

Agronomie

environnement & sociétés

La revue de l'association française d'agronomie

Agronomie et Grenelle de l'environnement

- Grenelle de l'environnement, agriculture, développement durable
- Vers une nouvelle façon d'appréhender et gérer la santé des plantes ?
- Lutte contre l'effet de serre et efficacité énergétique : comment faire converger performance environnementale et performance économique ?
- Gestion durable des ressources en eau et milieux aquatiques : quelle place de l'agronomie dans leur nécessaire gestion territoriale ?
- Agriculture HVE (haute qualité environnementale), slogan ou objectif réaliste ? Une gestion environnementale à cibles multiples est-elle intégrable au niveau des exploitations agricoles et des territoires ?

Conception et évaluation de systèmes de culture innovants : le cas exemplaire de la Protection Intégrée contre la flore adventice

Design and evaluation of innovative cropping systems: the exemplary case of IPM against the weed flora.

Nicolas Munier-Jolain

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

Résumé

La Protection Intégrée contre la flore adventice est un bon exemple d'objet d'étude complexe, du fait de la diversité des leviers agronomiques mobilisables, des interactions éventuelles entre ces leviers, de la diversité des espèces adventices, et des temps longs à considérer pour intégrer les effets cumulatifs. Cet article montre comment sont mobilisées la modélisation et l'expérimentation 'systèmes' pour appréhender cette complexité. Il illustre également la large gamme de compétences requises, de l'écologie comparative des espèces jusqu'aux sciences de l'environnement et aux sciences de gestion, nécessaires pour étudier l'insertion potentielle des innovations dans l'exploitation agricole. Les résultats indiquent que la maîtrise technique des infestations adventices est possible, avec des bénéfices environnementaux intéressants. La problématique de la diversification des cultures est un enjeu clef de la performance économique des systèmes économes en herbicides.

Mots-clés

Protection Intégrée, flore adventice, système de culture, modélisation, expérimentation 'systèmes', évaluation, interdisciplinarité

Abstract

Integrated Weed Management is an example of complex research area, because of (i) the number of potential management measures, (ii) the possible interactions between these measures, (iii) the range of weed species with various traits, and (iv) the long term consideration required for taking into account the cumulative effects of cropping systems. This paper shows how both modeling and a long term system experiment were used for dealing with this complexity. It also illustrates the diversity of skills required, from comparative ecology to characterize the diver-

sity of weed species and predict their behavior as a function of cropping systems, up to environmental sciences and management sciences, which were used for studying the consequences of innovative cropping systems for the farm management. The results indicate that satisfying weed management can be achieved by combining various measures within a fully redesigned cropping system, with a range of environmental benefits. However, some management measures that are efficient for weed control at the field scale, such as delaying the sowing dates of winter cereals for escaping autumn emerging weeds, might be difficult to implement in practice because of induced bottlenecks in the labor organization at the farm scale. Some weed management measures tend to reduce yields, but this might be at least partly compensated for by reduced input costs. The overall economic profitability of Integrated Weed Management-based systems depends mostly on the possibilities for introducing diversifying crops with sufficient potential economic return.

Keywords

Integrated pest management, weeds, cropping systems, modeling, 'systems' experimental methods, evaluation, interdisciplinarity

Introduction

Les travaux de recherche concernant de nouveaux modes de gestion de la flore adventice moins dépendants des herbicides sont justifiés par de nombreuses raisons. En premier lieu, les herbicides sont les pesticides dont les résidus sont le plus fréquemment et massivement identifiés dans les suivis de qualité des eaux des rivières et nappes souterraines (Croll, 1991; Haarstat and Lugvisen, 2007), ce qui préoccupe les organismes de gestion de la qualité des eaux. En deuxième lieu, l'efficacité des herbicides utilisés au cours des dernières décennies a conduit à une réduction de la diversité des espèces adventices des champs cultivés (Fried et al., 2006), et la réduction de l'abondance des adventices pourrait être en partie responsable de la décroissance de la biodiversité animale des espaces ruraux. La biomasse adventice (en particulier les graines), constitue une ressource trophique primaire pour différentes composantes de la biodiversité. Des études menées en Angleterre ont par exemple montré une corrélation entre la décroissance de l'abondance des adventices et l'abondance et la diversité des espèces d'oiseaux inféodés aux plaines céréalières (Robinson and Sutherland, 2002; Gillings et al., 2005). La restauration des équilibres écologiques dans les régions de grandes cultures nécessiterait donc de restaurer

des niveaux de diversité et de biomasse adventices sans pour autant compromettre la productivité agricole. La troisième raison motivant la sortie du désherbage ‘tout chimique’, en réintroduisant des moyens agronomiques de gestion des adventices, est liée aux impasses techniques rencontrées dans de nombreux cas en raison du développement de populations adventices résistantes aux herbicides. Or ce phénomène risque de s’accroître avec la révision des homologations, qui tend à réduire la liste des herbicides disponibles, et limite donc les possibilités d’alternance de produits et de modes d’action, base de la prévention actuelle contre la sélection des résistances. La complémentarité de l’agronomie et de la chimie intéresse aujourd’hui l’industrie phytosanitaire qui y voit à juste titre une solution pour préserver l’efficacité des herbicides encore autorisés, voire des quelques nouvelles molécules arrivant sur le marché.

Enfin, pour la France, le plan ministériel ECOPHYTO 2018 prévoit une réduction importante de l’usage des pesticides, ce qui nécessite d’orienter l’agriculture vers des systèmes moins dépendants en herbicides. Evidemment, l’évolution des pratiques agricoles dans le cadre de ce plan devra intégrer des exigences de durabilité économique, environnementale et sociale.

La profession agricole est aujourd’hui démunie pour réduire l’usage des herbicides en grandes cultures, beaucoup plus que pour réduire l’usage de fongicides par exemple. En culture céréalière, le choix de variétés à faible sensibilité vis-à-vis des maladies, des semis tardifs et des densités de semis faibles permettent de réduire les niveaux de maladie et la fréquence du besoin de traitement (Rolland et al., 2003). Les agriculteurs impliqués dans des programmes de Protection/Production Intégrée, dont l’objectif est de valoriser les modes de régulation physiques et biologiques des bioagresseurs pour limiter le recours aux pesticides, ont pu assez facilement adopter ces itinéraires techniques et réduire significativement les Indices de Fréquence de Traitement (IFT) pour les fongicides. Mais la réduction de l’usage des herbicides est plus difficile, alors que les niveaux d’usage actuels sont très importants, atteignant environ 40% de l’usage total des pesticides en grandes cultures en France, exprimé en Equivalent Doses Pleines (Butault et al., 2010).

La première difficulté vient du fait que les moyens agronomiques alternatifs à la lutte chimique

contre les mauvaises herbes sont nombreux, mais caractérisés par une efficacité individuelle faible par rapport à l’efficacité attendue des herbicides. Il est donc impossible d’envisager une simple substitution d’un traitement herbicide par la mise en œuvre d’une technique culturale particulière, comme le désherbage mécanique par exemple. La Protection Intégrée (PI) requiert la mise en œuvre combinée de l’ensemble des techniques disponibles : succession culturale diversifiée permettant de diversifier les dates de semis (et donc le positionnement saisonnier des cycles culturaux), travail du sol adapté pour raisonner l’enfouissement du stock semencier, faux-semis répétés, positionnés en fonction des périodes de levée préférentielles des espèces cibles, et donc souvent associés à des adaptations des dates de semis, choix de variétés compétitives, semées à fortes densités et si possible à écartement inter-rangs faible pour maximiser l’aptitude à la compétition du couvert, ajustement de la fertilisation azotée en fonction de la nitrophilie relative des espèces cultivées et adventices, valorisation des propriétés allélopathiques des couverts végétaux, valorisation des effets inhibiteurs des mulchs sur la levée des adventices, désherbage mécanique, voire désherbage chimique adapté en fonction des situations, éventuellement localisé sur les rangs des cultures en cas d’association avec du binage des inter-rangs (désherbage mixte)... La PI nécessite donc des adaptations lourdes des systèmes de culture, des ruptures fortes par rapport aux pratiques actuelles, et donc d’autant plus difficiles à mettre en œuvre. En outre, les connaissances actuelles sur ces systèmes ne permettent pas d’assurer que l’efficacité de la combinaison de ces techniques à effets partiels sera suffisante pour permettre effectivement de réduire significativement le recours aux herbicides.

La deuxième difficulté vient des effets cumulatifs des techniques culturales sur la flore adventice, liés à la persistance des semences adventices dans le sol. Une petite baisse du niveau de maîtrise d’une infestation une année donnée peut être sans conséquence pour le rendement de la culture en place, mais générer une augmentation du stock semencier qui à terme pourra provoquer des problèmes de maîtrise. Cette crainte des conséquences à long terme explique une part importante des réticences au changement stratégique des agriculteurs.

La recherche agronomique sur le thème de la PI contre la flore adventice est donc au cœur des débats sur l'évolution de l'agriculture. Ce document apporte un témoignage agronomique qui repose très largement sur l'expérience de conduite d'une expérimentation de longue durée à l'INRA de Dijon depuis 2000 (expérimentation systémique 'PI' de Dijon-Epoisses).

L'expérimentation permet d'évaluer les performances de systèmes de cultures fondés sur les principes de la PI contre les adventices. L'objectif du témoignage est d'illustrer deux types de messages :

- Sur le plan des résultats expérimentaux, le témoignage apporte une contribution aux débats sur les possibilités d'évolution des modes de gestion de la flore adventice en montrant l'efficacité technique des prototypes de systèmes de culture testés, mais en soulignant également certaines contraintes, limitant les possibilités d'adoption des principes de PI dans le contexte actuel ;

- Le témoignage illustre également différentes facettes du métier de chercheur agronome : d'une part la conception de prototypes de systèmes de culture nécessite de développer des méthodes spécifiques pour appréhender la complexité des systèmes étudiés, mettre en évidence les interactions entre facteurs techniques, ici grâce à la modélisation ; d'autre part, la nécessaire prise en compte de la diversité des enjeux nécessite de traiter des questions à la lisière de l'agronomie, à l'interface avec d'autres disciplines, comme les sciences de l'environnement, les sciences sociales, les sciences économiques et la gestion, élargissant d'autant la gamme des compétences de l'agronome vraiment généraliste.

Définition des principes de PI : une activité à forte teneur en agronomie

L'expérimentation 'systèmes' de Dijon-Epoisses comporte 5 systèmes de culture, dont une référence pour laquelle le contrôle des adventices repose intégralement sur le désherbage chimique, et 4 systèmes de PI (PI en système sans labour, avec ou sans désherbage mécanique, avec ou sans désherbage chimique). Chaque système (i.e. chaque ensemble de règles de décision) est mis en œuvre sur deux parcelles d'environ 2 ha.

L'explicitation des règles de gestion de la flore adventice repose sur la connaissance du fonction-

nement du système complexe 'champ cultivé / communauté adventice'. Selon les cas, la connaissance peut prendre la forme d'une expertise peu formalisée (connaissance 'grise'), ou peut être issue directement de résultats d'expérimentations analytiques ou d'expérimentations *in silico* à l'aide de modèles de simulation. L'agronome doit intégrer la connaissance des effets des techniques culturales sur les états du milieu (par exemple l'effet du travail du sol sur l'enfouissement des semences fraîches et sur la remontée de semences anciennes enfouies lors d'un précédent travail), la connaissance des interactions éventuelles entre techniques culturales, la connaissance du fonctionnement écophysiologique du peuplement plurispécifique, par exemple dans le domaine de la compétition pour la lumière.

Mobilisation de la modélisation pour appréhender la complexité des systèmes

L'exemple retenu pour illustrer l'apport de la modélisation pour appréhender la complexité du système est celui des interactions entre la succession culturale et le travail du sol. Le labour avec retournement est connu pour sa contribution à la maîtrise de la flore adventice, en particulier pour les espèces dont la persistance des semences dans le sol est relativement courte, ce qui correspond à une décroissance rapide du niveau du stock semencier. Le labour enfouit les semences à une profondeur en général incompatible avec la germination et la levée de plantules (sauf pour quelques espèces à très grosses semences, comme la folle-avoine par exemple, capables d'une croissance autotrophe de la plantule de plusieurs centimètres avant d'atteindre l'émergence à la surface du sol)¹. Bien entendu, le labour remonte aussi des semences plus anciennes enfouies par un labour précédent. Mais d'une part la succession des labours produit un effet de dilution des semences sur l'ensemble de la profondeur travaillée, ne laissant qu'une faible proportion des semences dans les horizons les plus superficiels favorables à la germination ; d'autre part, la densité de semences placée en situation favorable est affectée par la mortalité 'naturelle' des semences, d'autant plus grande que la persistance des semences est faible. Le vulpin des champs, par

¹ Nathalie Colbach insiste sur l'importance du bon réglage de la rasette sur la charrue, plus déterminant pour le bon enfouissement des semences que la profondeur de travail

exemple, comme de nombreuses graminées à germination automnale, est typiquement une espèce très sensible au labour en raison de sa faible persistance (Barralis et al., 1998). Pour autant, même pour une espèce très sensible comme le vulpin, cela ne veut pas dire qu'il faut préconiser un labour systématique tous les ans pour optimiser la gestion du stock semencier. En effet, le raisonnement est plus complexe en raison d'interactions avec d'autres techniques culturales, comme par exemple la succession culturale. Un modèle simple simulant l'évolution démographique des populations en fonction des systèmes de culture pratiqués a été utilisé pour analyser de

façon théorique ces interactions. Dans l'exemple présenté (figure 1), l'évolution démographique d'une population de vulpin est simulée dans une succession maïs-blé, i.e. une succession ne permettant une nouvelle production de semences que tous les deux ans, dans le blé, puisque le semis du maïs est trop tardif par rapport aux périodes de levée du vulpin. Dans les simulations réalisées, le vulpin n'est pas maîtrisé en cas de travail superficiel tous les ans, malgré l'application d'un herbicide systématique sur le blé, d'une efficacité théorique de 95%.

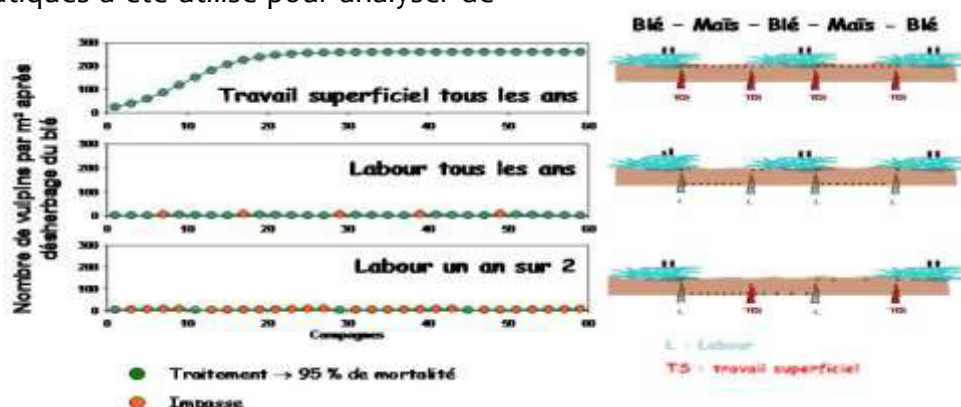


Figure 1 : simulation de l'évolution démographique d'une population de vulpin dans une succession maïs-blé, pour trois stratégies (A) travail superficiel tous les ans, (B) labour tous les ans, (C) Labour un an sur deux, avant le maïs. La densité de vulpin dans le maïs, supposée nulle, n'est pas représentée. A droite, le dessin représente le développement végétatif du vulpin, la production de semences et le positionnement des semences dans le sol, expliquant les différences de comportement entre les trois stratégies.

Lorsque le labour est pratiqué tous les ans, avant le maïs et avant le blé, il permet de maîtriser l'infestation, mais l'application de l'herbicide en complément tous les deux ans (ou presque) dans le blé est nécessaire pour maintenir l'infestation à un niveau jugé satisfaisant. En cas de labour un an sur deux (avant le blé ou avant le maïs), non seulement l'infestation est maîtrisée, mais cela est possible presque sans herbicide, qui n'est appliqué que dans un blé sur huit environ, soit tous les 16 ans. Cela s'explique par le fait que les semences fraîches produites dans un blé sont enfouies par un premier labour, mais non remontées avant le blé suivant. Elles ne sont remontées en surface qu'avant le blé de l'année $n+4$. En cas de labour un an sur deux dans une rotation de ce type (maïs-blé), il y a donc 4 ans entre deux générations successives, au lieu de deux ans s'il n'y a jamais de labour ou si le labour est systématique, et l'impact de la mortalité 'naturelle' des semences dans le sol est de ce fait beaucoup plus important.

Dans cet exemple, l'utilisation d'un modèle qui décompose l'effet des systèmes de culture en processus majeurs a permis d'analyser la complexité du système, de mettre en évidence les interactions entre techniques culturales, et d'inférer des règles de gestion. Dans d'autres rotations plus complexes, des simulations plus récentes ont abouti à des conclusions similaires, et dans certains cas un labour occasionnel bien positionné dans la rotation suffit à contribuer efficacement à la maîtrise d'une population de vulpin (Colbach et al., 2010). A notre connaissance, ce type d'interaction entre succession culturale et travail du sol n'a jamais été démontré expérimentalement, en raison de la lourdeur et de la durée qu'une expérimentation nécessiterait pour traiter la question. Dans le cas de l'expérimentation systématique de longue durée de Dijon-Epoisses, les résultats théoriques issus de simulations justifient la règle de gestion de labour un an sur deux qui fait partie du corpus de règles définissant les systèmes de PI. Ce corpus est constitué d'un en-

semble de règles, concernant également la diversification de la succession culturale, la réalisation de faux-semis, la préparation de l'implantation des cultures, les dates et densités de semis, les choix variétaux, la fertilisation azotée, le désherbage mécanique...

Mobilisation de concepts d'écologie pour intégrer la diversité des espèces adventices

Le travail d'agronome correspondant à la conduite d'une telle expérimentation systémique comporte une dimension analytique (décomposition des processus pour comprendre les effets des systèmes) et une dimension intégrative (intégration des connaissances pour construire un système cohérent), deux composantes traditionnelles de l'agronomie. Dans le cas de la gestion de la flore adventice, cela nécessite également de prendre en compte la diversité des espèces adventices, de leur biologie et de leur écologie, qui expliquent la diversité des comportements et des réponses aux systèmes de culture. C'est par exemple la connaissance des espèces pour leur période de germination préférentielle et pour la durée de vie des semences dans le sol qui a été prise en compte pour définir des principes de diversification de la succession culturale des prototypes de systèmes testés à Dijon-Epoisses. La conception de systèmes de culture doit donc s'appuyer sur des travaux relevant de l'écologie comparative des adventices, dont les objectifs et les contours doivent être définis par un dialogue (parfois délicat) entre agronomes et écologues. L'enjeu est d'élargir la gamme des caractères (traits de réponse) considérées en écologie comparative pour caractériser la diversité interspécifique et être en mesure de rendre compte de la diversité des effets des systèmes de culture.

La PI est efficace pour réduire la dépendance aux herbicides

Baisse d'usage d'herbicide

Du point de vue strictement biotechnique, les résultats de l'expérimentation de Dijon-Epoisses sur une séquence de 9 ans (2001-2009) semblent indiquer qu'il est possible de conduire des systèmes de grandes cultures avec peu d'herbicides tout en maîtrisant la flore adventice, grâce à l'efficacité combinée des différentes techniques culturales composant les stratégies de PI. Pour tous les systèmes de PI, le niveau d'utilisation d'herbicide, caractérisé par l'indice de fréquence de traitement (IFT), est réduit par rapport au système de référence. Il est divisé par 3 dans le système de PI typique, utilisant tous les moyens de lutte disponibles, y compris le désherbage mécanique. La combinaison de l'ensemble des moyens alternatifs aux herbicides permet donc ici d'atteindre largement les objectifs fixés par le plan ministériel ECOPHYTO 2018.

Maîtrise de la flore adventice

Dans le même temps, la flore adventice semble maîtrisée, puisqu'on n'a pas observé de tendance à la dégradation de l'état malherbologique des 8 parcelles en PI, c'est-à-dire pas de tendance à l'augmentation de la densité des adventices au cours des années. Lors de la dernière caractérisation du stock semencier en 2005 (cinq ans après le début de l'essai), la densité de semences du stock était plutôt plus faible qu'au début de l'essai sur l'ensemble des parcelles (Figure 2). Le vulpin en particulier, qu'on a semé sur chacune des parcelles au début de l'essai (600 graines par m² sur une station de 100 m²), a disparu de presque toutes les parcelles, sauf sur les parcelles sans labour, alors que quasi aucun herbicide anti-graminée n'a été appliqué. Le vulpin apparaît donc comme une espèce particulièrement sensible aux effets de la PI, alors que c'est une espèce très fréquente dans les systèmes céréaliers, qui justifie chez les agriculteurs de nombreux traitements spécifiques, et qui est en outre presque partout au moins partiellement résistant à une ou plusieurs familles d'herbicide (Délye et al., 2007).

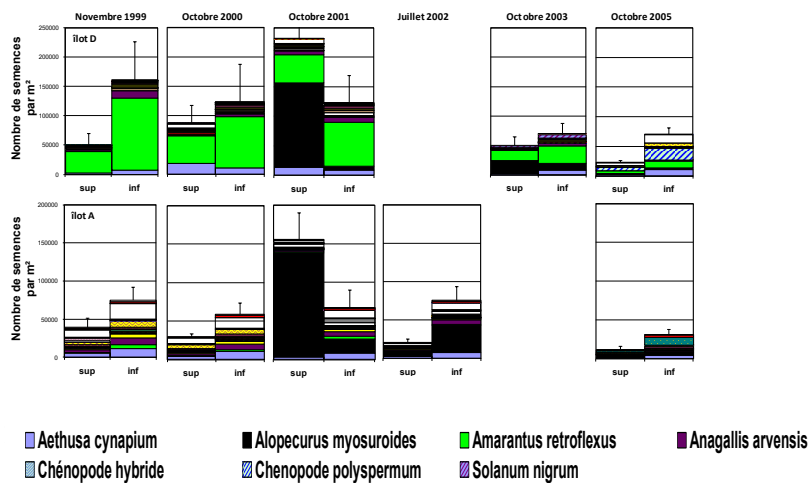


Figure 2 : Evolution du stock semencier des deux parcelles du système de Protection Intégrée typique avec désherbage mécanique, caractérisé par un IFT herbicide moyen de 0,7, trois fois plus faible que l'IFT du système de référence. A une date donnée, les deux barres de l'histogramme correspondent aux semences des horizons superficiel (sup : 0-10 cm) et profond (inf : 10-30 cm), respectivement.

Des risques de contournements par la sélection d'espèces plus adaptées

L'évaluation des systèmes de PI en termes de maîtrise de la flore adventice est donc plutôt positive. Il faut pourtant signaler des exceptions, qui concernent des espèces qui tendent à se développer depuis quelques années (i.e. plus de 6 ans après le début de l'essai). Il s'agit d'une part du chardon, espèce vivace très peu affectée par les techniques de PI, d'autre part d'espèces annuelles à germination très échelonnée de fin d'automne au début du printemps, y compris en période hivernale froide, comme le gaillet grateron et la véronique à feuilles de lierre. Ces dernières espèces ne sont pas affectées par la règle de semis tardif des céréales d'automne, qui ne permet pas d'esquiver leur période de levée préférentielle, alors que cette règle est très efficace pour esquiver les levées d'autres espèces automnales. Dans l'état actuel des connaissances, ces espèces pourraient donc justifier quelques traitements herbicides spécifiques. Dans les systèmes sans herbicide de l'essai de Dijon-Epoisses, la montée de ces espèces a nécessité de prendre une décision qui n'était pas prévue au départ, c'est-à-dire la modification de la succession culturale par l'introduction d'une prairie temporaire (luzerne) qui devrait contribuer à revenir à l'état malherbologique initial.

L'évaluation des systèmes agricoles requiert une diversification des compétences d'agronome

Le premier niveau d'évaluation des prototypes de systèmes de culture concerne évidemment la dépendance aux pesticides et la maîtrise technique des bioagresseurs. Mais ces critères d'évaluation ne suffisent pas pour que les enseignements des expérimentations contribuent pleinement au débat sur l'évolution de l'agriculture vers des systèmes plus durables. Il est important d'évaluer autant que possible les conséquences des systèmes testés pour tous les enjeux concernés par l'agriculture, qu'ils soient agronomiques, environnementaux, économiques ou sociaux, d'autant plus que la mobilisation combinée de nombreux leviers agronomiques de gestion de la flore adventice se traduit par une reconception profonde du système, concernant même la nature des productions (cf. par exemple l'introduction de prairies temporaires dans la succession).

Evaluation des impacts environnementaux des prototypes de systèmes innovants

Dans le cas de la PI contre la flore adventice, il est par exemple particulièrement important de s'intéresser aux effets sur le bilan énergétique et sur le stockage de carbone du sol. En effet, ces systèmes tendent à intensifier le travail du sol, que ce soit par le labour, par les passages d'outils superficiels à vocation de faux-semis, ou pour le désherbage mécanique. Ces passages d'outils

consomment de l'énergie, et pourraient en outre favoriser la minéralisation de la matière organique et favoriser la décroissance de la teneur en carbone du sol. Les systèmes testés à Dijon-Epoisses ont été évalués par Analyse de Cycle de Vie (ACV, méthode SALCA, collaboration avec l'ART-Zürich, Deytieux et al., en préparation). Ces écobilans ont révélé que la PI tend à augmenter les émissions de CO₂ liées au travail du sol, mais que cette augmentation est plus que compensée par la baisse des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) liées à la fertilisation azotée, baisse permise d'une part par des objectifs de rendement inférieurs au potentiel pédoclimatique, d'autre part par la diversification des successions de culture avec introduction de légumineuses. Le coût énergétique de la fabrication des pesticides et les émissions de GES associées sont négligeables devant les autres sources d'émissions.

Evaluation socio-économique

Par ailleurs, l'avenir des systèmes fondés sur ces principes de PI dépend beaucoup de leur rentabilité économique, de leur faisabilité technique en termes d'équipement et d'organisation du travail à l'échelle de l'exploitation agricole, et de l'organisation des filières et des marchés. Des évaluations des conséquences qu'aurait sur le fonctionnement d'exploitations agricoles réelles la mise en œuvre des systèmes testés en station expérimentale ont été réalisées. Ces évaluations ont été faites par simulation (modèle Equip'Agro, collaboration Chambre Régionale d'Agriculture de Bourgogne), pour un exemple de structure de ferme typique de la région Bourgogne. Elles ont montré que le nombre d'heures travaillées par hectare n'est pas plus important en PI qu'en système de référence, contrairement aux craintes a priori, et que la diversification des assolements contribue à mieux étaler les chantiers sur l'année. Les travaux du sol répétés à l'automne pour la réalisation de faux-semis, et les passages de désherbage mécanique, s'insèrent bien dans le calendrier de travail de l'exploitation simulée. En revanche, la règle des semis tardifs des céréales pour l'esquive des levées d'adventices d'automne génère des tensions organisationnelles potentielles, en raison des conditions climatiques humides de fin Octobre-début Novembre en Bourgogne, qui diminuent rapidement le nombre de jours favorables pour la réalisation des semis.

Les modèles de simulation du fonctionnement des exploitations ont aussi pour intérêt qu'ils permettent d'estimer finement les coûts de mécanisation, qui dépendent entre autres du niveau d'usage des équipements, ce qui contribue à l'analyse des performances économiques des systèmes agricoles. Dans le cas des systèmes de PI testés à Dijon, les niveaux de charges sont réduits par rapport au système de référence, grâce aux réductions de charges liées aux traitements phytosanitaires (importantes, en moyenne réduction de 150 Euros/ha), et ce malgré la légère augmentation des coûts de mécanisation. Malheureusement, dans le cas bien particulier des systèmes conduits à Dijon-Epoisses, les baisses de charges ne semblent pas pouvoir compenser complètement les baisses de produit brut², liées à la fois au rendement souvent plus faibles en PI, et à la productivité à la fois faible et variable des cultures de diversification introduites dans la succession, en particulier des cultures de printemps. On montre que la moindre rentabilité économique de ces systèmes est entièrement due à ces cultures de diversification. Pour le blé par exemple, culture de base de tous les systèmes comparés, le coût de production exprimé en Euros par tonne produite, indicateur de la performance économique de cette production, n'est pas affecté par la PI, indiquant que la baisse des charges liées à cette culture (mais en partie permise par la rotation diversifiée) peut compenser les rendements plus faibles, au moins dans certains contextes de prix. Ces résultats soulignent l'importance de la recherche-développement sur les cultures de diversification, sur l'amélioration de leurs performances techniques, et sur l'optimisation des assolements et rotations en fonction du potentiel pédoclimatique.

Les systèmes de Protection Intégrés peuvent-ils être adoptés par la profession agricole ?

Les résultats de l'évaluation des prototypes de systèmes de culture testés à Dijon-Epoisses, sur une gamme de critères rendant compte des divers enjeux de la durabilité, montrent donc que la réduction de l'usage d'herbicides est possible dans des systèmes céréaliers tout en maintenant une maîtrise satisfaisante des adventices à long terme, mais également que l'adoption des principes de PI

² Les calculs économiques présentés succinctement ici ont été réalisés dans un contexte de prix de l'année 2006

par la profession agricole risque d'être entravée par des difficultés bien réelles. L'évaluation semble en effet mettre en évidence des antagonismes entre critères qu'il faudra confirmer en élargissant ce type d'évaluation à une gamme de systèmes plus large, dans le cadre de réseaux nationaux. Un autre verrou à lever pour l'adoption à grande échelle de la PI est la faible disponibilité en variétés adaptées, combinant des critères de qualité technologique avec des critères de compétitivité et de résistance aux maladies (nécessaire pour supporter les fortes densités de semis assurant la fermeture rapide du couvert). Le manque de variétés adaptées est probablement la résultante d'une sélection variétale orientée essentiellement pour un contexte de production intensive à forte dépendance en pesticides. Il est donc urgent de réorienter les programmes de sélection au bénéfice d'une agriculture valorisant mieux les régulations biologiques.

Les systèmes de PI testés se rapprochent de systèmes d'agriculture biologique pour les leviers de gestion de la flore mobilisés (rotation diversifiée, faux-semis, variétés compétitives, désherbage mécanique). Ils s'en différencient évidemment par l'usage occasionnel d'herbicide, et par le fait que le marché ne permet pas de valoriser économiquement les bénéfices environnementaux générés par ces systèmes. Ils s'en différencie également par la fertilisation minérale, qui permet d'atteindre des niveaux de rendement supérieurs aux niveaux de rendement généralement obtenus en agriculture biologique, ce qui peut être un critère d'évaluation important dans un contexte de production agricole insuffisante à l'échelle de la planète. Les différences de modalités de fertilisation ont également probablement un impact sur la flore adventice, car certaines espèces nitrophiles (comme le gaillet grateron par exemple) semblent favorisées dans les prototypes de PI, et justifient parfois des traitements herbicides spécifiques, alors que ces espèces sont généralement peu problématiques dans les systèmes biologiques.

Des activités de conception-évaluation très diversifiées

Ce témoignage illustre également la diversité des activités de l'agronome impliquée dans une démarche de conception-évaluation de systèmes agricoles. Il doit tout d'abord bien connaître le système biotechnique afin d'être en mesure de concevoir des systèmes cohérents. Il doit égale-

ment pouvoir mobiliser des outils produits par les sciences de l'environnement, comme par exemple les ACV, et par les sciences de gestion, comme les modèles de simulation du fonctionnement organisationnel de l'exploitation agricole. De façon surprenante, il existe semble-t-il peu d'économistes travaillant sur les questions de micro-économie et de gestion à l'échelle de l'exploitation agricole, qui ne semblent pas générer des questions de recherche suffisamment originales pour les spécialistes. C'est donc les agronomes qui doivent prendre en charge ces aspects de l'évaluation, élargissant ainsi d'autant leur champ d'activité, qui mérite bien le qualificatif de 'généraliste'. Pour autant, des collaborations interdisciplinaires restent absolument nécessaires pour traiter pleinement des transitions des systèmes agricoles vers des systèmes plus durables, en abordant par exemple des questions de sociologie pour identifier les déterminants sociaux des dynamiques de changement de pratiques, ou des questions d'économie et d'organisation des filières, car des modifications lourdes des filières d'approvisionnement, de collecte et de valorisation de la production agricole seront nécessaires, ne serait-ce que pour accompagner la diversification des productions qui est au cœur de toute démarche de Protection Intégrée.

Remerciements : La conduite de l'expérimentation de longue durée est un travail d'équipe dont tous les membres doivent être remerciés, en particulier Marie-Hélène Bernicot, Pascal Farcy, Philippe Chamois, Dominique Meunier, Florence Strbik, François Dugué, et beaucoup d'autres... L'évaluation des prototypes a donné lieu à de multiples collaborations, dont Gabriel Pardo, Violaine Deytieux, Thomas Nemecek, André Leseigneur... L'expérimentation est financée en partie par l'ANR (projets ADVHERB, GEDUPIC) et par la région Bourgogne.

Bibliographie

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

Butault, J., Dedryver, C., Gary, C., Guichard, L., Jacquet, F., Meynard, J., Nicot, P., Pitrat, M., Reau, R., Sauphanor, B., Savini, I., Volay, T., 2010. Ecophyto R&D. Quelles voies pour réduire l'usage des pesticides ? Synthèse du rapport d'étude, INRA éditeur (France), 90 p.

- Colbach, N., Kurstjens, D., Munier-Jolain, N.M., Dulout-Dalbiès, A., Doré, T., 2010. Assessing non-chemical weeding strategies through a modelling approach applied to blackgrass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) dynamics. *European Journal of Agronomy*, 32, 205-218.
- Croll, B., 1991. Pesticides in surface waters and groundwaters. *Water and Environ. J.*, 5, 389-395.
- Délye, C., Menchari, Y., Guillemin, J., Matějček, A., Michel, S., Camilleri, C., Chauvel, B., 2007. Status of blackgrass (*Alopecurus myosuroides*) resistance to acetyl-coenzyme a carboxylase inhibitors in France. *Weed Research*, 47, 95-105.
- Fried, G., Reboud, X., Bibard, V., Delos, M., Bombarde, M., 2006. Mauvaises herbes du maïs. 25 ans d'évolution dans les grandes régions de production. *Perspectives Agricoles*, 320, 68-74.
- Gillings, S., Newson, S. E., Noble, D. G., Vickery, J. A., 2005. Winter availability of cereal stubbles attracts declining farmland birds and positively influences breeding population trends. *Proceedings of the Royal Society Biological Sciences*, 272, 733-739.
- Haarstad, K. Ludvigsen, G., 2007. Ten years of pesticide monitoring in Norwegian ground water. *Ground Water Monitoring & Remediation*, 27, 75-89.
- Robinson, R. A., Sutherland, W. J., 2002. Post-war changes in arable farming and biodiversity in Great Britain. *Journal of Applied Ecology*, 39, 157-176.
- Rolland B., Bouchard C., Loyce C., Meynard J.M., Guyomard H., Lonnet P., Doussinault G., 2003. Des itinéraires techniques à bas niveaux d'intrants pour des variétés rustiques de blé tendre : une alternative pour concilier économie et environnement. *Courrier de l'Environnement de l'INRA*, 49, 47-62.