

concilier performances environnementales et rendements élevés : premières évaluations de systèmes de culture innovants sous contraintes

Caroline Colnenne-David^a, Gilles Grandeau^a, Thierry Doré^b

^aINRA, UMR 211 INRA/AgroParisTech, France

^bAgroParisTech, UMR 211 INRA/AgroParisTech, France

caroline.colnenne@grignon.inra.fr, grandeau@grignon.inra.fr, thierry.dore@agroparistech.fr

Depuis plusieurs décennies, les nouveaux objectifs environnementaux et de production assignés à l'agriculture ont obligé les agronomes à élargir leurs champs d'études aux questions environnementales, comme l'attestent les travaux relatifs à la fertilisation minérale et l'augmentation des teneurs en nitrate dans les aquifères au cours des années 1980. Cette évolution vers une adaptation des systèmes de culture conduit à considérer le champ cultivé comme un agro écosystème dans lequel les techniques culturales modifient les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des milieux. Les agronomes travaillent alors sur la conception de systèmes de culture dont les pratiques agricoles sont combinées pour remplir des objectifs tenant compte des composantes de l'agro-écologie. La méthode de prototypage y est fréquemment utilisée.

C'est dans ce contexte que notre étude a été initiée. La raréfaction des ressources fossiles et la flambée des cours du pétrole, les conclusions du Grenelle de l'Environnement sur l'emploi des pesticides, les orientations prises par le GIEC¹ au sujet des risques liés au changement climatique sont les enjeux actuels auxquels la recherche se doit de répondre. Pour atteindre les objectifs fixés en termes d'usage des produits phytosanitaires (-50% à l'horizon 2018 « si possible », voir <http://agriculture.gouv.fr/ecophyto-2018,510>), ou d'émissions de gaz à effet de serre (diminution « significative » attendue pour 2015-2020 définie selon le Protocole de Kyoto, 1997), sans dégra-

1. GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC en anglais).

der les autres composantes environnementales et en maintenant le potentiel de production, il est indispensable de proposer de nouvelles manières de produire. Le travail à l'échelle du système de culture, entendu comme une succession de cultures et les itinéraires techniques de chaque culture, prend tout son sens, car la satisfaction d'objectifs environnementaux ne peut être évaluée que dans la durée.

Le projet « Systèmes de culture innovants sous contraintes » (SIC)² vise à concevoir par modélisation et expertise des systèmes de culture innovants (Loyce et Wery, 2006 ; Reau et Doré, 2008), à les évaluer à l'aide de différents outils/modèles d'évaluation multicritère (*i.e.* méthode de prototypage), puis à les mettre à l'épreuve dans le cadre d'une expérimentation de longue durée. Les objectifs retenus pour la construction de ces systèmes sont triples :

- satisfaire une contrainte majeure (soit réduire la consommation d'énergie fossile, soit s'interdire l'utilisation de pesticides, soit limiter les émissions de gaz à effet de serre) ;
- respecter des objectifs environnementaux multiples (diminuer les impacts des produits phytosanitaires sur le milieu, limiter les risques de pertes de nitrates vers les nappes souterraines, *etc.*) ;
- atteindre des niveaux de production élevés.

L'originalité du programme tient dans la définition et la quantification *a priori* des contraintes et des objectifs environnementaux, assignés aux systèmes de culture innovants et à leur combinaison à des objectifs de production élevée. De plus, cette étude se distingue par la mise en œuvre d'un dispositif expérimental où les effets de ces systèmes sont analysés à la fois sur les variables de production et sur les composantes biologiques du milieu (identification, dénombrement et évolution au cours du temps des différentes espèces de vers de terre et d'arthropodes par exemple).

L'objectif de cet article est de décrire les systèmes de culture innovants conçus et de présenter les principaux résultats obtenus au cours des trois premières campagnes de mise à l'épreuve expérimentale (2008-2009, 2009-2010 et 2010-2011).

La construction de systèmes de culture par objectifs

Quatre systèmes différant par leurs objectifs ont été définis en fonction de ceux-ci :

- le système « productif à hautes performances environnementales » (PHPE). Les objectifs de ce système sont de satisfaire un ensemble de critères environnementaux quantifiés et d'atteindre, dans ce cadre, une production élevée. Dans notre projet les objectifs environnementaux sont satisfaits lorsque tous les critères agro-environnementaux de la méthode Indigo[®] (encadré ci-contre) atteignent une note au moins égale à 7 (Bockstaller et Girardin, 2000) ;
- le système « énergie moins » (NRJ). Tout en respectant les objectifs environnementaux déclinés dans le système PHPE ci-dessus, la consommation d'énergie fossile doit être réduite de moitié ;
- le système « sans pesticide » (PEST). Au respect des objectifs environnementaux du système PHPE s'ajoute l'interdiction d'utiliser tout traitement phytosanitaire (produits chimiques de synthèse et produits autorisés en agriculture biologique) ;
- le système « gaz à effet de serre moins » (GES). Les objectifs environnementaux du système PHPE étant respectés, les émissions de gaz à effet de serre doivent être réduites de moitié par rapport à celui-ci.

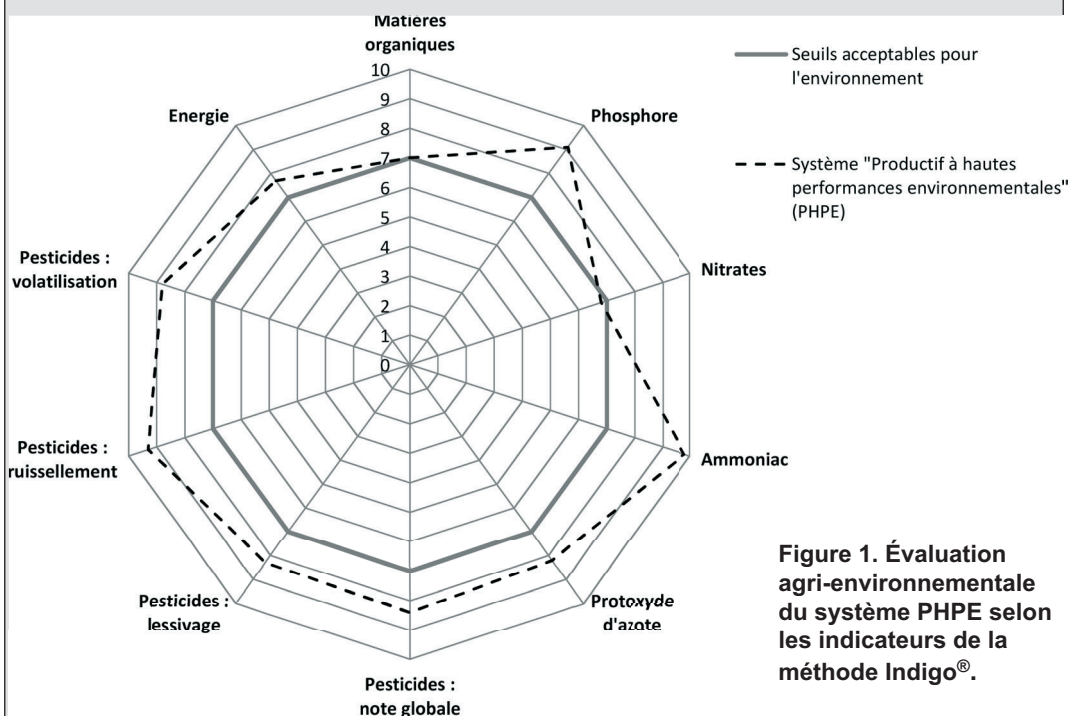
Pour ces trois derniers systèmes, NRJ, PEST et GES, les niveaux de production seront aussi élevés que possible compte tenu des contraintes et objectifs environnementaux assignés.

La question de la rentabilité économique des systèmes, non prise en compte directement lors de la conception, apparaît néanmoins de manière indirecte dans la formalisation de l'objectif de production. Dans le contexte des connaissances scientifiques actuelles, nous faisons l'hypothèse que la satisfaction de contraintes environnementales ambitieuses s'accompagne d'une baisse des niveaux

2. Ce programme de recherche est conduit par l'UMR Agronomie INRA-AgroParisTech en partenariat avec la ferme d'AgroParisTech et l'unité expérimentale Grandes cultures (EGÉR) INRA de Versailles-Grignon.

La méthode Indigo

Indigo® est une méthode scientifique d'évaluation de l'impact environnemental des pratiques agricoles sur l'air, le sol, l'eau de surface et l'eau souterraine. Elle a été mise au point par l'INRA de Colmar et de Nancy en collaboration avec l'Association pour la relance agronomique en Alsace (ARAA). Couplé à une application informatique, Indigo® est un outil de diagnostic et d'aide à la décision destiné aux techniciens, conseillers, ingénieurs agronomes et agriculteurs qui souhaitent améliorer leurs pratiques pour les rendre plus durables. Grâce à une série de dix indicateurs, spécifiques de chaque type de culture, cette méthode d'évaluation permet de faire un diagnostic des pratiques agricoles à partir de leurs risques potentiels de pollution de l'air, du sol, de l'eau de surface et de l'eau souterraine. Les indicateurs d'Indigo® recensent l'utilisation de l'azote, du phosphore, des produits phytosanitaires, de l'eau, de la matière organique, des ressources énergétiques non renouvelables, la gestion de la rotation des cultures et l'assolement (fig.1). Traités par un logiciel, ils présentent l'avantage d'être simples à utiliser et faciles à interpréter. L'utilisateur introduit des données techniques puis lance le calcul. Le résultat est une valeur comprise entre 0 et 10. En dessous de 7, les pratiques concernées présentent un risque potentiel pour l'environnement. Au-dessus, le risque est considéré comme acceptable. Une version de l'outil Indigo® est disponible depuis fin 2004 et accessible sur internet. Il est utilisé par les agriculteurs, les chambres d'agriculture (par exemple dans l'Yonne), les instituts de développement (ARAA en Alsace, Agrotransfert en Picardie, Agriculture Canada) et les organismes de recherche (INRA à Dijon, Versailles-Grignon, Toulouse et Montpellier ; CIRAD à Montpellier et en Guadeloupe).



de production. Dans ces conditions, c'est-à-dire la satisfaction d'objectifs environnementaux, le niveau maximal de rentabilité économique sera vraisemblablement atteint lorsque les niveaux de production correspondront aux potentiels permis par la réduction des apports d'intrants.

Cette étude est menée pour un système de grandes cultures dans le contexte pédoclimatique du Bassin parisien. Le choix a été de limiter au minimum les cultures à vocation fourragère et d'implanter des cultures ayant actuellement des débouchés dans la région où est menée l'évaluation expérimentale des systèmes, soit les Yvelines (78), ou des cultures pour lesquelles des débouchés pourraient exister à court terme.

Conception et évaluation *ex ante* des systèmes de culture

Méthodologie

La conception des systèmes de culture a suivi une méthode fondée sur le prototypage (Loyce et Wery, 2006). Comme le montre la figure 2, à partir de contraintes et objectifs spécifiés (1), des systèmes de culture candidats virtuels sont proposés (2). Des experts de chambres d'agriculture d'Ile-de-France, d'instituts techniques (Arvalis, CETIOM, ITL, ITC)³ et divers chercheurs de l'INRA de Dijon et de Versailles-Grignon ont fourni des informations précieuses pour les construire. Le choix des successions culturales et le raisonnement des itinéraires techniques ont mobilisé différentes stratégies agronomiques déclinées en autant de leviers techniques, comme suggéré dans Debaeke *et al.* (2009).

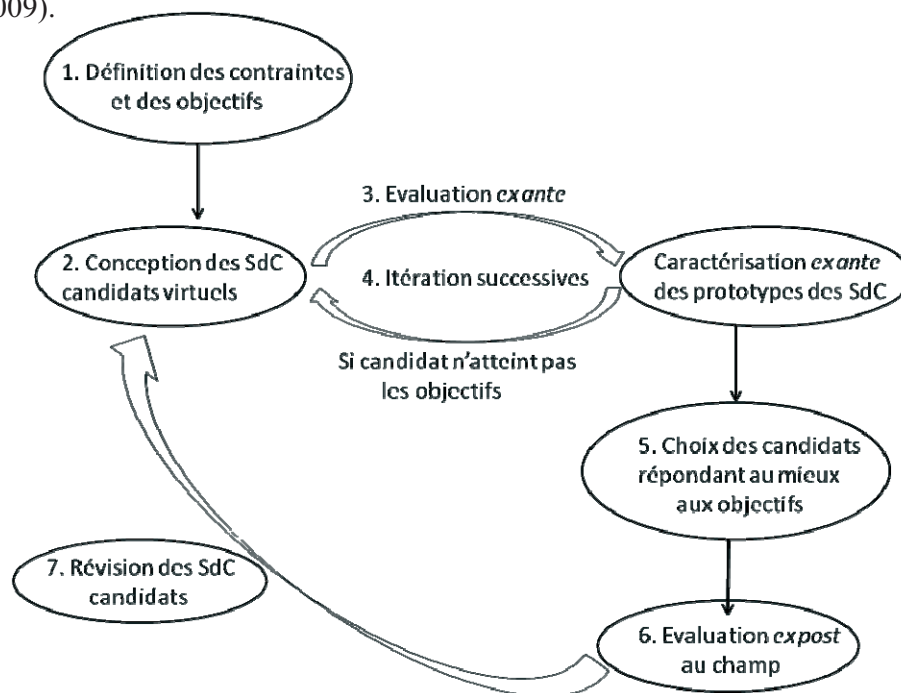


Figure 2. Conception et évaluation de systèmes de culture innovants (SdC). Méthode de prototypage : optimisation des systèmes candidats par évaluation *ex ante*.

L'évaluation *ex ante* (3) consiste à quantifier les impacts environnementaux et les performances (i.e. niveau de contrainte atteint, production obtenue) des systèmes de culture qui seront retenus dans le cadre de l'évaluation expérimentale. Elle fait appel à divers outils, modèles et/ou dire d'experts (Jeuffroy *et al.*, 2008).

3. CETIOM : Centre technique interprofessionnel des oléagineux métropolitain ; ITL : Institut technique du lin ; ITC : Institut technique du chanvre.

Si les systèmes conçus ne permettent pas *a priori* d'atteindre les objectifs environnementaux et de satisfaire les niveaux de contrainte définis, ils sont modifiés (changement des termes de la succession et/ou des itinéraires techniques) puis de nouveau évalués et aboutissent à des systèmes de culture candidats. Ce travail de conception-évaluation est mené de façon itérative (voir fig. 2, 4) jusqu'à l'obtention *a priori* de résultats satisfaisants. Pour chaque système de culture, le prototype candidat répondant *a priori* au mieux aux contraintes et objectifs assignés initialement (5) est évalué *a posteriori* dans une expérimentation de longue durée (6). Si les contraintes et objectifs ne sont pas atteints, les systèmes de culture candidats peuvent être révisés (7).

Dans le cadre du programme SIC, l'évaluation *ex ante* a mobilisé différents outils. D'une part, Indigo® (Bockstaller *et al.*, 2000) a été utilisé pour évaluer les performances en termes de limitation des pollutions de l'air, du sol, de l'eau de surface et de l'eau souterraine. Pour chaque système, les valeurs de six indicateurs agro-environnementaux sont calculées à l'échelle de la succession culturale. La note 0 correspond à un niveau « inacceptable » en matière d'effet sur l'environnement, la note 10 à l'absence d'effet et la valeur 7 au minimum acceptable (Bockstaller *et al.*, 2000). D'autre part, l'outil SIMEOS basé sur le modèle AMG (Andriulo *et al.*, 1999) et le modèle Roth C26.3 (Coleman and Jenkinson, 1999) ont été mobilisés pour simuler l'évolution du stock de carbone dans les sols et évaluer à long terme les effets des pratiques culturales sur l'état organique des sols. Enfin, les émissions de gaz à effet de serre et les consommations d'énergie fossile ont été calculées à partir des données issues du guide *GES'TIM* (2010) et à l'aide des coefficients du GIEC (Gregorich *et al.*, 2005)⁴.

Les systèmes de culture candidats

Les systèmes de culture retenus pour l'évaluation expérimentale au champ sont le résultat de nombreux cycles d'itérations d'évaluation *ex ante*. Les successions culturales et quelques exemples de leviers techniques utilisés lors de la construction des systèmes sont présentés dans les tableaux 1 et 2.

Dans le système « productif à hautes performances environnementales » (PHPE), pour augmenter la biodiversité et limiter l'utilisation des pesticides, une rotation plus longue que celles couramment observées en Ile-de-France a été retenue (cinq cultures au lieu de trois fréquemment). L'implantation d'une légumineuse permet de réduire les apports d'engrais minéraux. Le semis systématique d'une interculture avant la culture de printemps, déjà obligatoire dans les zones dites « vulnérables », vise à réduire la lixiviation des nitrates.

Tableau 1. Successions culturales des quatre systèmes de culture candidats retenus pour l'expérimentation au champ.

Systèmes de culture	Successions culturales
Productif à hautes performances environnementales (PHPE)	féverole d'hiver – blé tendre d'hiver – colza d'hiver – blé tendre d'hiver – (moutarde) – orge de printemps
Energie moins (NRJ)	féverole d'hiver – blé tendre d'hiver – lin oléagineux d'hiver – association blé tendre d'hiver et trèfle blanc – (trèfle blanc) – avoine de printemps
Sans pesticide (PEST)	(IC*) – féverole de printemps – blé tendre d'hiver – (IC*) – chanvre – triticales – (IC*) – maïs – blé tendre d'hiver
Gaz à effet de serre moins (GES)	(IC*) – féverole de printemps – colza d'hiver – (repousses + IC*) – blé tendre d'hiver – (IC*) – orge d'hiver – (IC*) – maïs – triticales

*IC : interculture dont la nature n'est pas définie à ce jour. Entre parenthèses les cultures intermédiaires identifiées.

4. *GES'TIM : Guide méthodologique pour l'estimation des impacts des activités agricoles sur l'effet de serre.*

Tableau 2. Quelques exemples de leviers techniques utilisés lors de la construction des systèmes de culture candidats.

Objectifs agronomiques	Leviers techniques
Limiter les pertes d'azote par lessivage	Implantation systématique de cultures intermédiaires avant les espèces semées au printemps Interdiction de fertiliser les cultures lors des périodes où les risques de lixiviation des nitrates sont élevés (automne, hiver)
Réduire par des techniques ciblées la pression de certains bioagresseurs	Raisonner les dates de semis des cultures d'automne Choisir des variétés résistantes voire des mélanges variétaux Diminuer les densités de semis Réduire la fertilisation azotée
Diminuer les apports d'engrais dont la fabrication est coûteuse en énergie fossile	Introduire dans la succession culturale des espèces à forte efficacité d'utilisation de l'azote et des légumineuses
Diminuer la pression d'adventices	Planter successivement des espèces dont la date de semis varie : – année 1 : semis d'automne précoce – année 2 : semis de printemps précoce – année 3 : semis d'automne tardif – année 4 : semis de printemps tardif
Maximiser la concurrence vis-à-vis des adventices	Semer très précocement le colza d'hiver Pour le blé tendre d'hiver : – choisir des variétés à croissance végétative rapide – semer avec un faible écartement
Supprimer les opérations culturales coûteuses en énergie	Remplacer le labour par des semis directs, plus précoces en automne, plus tardifs au printemps

Pour être représentative du Bassin parisien, la succession culturale comporte plusieurs espèces de céréales à paille. La pratique d'un seul labour à l'échelle de la succession (donc sur cinq ans, avant l'implantation de l'orge de printemps) permet de réduire la consommation d'énergie fossile. Les choix des variétés, des dates et densités de semis spécifiques pour chacune des espèces sont raisonnés de manière à réduire la pression de bio-agresseurs et donc les apports de produits phytosanitaires. Les objectifs de production ont été définis selon les potentialités pédo-climatiques du site expérimental et pour des techniques culturales définies *a priori*. Ils s'appuient sur des connaissances acquises localement ou à l'échelle régionale.

Dans le système « énergie moins » (NRJ), la réduction de la fertilisation azotée permise par l'implantation de nombreuses légumineuses (culture principale, associée à une autre espèce ou espèce d'interculture) et d'espèces à forte efficacité d'utilisation de l'azote (avoine, lin) contribue à la réduction de la consommation d'énergie⁵. Le labour est totalement supprimé et les objectifs de production diminués de 20% par rapport au système PHPE. Comme pour la modalité PHPE, les espèces de céréales à paille sont bien représentées dans la succession et le choix de variétés, de dates et densités de semis spécifiques conduisent *a priori* à réduire les apports de produits phytosanitaires.

5. Les fertilisants azotés minéraux sont principalement produits par le procédé Haber-Bosch. Selon ce mode de fabrication la transformation de l'azote de l'air en ammoniac, permettant de produire de grandes quantités de fertilisants à un coût peu élevé, nécessite un apport d'énergie élevé.

Dans le système « sans pesticide » (PEST), la succession culturale de six ans comporte une alternance systématique d'espèces d'hiver et de printemps. L'implantation d'une luzerne durant deux années successives sera autorisée si la population d'adventices n'est pas maîtrisée. Des couverts d'interculture d'espèces variées sont implantés systématiquement avant les cultures de printemps pour réduire la lixiviation des nitrates. La stratégie de désherbage mécanique (labour, binage) concilie la gestion des bio-agresseurs et une consommation d'énergie fossile pas trop élevée (*i.e.* compatible avec les objectifs agro-environnementaux). Les principes déclinés pour choisir les variétés et les dates et densités de semis de la modalité PHPE sont appliqués. La fertilisation minérale est gérée selon les objectifs de production. Ils sont inférieurs à ceux du traitement PHPE mais plus élevés que ceux de l'agriculture biologique où l'utilisation de fertilisants chimiques de synthèse est interdite.

Dans le « système gaz à effet de serre moins » (GES), deux stratégies sont suivies simultanément : tout d'abord augmenter le stock de carbone dans les sols, ensuite réduire les émissions de protoxyde d'azote. Les espèces retenues sont celles dont les résidus permettent un stockage de carbone maximal dans les sols. L'implantation systématique d'un couvert entre deux cultures successives répond aussi à ce même objectif. Pour être représentatif du Bassin parisien, le système comporte de nombreuses espèces de céréales à paille. La succession d'une durée de six ans permet de satisfaire les critères de biodiversité et environnementaux. Pour augmenter les potentialités de stockage de carbone dans le sol (*i.e.* obtenir des quantités de résidus de culture importantes⁶), les objectifs de production sont élevés et le labour supprimé. Afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre, particulièrement celles de protoxyde d'azote, des légumineuses sont implantées en culture principale et en interculture. Un décompactage sera autorisé si l'émission de protoxyde d'azote s'amplifiait en raison d'un tassement progressif du sol. La fertilisation azotée est gérée de façon à réduire les émissions indirectes (utilisation de formes d'engrais spécifiques) et directes (utilisation d'inhibiteurs de nitrification, planning d'épandage adapté aux conditions climatiques).

Chaque système de culture est piloté par un jeu de règles de décision dont la construction fait partie intégrante du travail de conception. Dans le cadre de notre étude, il ne s'agit pas de définir des opérations culturales fixes, conditionnées par les objectifs scientifiques ou contraintes expérimentales, mais des objectifs globaux atteints par l'application de stratégies agronomiques pouvant évoluer selon les conditions du milieu ou les avancées technologiques. Par exemple, les traitements phytosanitaires seront gérés au regard de seuils d'intervention spécifiques à chaque couple espèce-bioagresseur ; les choix variétaux pourront évoluer au cours du temps en fonction de la disponibilité ou de la mise en marché de nouvelles variétés dont les caractéristiques répondent aux objectifs définis.

Évaluation des performances *a priori*

L'évaluation *ex ante* pour la satisfaction des contraintes n'a de sens que pour les systèmes NRJ et GES. En effet, la modalité PHPE n'est soumise à aucune contrainte et dans le système PEST elle est satisfaite de manière « automatique ».

Contrainte énergétique

Selon les résultats d'Indigo[®], la consommation d'énergie fossile du système de culture NRJ est réduite de 49% par rapport au système PHPE lorsque les résultats sont exprimés en MJ/ha. La diminution importante de la production (environ -20% pour la plupart des espèces) dans le système NRJ s'accompagne d'une moindre performance énergétique lorsque les consommations sont exprimées par quintal de production (réduction égale à 26%). Toutefois, respecter la contrainte (*i.e.* réduire de moitié la consommation d'énergie fossile) est d'autant plus difficile que le système PHPE a lui-même été construit avec des objectifs énergétiques contraignants.

6. Le CO₂ atmosphérique est fixé dans les plantes par les mécanismes de la photosynthèse. La biomasse aérienne et racinaire des plantes, restituée aux sols, via leur incorporation sous forme de matières organiques, participe à l'augmentation du stockage de carbone.

Contrainte GES

Le stock de carbone dans les sols, simulé avec l'outil SIMEOS⁷, évolue positivement pour les systèmes PHPE et GES. Pour des sols dont la teneur initiale en matières organiques est égale à 1,6% (teneur courante dans la région Île-de-France), le stockage est 15% supérieur pour le système GES. Il correspond à un différentiel d'environ 22 tonnes équivalent carbone/ha entre les deux systèmes, 50 ans après implantation. Compte tenu du niveau de production plus élevé du système GES nécessitant de recourir à davantage d'engrais azotés malgré l'introduction des légumineuses, les émissions de gaz à effet de serre (hors stockage de carbone dans les sols) ne sont réduites que de 13% par rapport au système PHPE. Après bilan global, les performances du système GES sont de 26% supérieures au système PHPE après 50 années d'existence.

Performances environnementales des systèmes de culture

Pour les quatre systèmes de culture, les valeurs des six indicateurs agri-environnementaux, chacune étant au moins égale à 7, attestent *a priori* des performances environnementales des systèmes de culture candidats, à l'exception du critère « matières organiques » des sols (I-MO) pour le système PEST (I-MO égale à 5,7). Cette valeur s'explique d'une part par la pratique régulière du labour nécessaire à la maîtrise des adventices, mais favorisant les mécanismes de minéralisation de la matière organique des sols, et d'autre part par les niveaux faibles des objectifs de production limitant les quantités de résidus restituées aux sols.

Évaluation expérimentale et résultats

L'évaluation expérimentale, ou *ex post*, vise à évaluer de manière expérimentale sur une longue durée un seul prototype pour chacun des quatre systèmes. Cette évaluation, initiée en 2008, est envisagée pour une durée d'au moins 10 ans. La parcelle expérimentale, d'une surface de plus de six hectares, est située sur des sols limoneux, très homogènes et profonds (profondeur supérieure à 1,80 m) de la ferme d'AgroParisTech à Grignon (78).

Pour réaliser l'ensemble des mesures, la surface élémentaire des parcelles est de 4100m² et le dispositif comporte trois répétitions pour chaque système. Compte tenu de la forte homogénéité du sol, la variabilité interannuelle du climat a été privilégiée. Chaque année, chaque système de culture est représenté par une culture différente de la succession dans chacun des blocs (fig. 3).

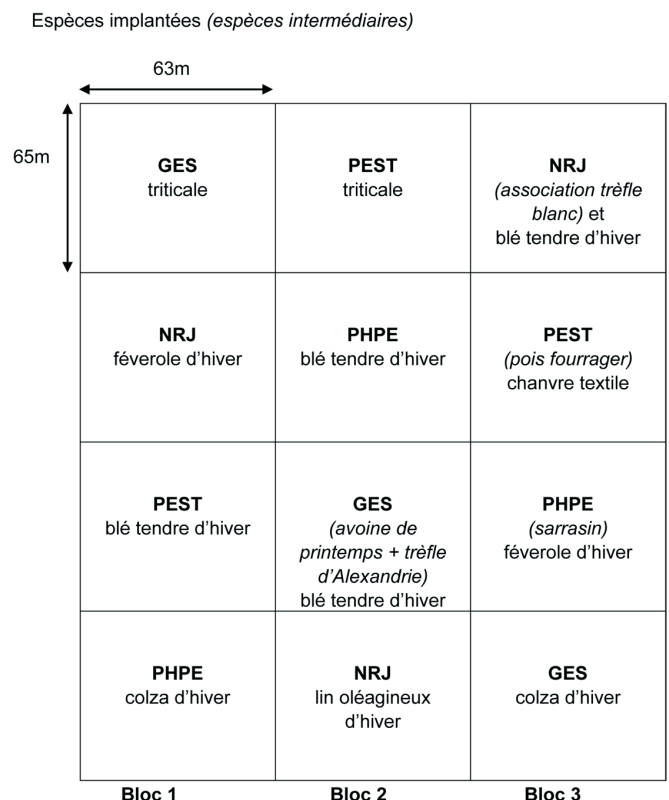


Figure 3. Dispositif expérimental de la campagne 2011-2012.

7. Outil fondé sur le bilan humique AMG de l'INRA de Laon.

Dans ce dispositif, des mesures nombreuses visent en premier lieu à évaluer la capacité des systèmes de culture à satisfaire les contraintes, les objectifs environnementaux et les niveaux de production assignés. Des diagnostics agronomiques appropriés permettent également de comprendre les raisons de ces performances. Les évolutions à moyen/long terme des caractéristiques physiques des sols du champ cultivé (état structural, *etc.*), de leurs caractéristiques chimiques (teneurs en éléments minéraux, en pesticides et en matières organiques) et biologiques (communautés de vers de terre et d'arthropodes, microflore, peuplement d'adventices, *etc.*) sont caractérisées et analysées pour évaluer les conséquences des systèmes expérimentés sur l'évolution des milieux. Une analyse multicritère, à l'aide de l'outil MASC⁸, sera conduite en parallèle.

Après trois années d'expérimentation, nous présentons ci-dessous les résultats sur les consommations d'énergie fossile, les émissions de gaz à effet de serre, les évaluations agri-environnementales et les productions. Les valeurs proviennent de chaque parcelle élémentaire (soit douze données par année). Les résultats correspondent aux valeurs cumulées moyennées sur trois ans, à l'exception des rendements décrits de façon annuelle. Ils sont systématiquement comparés aux résultats de l'évaluation *ex ante* pour les espèces similaires, puisqu'aucun des systèmes n'a à ce jour réalisé l'ensemble de son cycle de succession.

La consommation d'énergie fossile

Quels que soient les systèmes de culture, les consommations d'énergie fossile *ex post* sont égales ou inférieures aux résultats *ex ante* (fig. 4). Les objectifs de consommation d'énergie fixés *a priori* sont donc atteints à l'exception de l'une des répétitions du système NRJ (augmentation de 0,8% par rapport aux prévisions). Les opérations culturales supplémentaires par rapport aux prévisions (labour et déchaumage) pratiquées en 2009 pour diminuer la pression de repousses d'orge permet de comprendre ce surplus de consommation. Sur l'ensemble des parcelles, la consommation d'énergie est réduite en moyenne de 17,3% par rapport aux attendus, avec les valeurs extrêmes de + 0,8% et -45,3% pour une des répétitions du système NRJ et une répétition du système GES respectivement.

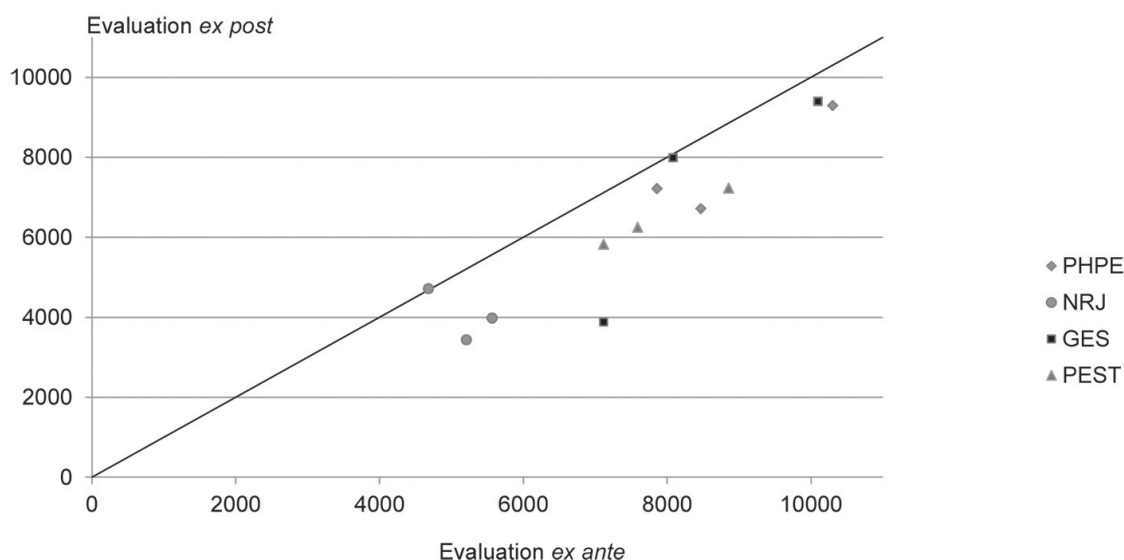


Figure 4. Consommation d'énergie fossile (MJ/ha) : comparaison des résultats des évaluations *ex ante* et *ex post*, pour les quatre systèmes de culture (trois répétitions) et selon GES'TIM (2010). Valeurs cumulées moyennées sur les trois campagnes expérimentales 2008-2009, 2009-2010 et 2010-2011.

8. La méthode MASC (Sadock *et al.*, 2009) est un outil permettant d'évaluer de façon qualitative la durabilité des systèmes de culture.

Cette diminution s'explique par une fertilisation minérale (azote, phosphore potassium) plus faible en 2009 et 2010 et sur de nombreuses parcelles que celle estimée *ex ante*. Au cours de ces trois années, la réduction de la consommation d'énergie fossile *ex post* du système NRJ (moyenne des trois répétitions) est de 49% par rapport au système PHPE, alors que la prévision *ex ante* était de 42%.

Les émissions de gaz à effet de serre (fig. 5)

Pour la plupart des systèmes, les émissions de gaz à effet de serre *ex post* sont égales ou inférieures aux résultats attendus à l'exception de deux parcelles : l'une correspond à l'une des répétitions du système NRJ avec une augmentation de 19,3% par rapport aux prévisions, et l'autre au système GES avec un accroissement de 9,6%. Les opérations culturales supplémentaires (labour et déchaumage) évoquées ci-dessus pour le premier cas, et la préparation du lit de semences de la culture de maïs non prévue sur la parcelle du système GES en 2010-2011 expliquent ces augmentations. Sur l'ensemble des parcelles, la réduction moyenne des émissions est de 22,5% par rapport aux prévisions *ex ante*, avec les valeurs extrêmes de +19,3% et -69,2% pour une des répétitions du système NRJ et une répétition du système GES respectivement. Ces performances sont expliquées par une fertilisation minérale réduite (cf. ci-dessus). Au cours de ces trois années, la diminution des émissions de gaz à effet de serre, hors stockage de carbone, du système GES (moyenne des trois répétitions) par rapport à PHPE est de 6%. Cette faible performance s'explique : (i) par les bons résultats du système PHPE dans nos conditions expérimentales (la réduction des émissions du système PHPE *ex post* est de 12% par rapport aux évaluations *ex ante*), et (ii) par le fait que les triplets de culture présentes sur les répétitions du système GES au cours de ces trois campagnes ne permettaient pas de réduire les émissions (l'évaluation *ex ante* prévoyait une augmentation de 4% des émissions du système GES par rapport à PHPE dans ces conditions). Les diminutions des émissions des systèmes NRJ et PEST (moyenne des trois répétitions) par rapport à PHPE sont respectivement de 62% et 43% en *ex post*. L'utilisation réduite de la fertilisation minérale, particulièrement l'azote en lien avec des niveaux de production plus faibles, expliquent ces bonnes performances. Il est nécessaire d'attendre les résultats des mesures du stock de carbone dans les sols (prévues en 2013) pour réaliser le bilan global des émissions de gaz à effet de serre des systèmes de culture.

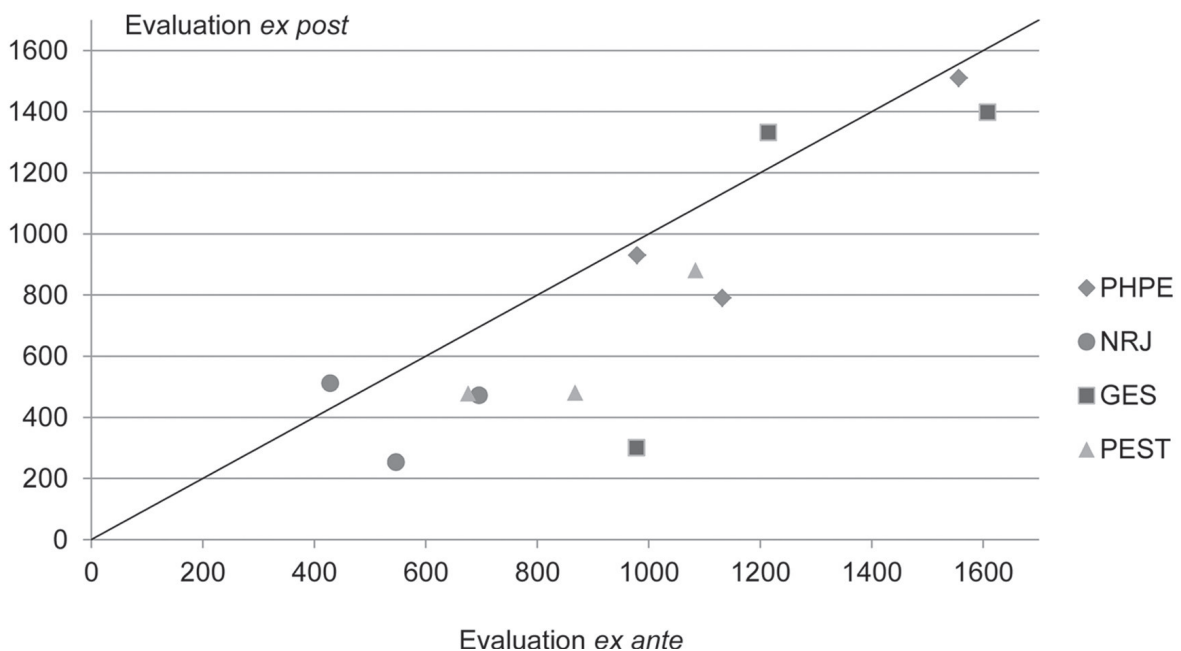


Figure 5. Émissions de gaz à effet de serre (kg équivalent CO₂/ha). Comparaison des résultats des évaluations *ex ante* et *ex post*, pour les quatre systèmes de culture (trois répétitions) à partir des données issues du guide GES'TIM (2010). Valeurs cumulées moyennées sur les trois campagnes expérimentales 2008-2009, 2009-2010 et 2010-2011.

Les performances environnementales (fig. 6)

Calculé à l'échelle de la rotation, l'indicateur « biodiversité des cultures » prend des valeurs supérieures à 7 pour l'ensemble des systèmes de culture. Les résultats *ex post* sont identiques aux prévisions puisque les espèces implantées correspondent à celles définies initialement.

La plupart des valeurs des indicateurs agri-environnementaux, soit les indicateurs « énergie » (I-En), « phytosanitaires » (I-Phy), « matières organiques des sols » (I-MO), « phosphore » (I-P) et « azote » (I-N), égales ou supérieures à 7, attestent de l'absence d'effet négatif des systèmes de culture sur l'environnement. Pour l'indicateur I-P, deux valeurs *ex post* sont inférieures à 7. Ces résultats sont liés à une fertilisation phosphorique excédentaire par rapport aux prévisions sur la culture de colza en 2009 sur une des répétitions du système PHPE et une du système GES. Pour l'indicateur I-N, les réponses semblent les moins satisfaisantes. La présence de légumineuses sur toutes les parcelles au cours de ces trois années, induisant des risques élevés de lixiviation des nitrates, explique ces valeurs inférieures à l'optimum. Toutefois, sur l'ensemble des données, les valeurs *ex post* les plus faibles au moins égales à 6 garantissent un faible impact des systèmes de culture sur cette caractéristique environnementale.

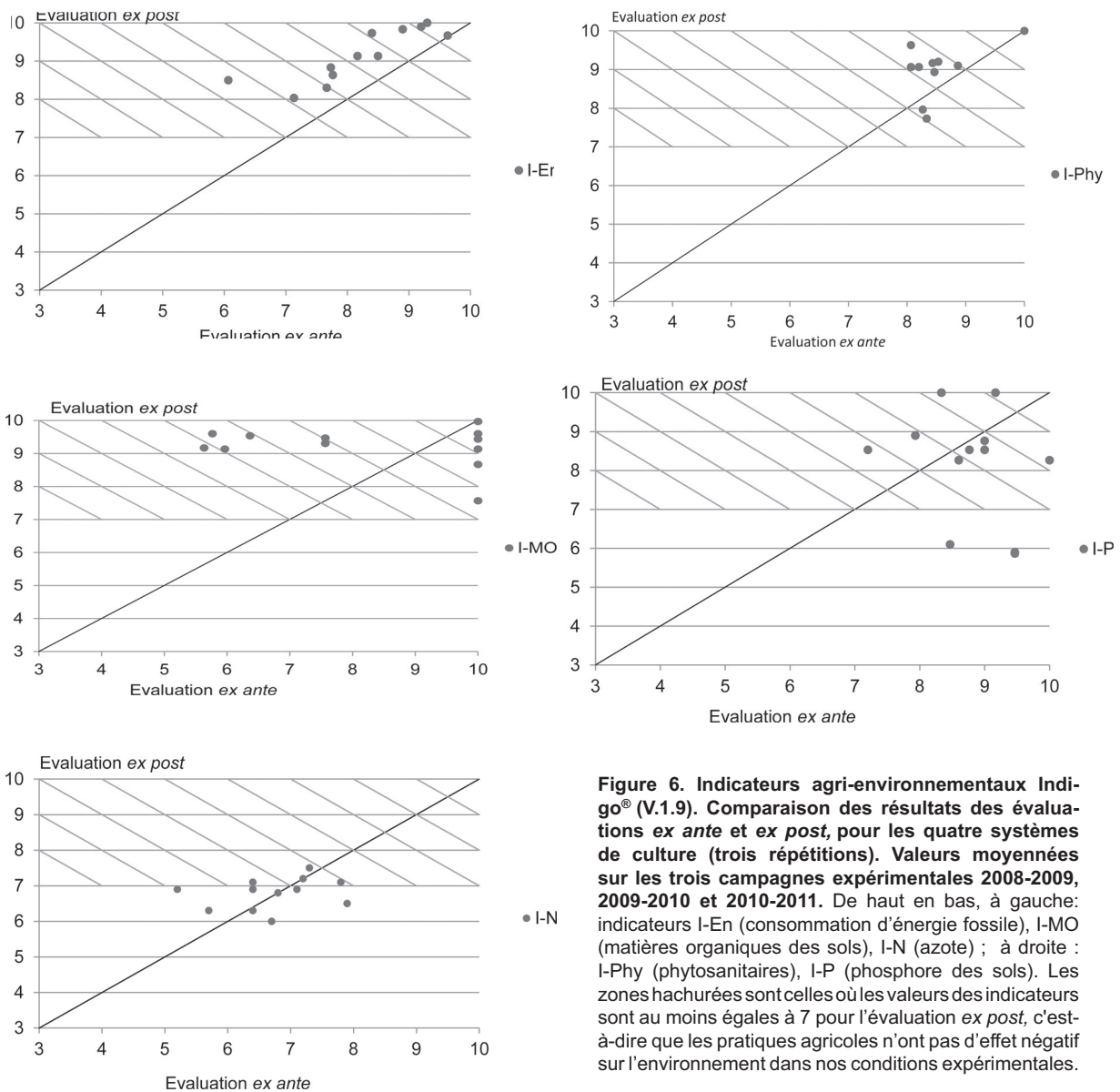


Figure 6. Indicateurs agri-environnementaux Indigo® (V.1.9). Comparaison des résultats des évaluations *ex ante* et *ex post*, pour les quatre systèmes de culture (trois répétitions). Valeurs moyennées sur les trois campagnes expérimentales 2008-2009, 2009-2010 et 2010-2011. De haut en bas, à gauche: indicateurs I-En (consommation d'énergie fossile), I-MO (matières organiques des sols), I-N (azote) ; à droite : I-Phy (phytosanitaires), I-P (phosphore des sols). Les zones hachurées sont celles où les valeurs des indicateurs sont au moins égales à 7 pour l'évaluation *ex post*, c'est-à-dire que les pratiques agricoles n'ont pas d'effet négatif sur l'environnement dans nos conditions expérimentales.

Tableau 3. Rendements : résultats exprimés en pourcentage des objectifs de production définis *ex ante*, pour, respectivement, les trois campagnes 2008-2009, 2009-2010 et 2010-2011 (.../.../...).

Espèces	Système PHEP		Système GES		Système NRJ		Système PEST	
	Objectifs (t/ha)	Cam-pagnes	Objectifs (t/ha)	Cam-pagnes	Objectifs (t/ha)	Cam-pagnes	Objectifs (t/ha)	Cam-pagnes
Avoine de printemps					3,8	+ / ... / +		
Blé tendre d'hiver	7,9	OK /... / +	7,9	+ / + / ...	6,3	... / + + (*) / +	5,5	+ / + + (*) / +
Orge d'hiver			7,2	... / OK / -				
Orge de printemps	6,2	+ / ... / -						
Triticale			7,1	... / + / ...			5,0	... / ... / ...
Maïs			8,1	- / ... / +			6,5	- / ... / ...
Colza d'hiver	3,1	+ / + / ...	3,1	+ / ... / ...				
Lin oléagineux d'hiver					1,8	OK / ... / -		
Féverole d'hiver	3,4	... / OK / -	3,4		3,4	+ / - / ...		
Féverole de printemps			4,7	... / ... / -			3,5	+ / OK / -
Chanvre							8	... / ... / OK

(+) : supérieur à 5% par rapport aux objectifs ; (OK) : compris entre +5% et -5% ; (-) : inférieur à 5% ;

(...) espèce non implantée pendant les trois campagnes.

(*) En 2010, deux répétitions des systèmes NRJ et PEST ont été implantées en blé tendre d'hiver.

Les rendements

Quels que soient les systèmes de culture, les rendements des cultures *ex post* sont régulièrement supérieurs aux objectifs définis *ex ante* (tabl.3). La richesse des sols en matières organiques de la parcelle expérimentale⁹ et les froids hivernaux intenses réduisant les pressions de maladies expliquent ces bonnes performances. Cependant, les objectifs de production n'ont pas été atteints toutes les années pour toutes les espèces implantées. En 2010, la forte pression de ravageurs (corvidés) lors de la levée, la concurrence importante des adventices au cours des premières étapes du développement et le stress hydrique en été sont les raisons pour lesquelles le rendement du maïs du système PEST n'a été que de 47q/ha au lieu des 61q/ha escomptés. En 2011, les conditions de stress hydrique marqué au printemps, avec environ 80 mm de pluviométrie cumulée du 1^{er} mars au 10 juin (soit la moitié de la moyenne saisonnière), expliquent les niveaux de production des orges et du lin inférieurs aux attentes. Au cours de cette même année, les pressions de pucerons noirs très importantes au printemps ont fortement diminué les rendements des féveroles de printemps (système PEST : 3q/ha ; système GES : 7q/ha).

Conclusion

La récente implantation de l'essai (2008) ne permet évidemment pas à ce jour de tirer des conclusions sur les performances et les stratégies agronomiques mises en œuvre dans chacun des systèmes de culture innovants. Toutefois, après trois années d'expérimentation, les premières tendances se dessinent :

- les contraintes « énergétiques » et « pesticides » sont à ce jour satisfaites ;
- les analyses du stock de carbone dans les sols sont nécessaires pour évaluer les performances *ex post* du système GES, *i.e.* la satisfaction de la contrainte gaz à effet de serre ;

9. Les parcelles expérimentales, situées sur la ferme de polyculture élevage AgroParisTech, ont fait l'objet d'apports réguliers d'effluents d'élevage avant l'initiation de l'essai.

- les objectifs environnementaux affichés sont d'une manière générale atteints ;
- les objectifs de production correspondent régulièrement aux prévisions.

Ces résultats très encourageants permettent déjà de valider et/ou corriger les objectifs de production assignés aux différentes cultures des systèmes innovants. Par exemple, les niveaux de rendement attendus des espèces de céréales à paille sont régulièrement atteints quel que soit le système de culture, alors que l'objectif de production de la culture de féverole de printemps a été réduit de 10 quintaux par hectare pour rendre compte de l'effet des ravageurs en absence de protection chimique dans le système PEST.

Certaines règles de décision ont pu également être validées et/ou corrigées. Le calcul de la fertilisation azotée selon la méthode du bilan, associée aux mesures de reliquats azotés dans les sols et de quantités d'azote absorbées par les plantes à la sortie de l'hiver, permet d'atteindre les objectifs environnementaux. *A contrario*, la fertilisation phosphorique sur la culture du colza a été réduite pour les respecter (*i.e.* atteindre une valeur de l'indicateur « phosphore » au moins égale à 7). Dans le domaine du travail du sol, les résidus des cultures sont dorénavant enfouis superficiellement pour permettre la levée du maïs dans le système GES.

Enfin, ces résultats ont permis de définir plus précisément le choix des cultures intermédiaires et les objectifs qui leur sont assignés : outre les rôles bien connus des légumineuses comme engrais verts et des crucifères comme pièges à nitrates, le tournesol ou le radis fourrager sont implantés pour améliorer la structure des sols en l'absence de travail du sol dans le système GES ; la navette et la moutarde sont utilisées pour augmenter la diversité des espèces implantées dans le système PEST dont la succession culturale ne comprend aucune crucifère ; la lentille et le nyger (*Guizotia abyssinica*), espèces gélives, sont implantés pour réduire les apports de pesticides nécessaires à la destruction de cultures intermédiaires en l'absence de travail du sol dans le système GES ; le pois est semé pour étouffer les adventices dans le système PEST, *etc.*

Ainsi s'ouvrent de nouvelles questions de recherche dans lesquelles les relations entre agriculture et environnement sont prises en compte. Elles sont complexes car elles font appel à des disciplines scientifiques de plus en plus diversifiées (la biologie, la chimie, l'écologie avec les études de mécanismes, processus et régulations biologiques dans les agro-écosystèmes, *etc.*), et cela à des échelles temporelles et spatiales plus étendues. Nos premiers résultats montrent que satisfaire des critères environnementaux ambitieux et atteindre des niveaux de production élevée ne sont pas des objectifs antagonistes. Toutefois, répondre à cette question nécessite de collecter les résultats sur la totalité d'une rotation, soit cinq à six années selon les systèmes, les successions étant composées de cinq à six espèces. Les nombreuses mesures décrivant les composantes biologiques du milieu nous permettront aussi de mesurer les effets de ces systèmes innovants sur la composition de la flore des adventices, des populations de vers de terre et d'arthropodes, ou encore sur la vie microbienne des sols. Synthétisés de façon pluriannuelle, ces acquis pourront être étendus aux régions de grandes cultures du nord de l'Europe, et après simulations, être extrapolés à des zones géographiques plus vastes.

Loin d'être isolé, ce dispositif expérimental, intégré dans de nombreux réseaux de recherche comme le Réseau mixte technologique « Systèmes de culture innovants » (<http://www.systemesdecultureinnovants.org/>) et Resopest (« Risques Eaux souterraines Pesticides») en France, dans le programme européen PURE (<http://www.pure-ipm.eu/project>) et le programme de la Global Research Alliance (<http://globalresearchalliance.org/>) à l'échelle internationale, montre l'implication de nombreux chercheurs dans ce domaine et leur intérêt pour les enjeux environnementaux ■

Références bibliographiques

- Andriulo A., Mary B., Guérif J., 1999. Modelling soil carbon dynamic with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie*, 19, 365-379.
- Bockstaller C., Girardin P., 2000. Agro-ecological indicators. Instruments to assess sustainability in agriculture. In : Härdtlein M., Kaltschmitt M., Lewandoski L., Wurl H., *Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft im Spannungsfeld zwischen Ökologie, Ökonomie und Sozialwissenschaft*. Eric Schmidt Verlag, Stuttgart, 69-83.
- Coleman K., Jenkinson D.S., 1999. *A model for the turn over of carbon in soil. Model description and windows users guide*. IACR, Rothamsted Harpenden Herts, AL5 2JQ, p 47.
- Debaeke P., Munier-Jolain N., Bertrand M., Guichard L., Nolot J.M., Faloya V., Saulas P., 2009. Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems : methodology and cases study. A review. *Agronomy and sustainable development*, 29, 73-86.
- Ministère de l'Agriculture, de l'alimentation, de la pêche, de la ruralité et de l'aménagement du territoire, 2010. *Guide méthodologique pour l'estimation des impacts des activités agricoles sur l'effet de serre (GES'TIM)*, réf. 0933103, 156 p.
- Gregorich E.G., Rochette P., VandenBygaart A.J., Angers D.A., 2005. Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada. *Soil and tillage Research*, 83, 53-72.
- Juffroy M.H., Bergez J.E., David C., Flénet F., Gate P., Loyce C., Maupas F., Meynard J.M., Reau R., Surleau-Chambenoit C., 2008. Utilisation des modèles pour l'aide à la conception et à l'évaluation d'innovations techniques en production végétale : bilan et perspectives. In : Reau R., Doré T. (Eds.), *Des systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?* Educagri, 109-128.
- Loyce C., Wery J., 2006. Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture. *L'agronomie aujourd'hui*. Quae, Paris, 77-95.
- Reau R., Doré T., 2008. *Des systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?* Educagri, Dijon.
- Sadok W., Angevin F., Bergez J.E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Reau R., Messean A., Doré T., 2009. MASC: a qualitative multi-attribute decision model for *ex ante* assessment of the sustainability of cropping systems. *Agronomy for sustainable development*, 29, 447-461.