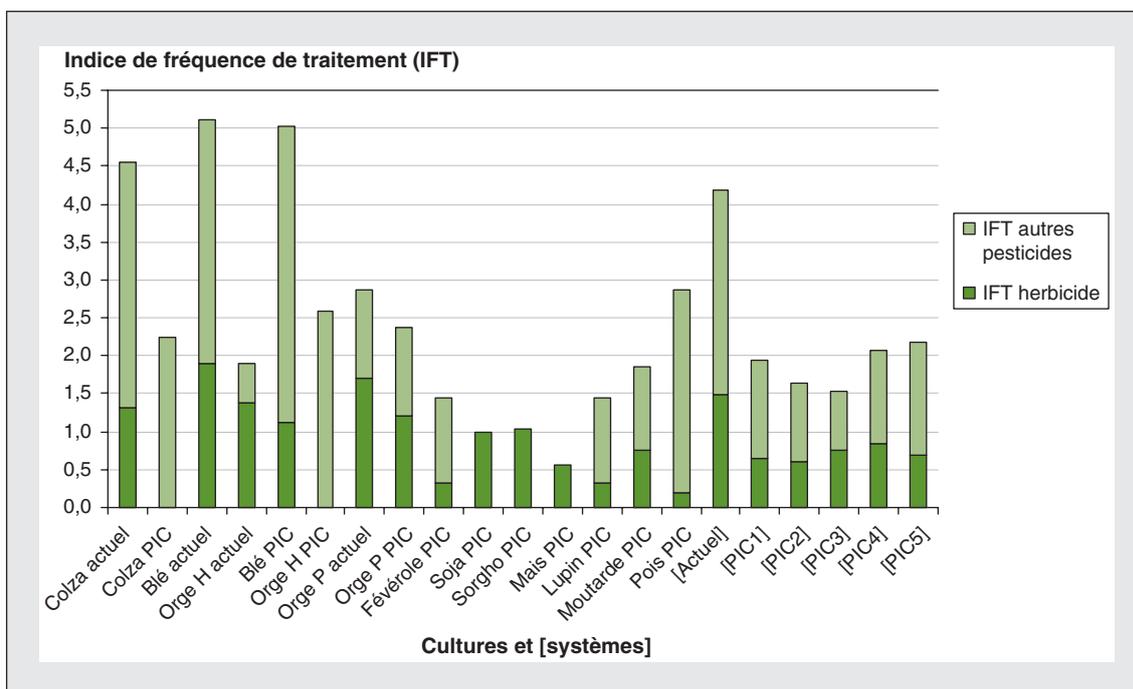


Figure 6. Indice de fréquence de traitement (IFT) moyen des systèmes *actuels* et *PIC* (à droite du graphique) et détail des IFT par culture pour les itinéraires techniques *actuels* et *PIC*.

Figure 6. Treatment Frequency Index (FTI) of conventional cropping systems and of Integrated Weed Management systems.

P : printemps ; H : hiver.

exploitation de grandes cultures de la plaine de Dijon en région Bourgogne. Malgré les contraintes de rotations fortes de la *PIC* et l'introduction des cultures de diversification, les systèmes *PIC* sont selon cette étude globalement aussi rentables que le système *actuel* pour les différents scénarios de prix testés. Pour chaque scénario de prix testé, le système *PIC* est avantageux lorsque la marge nette moyenne des *ITK* des cultures de diversification choisies dépasse la marge nette moyenne des *ITK* des cultures actuelles substituées (colza, blé, orges), et inversement.

Ces résultats fondés sur des simulations doivent être considérés avec une relative prudence. Ils s'appuient sur des itinéraires techniques *PIC* définis à dire d'experts, associés à des rendements espérés. Bien que les références précises en protection intégrée soient à l'heure actuelle insuffisantes pour valider à 100 % ces hypothèses, leur robustesse a été renforcée par les résultats obtenus par l'expérimentation de l'Inra menée à proximité, pendant 10 ans avec 8 parcelles *PIC*

sur un sol très similaire (Munier-Jolain *et al.*, 2008 ; Chikowo *et al.*, 2009). Ces résultats théoriques indiquent que malgré la relative mauvaise rentabilité économique observée sur les parcelles expérimentales *PIC* de Dijon-Époisses (Pardo *et al.*, 2010) il existe une certaine marge de manœuvre pour mieux concilier les contraintes rotationnelles *PIC* avec la rentabilité économique de ces systèmes.

Les simulations du fonctionnement de l'exploitation agricole ont montré que la réalisation des opérations en année normale du point de vue climatique ne génère que peu d'augmentation du temps de travail et de tension organisationnelle du travail à l'échelle de l'exploitation. Ces systèmes bénéficient notamment de l'étalement des travaux dû à la diversification des assolements, qui limite l'intensité des pics de travail. En revanche, en année difficile, des problèmes de réalisation de certaines opérations peuvent être rencontrés en période humide, au printemps et en fin d'automne. Les opérations concernées représentent des surfaces limitées et du temps de

travail correspondant de quelques heures seulement. Il existe des pistes pour résoudre ces quelques tensions d'organisation du travail, soit *via* l'augmentation de la flexibilité du travail pendant les années difficiles (notamment en fin d'automne et au printemps), soit *via* l'adaptation de l'outillage pour augmenter les débits de chantier, en particulier des semis. Le débit de chantier de semis considéré dans nos simulations est, suivant les cultures, égale à 1,8 ou 3 hectares par heure, alors qu'il existe aujourd'hui des équipements de semis permettant d'effectuer cette opération beaucoup plus rapidement. Une partie des « tensions de travail » identifiées résulte de la règle du retard de la date de semis du blé après le 20 octobre. Il est possible d'assouplir cette règle pour ne la réserver qu'à une partie de la sole de blé, (par exemple aux parcelles potentiellement les plus enherbées). Les difficultés identifiées en année difficile pour les semis des cultures de printemps sont moins problématiques, car on peut toujours tolérer d'attendre la fin d'une période

pluvieuse en année humide, donc de retarder les semis sans conséquence majeure pour la production.

Il y aurait donc une place pour l'évolution vers des systèmes de protection intégrée dans ce contexte pédoclimatique plutôt favorable de la plaine de Dijon, ce qui ne veut en aucun cas dire que cette évolution soit facile à mettre en œuvre en pratique. L'intérêt du travail présenté provient aussi de sa dimension méthodologique. La méthode d'évaluation *ex ante* utilisée a vocation à être appliquée sur une diversité d'exploitations agricoles pour identifier les conditions économiques, pédoclimatiques et de structure d'exploitation les plus favorables/défavorables au développement de la protection intégrée. Cependant l'extension de la méthode à d'autres contextes nécessitera d'élaborer pour chaque contexte une matrice technico-économique associant des itinéraires techniques *PIC* à des rendements espérés pour chaque culture candidate. L'élaboration de ces matrices requiert de mobiliser toutes les références issues d'essais *PIC* au champ et des réseaux de recherche-développement (RMT « systèmes de culture innovants » et Réseau DEPHY Ecophyto), mais aussi de mobiliser de l'expertise quand les références sont insuffisantes.

Bien que tous les pays de l'Union européenne soient concernés par l'adoption des principes de protection intégrée (*cf.* directive 2009-128), bien que la diversification des rotations et des assolements fasse partie des recommandations associées (*cf.* par exemple Neumeister *et al.*, 2007), les études européennes sur les conséquences en termes agronomiques, économiques et en termes d'organisation des filières agricoles restent encore aujourd'hui peu répandues. La méthodologie présentée dans cette étude pourrait être utilisée pour étudier les conséquences du passage à la *PIC* dans les différents contextes agricoles européens. ■

Références

- Chikowo R, Faloya V, Petit S, Munier-Jolain N, 2009. Integrated Weed Management systems allow reduced reliance on herbicides and long-term weed control. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 132 : 237-42.
- Croll BT, 1991. Pesticides in surface waters and groundwaters. *Water and Environment Journal* 5 : 389-95.
- Gaillard G, Freiermuth R, Baumgartner D *et al.*, 2007. Methode zur Ökobilanzierung landwirtschaftlicher Systeme. *Schriftenreihe der ART*.
- Haarstad K, Ludvigsen GH, 2007. Ten years of pesticide monitoring in Norwegian ground water. *Ground Water Monitoring & Remediation* 27 : 75-89.
- Holman RE, Leidy RB, Walker AE, 2000. Evaluation of selected pesticides in North Carolina surface water supply: intake study. *Journal of the American Water Resources Association* 36 : 75-85.
- Munier-Jolain N, Deytieux V, Guillemin JP, 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.
- Neve P, Powles SB, 2005. High survival frequencies at low herbicide use rates in populations of *Lolium rigidum* result in rapid evolution of herbicide resistance. *Heredity* 95 : 485-92.
- Kurstjens DAG, Kropff MJ, 2001. The impact of uprooting and soil-covering on the effectiveness of weed harrowing. *Weed Research* 41 : 211-28.
- Gran-Aymerich L, ed, 2006. *Solutions agronomiques limitant le recours aux herbicides*. Paris : ministère de l'Agriculture et de la Pêche.
- Mischler P, Lheureux S, Dumoulin F, Menu P, Sene O, Hopquin JP, *et al.*, 2009. Huit fermes de grande culture engagées en production intégrée, réduisent les pesticides sans baisse de marge. *Courrier de l'environnement de l'INRA* 57 : 73-91.
- Neumeister L, Williamson S, Parente S, Cannell E, Nielsen H, 2007. *Pesticide Use Reduction Strategies in Europe : Six case studies*. <http://www.pan-europe.info/Resources/Reports>. Pesticide Action Network Europe.
- 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? *European Journal of Agronomy* 33 : 24-32.