

Evaluation multicritère de systèmes de culture zéro-pesticides en grande culture et polyculture-élevage (Réseau Rés0Pest)

Cellier V.¹, Berthier A.¹, Colnenne-David C.², Darras S.³, Deytieux V.¹, Savoie A.⁴, Aubertot J.-N.⁵

Avec la collaboration de : Audebert G.¹⁰, Blériot O.³, Cocandeau P.⁴, Devaux R.³, Ebel J.-M.⁷, Gavaland A.⁸, Grandeau G.², Le Roy P.¹¹, Montagnier C.⁶, Montegano B.⁷, Robert F.⁹, Rouet P.⁸, Rousval S.⁹, Tison G.⁸, Valdrini J.-M.¹¹

¹ INRA - UE Domaine d'Epoisses, F-21110 Bretenière

² INRA - UMR Agronomie, INRA AgroParisTech, BP 01, F-78850 Thiverval-Grignon

³ INRA - UE GCIE-Picardie, Estrées-Mons, F-80203 Peronne

⁴ INRA - UE Physiologie Animale de l'Orfrasière, F-37380 Nouzilly

⁵ INRA - UMR 1248 AGIR, chemin de Borde-Rouge, BP52627, F-31326 Castanet-Tolosan Cedex

⁶ INRA – UE GCVG, route de Saint-Cyr, F-78026 Versailles Cedex

⁷ INRA – UE DIASCOPE, Domaine de Melgueil, F-34130 Mauguio

⁸ INRA – UE Domaine expérimental d'Auzeville, chemin de Borde-Rouge, BP52627, F-31326 Castanet-Tolosan Cedex

⁹ EPL Toulouse-Auzeville, BP 72647, 2 route de Narbonne, F-31326 Castanet-Tolosan Cedex

¹⁰ INRA - UE FERLUS, 150 route le Chêne, F-86600 Lusignan

¹¹ INRA - Domaine de la Motte au Vicomte, BP 35327, F-35653 Le Rheu Cedex

Correspondance : vincent.cellier@inra.fr

Résumé

Dans le cadre du plan Ecophyto, un réseau d'expérimentations système a été mis en place en France métropolitaine, avec pour objectif de concevoir et d'évaluer des systèmes de culture sans pesticides. Les systèmes ont été mis en place dans des situations variées (différents climats, types de sol, filières) et concernent les grandes cultures et la polyculture élevage. Une évaluation multicritère (Criter 5.4, MASC 2.0) a été conduite sur la période 2013-2017. On n'observe pas de dégradation de la capacité productive à long-terme, ni de la qualité sanitaire des récoltes et la contribution au développement durable des huit systèmes testés est considérée « faible à moyenne » pour la polyculture élevage et « moyenne à élevée » à « élevée » pour la grande culture. La durabilité environnementale est « élevée » à « très élevée » pour tous les systèmes et c'est la durabilité sociale qui est la moins favorable en raison d'une « très faible » contribution à l'emploi. La rentabilité montre de fortes différences entre systèmes, allant de « très faible » à « très élevée » mais aucune valorisation économique particulière des récoltes produites sans pesticides n'a été appliquée. Les résultats présentés débouchent sur de nouvelles perspectives pour une réduction significative de l'utilisation des pesticides en France.

Mots-clés : Réseau d'expérimentations, Expérimentation système, Agroécologie, Conception, Evaluation, Régulation biologique

Abstract: multi-criteria assessment for sustainability of pesticide-free cropping systems in arable crop and multicrop-livestock farming (Rés0Pest network)

In the framework of Ecophyto, a network of eight system experiments was set up in order to design and assess pesticide-free cropping systems in the main French agricultural areas. The tested cropping systems cover a wide range of production situations (different climates, soils and agricultural sectors) for arable crop and multicrop-livestock farming. A multi-criteria analysis (Criter 5.4 and MASC 2.0) was conducted to assess the overall sustainability of the eight tested cropping systems over the 2013-2017

period. We observe neither degradation of the long-term productive capacity nor degradation of the sanitary quality of the harvests. The overall sustainability of the eight cropping systems was assessed as "low to medium" for the multicrop-livestock systems, and "medium to high" to "high" for the arable cropping systems. The environmental sustainability is "high" to "very-high" for all systems and the less favourable sustainability is the social one because of a "very low" contribution to employment. The profitability shows strong differences between systems, going from "very low" to "very high" but no particular economic valuation of the harvests produced without pesticides was applied. The presented results draw new perspectives towards a major reduction of pesticide use in France.

Keywords: Trial network, System experiment, Agroecology, Cropping system design, Cropping system assessment, Biological regulations

1. Contexte et enjeux

Les impacts des pratiques agricoles, et notamment de l'utilisation des pesticides sur la biodiversité et la santé humaine, sont aujourd'hui mieux identifiés et quantifiés (Baldi et al., 2013 ; Aubertot et al., 2005). Ainsi, les systèmes de culture actuels très dépendants structurellement des pesticides sont aujourd'hui remis en question, notamment au niveau des bassins d'alimentation de captages en eau potable (Schrack et al., 2009 ; Repères IFEN, 2016). Un des enjeux majeurs du monde agricole consiste donc à modifier et à adapter les systèmes de culture afin de réduire leur dépendance aux pesticides, tout en préservant leur rentabilité économique pour l'agriculteur ainsi que la qualité des productions.

La Directive 2009/128/EC du parlement Européen et du conseil de l'Union Européenne du 21 octobre 2009 a instauré un cadre d'action communautaire pour parvenir à une utilisation des pesticides compatible avec le développement durable. La France, comme les autres états membres, a mis en place un plan national de réduction de l'utilisation des pesticides. Ce plan, baptisé Ecophyto, lancé en 2008, a pour objectif de diminuer le recours aux produits phytosanitaires tout en maintenant un niveau de production et de qualité élevé. L'étude Ecophyto R&D (Butault et al., 2010) a montré qu'une baisse de 50 % de l'utilisation de produits phytosanitaires n'était pas atteignable sans une reconception des systèmes de culture.

Dans ce contexte, il apparaît nécessaire que la recherche étudie la faisabilité technique et les performances de systèmes de culture n'ayant pas recours à l'utilisation des pesticides afin d'identifier les points de blocage techniques et de proposer des solutions pour une large gamme de systèmes de culture (agricultures conventionnelle, biologique, intégrée). La construction de systèmes de culture ayant un objectif zéro-pesticides est souvent une étape dans la conception de systèmes de culture innovants à faible utilisation de produits phytosanitaires. Cependant, ces systèmes sont rarement mis en œuvre sur le terrain et il existe actuellement peu de références quant à leurs performances (Reau et al., 2012 ; Colnenne-David et al., 2017).

Il faut notamment quantifier les performances de ces systèmes vis-à-vis d'autres composantes de la durabilité, non liées à l'utilisation des pesticides (consommation en énergie fossile, charge de travail, qualité des récoltes...). L'expérimentation et l'évaluation multicritère sont nécessaires pour disposer d'une vue d'ensemble de la durabilité des systèmes mis en œuvre et identifier des pistes d'amélioration.

Dans le cadre d'une réflexion sur les moyens alternatifs permettant la transition vers un développement durable, l'idée de concevoir et d'expérimenter des systèmes de culture sans pesticides a vu le jour (Colnenne-David et Doré, 2015) et une étude préalable à la mise en place d'un réseau expérimental d'essais zéro-pesticides a été financée par le GIS Grande Culture à Haute Performance Economique et Environnementale (GIS GC-HP2E) en 2010-2011. Suite à cette étude, le réseau expérimental Rés0Pest

a été mis en place en 2012 sous l'impulsion du réseau Protection Intégrée des Cultures INRA/CIRAD¹. Il est affilié au RMT Systèmes de Culture innovants² et a reçu un soutien financier de la part du réseau DEPHY EXPE de 2012 à 2017.

2. Rés0Pest : un réseau expérimental de systèmes de culture zéro-pesticides en grande culture et polyculture-élevage.

Le réseau expérimental Rés0Pest a permis de mettre en place en France métropolitaine, huit essais de longue durée à l'échelle de la parcelle agricole, sur des systèmes de culture sans utilisation de pesticides et construits selon les principes de la protection intégrée des cultures afin de limiter les pressions biotiques. Le niveau de rupture étant très important par rapport aux pratiques agricoles conventionnelles, ces expérimentations sont positionnées en stations expérimentales.

2.1 Finalités et objectifs

La finalité de Rés0Pest est de produire des connaissances mobilisables pour la conception de systèmes de culture innovants économes en pesticides. Pour cela, il s'est fixé deux objectifs :

- Concevoir, expérimenter et évaluer les performances agronomiques, économiques, environnementales et sociales de systèmes de culture sans pesticides ;
- Analyser le fonctionnement de ces agroécosystèmes particuliers, notamment les dynamiques des populations et les régulations biologiques au sein de la biocénose.

2.2 L'approche système de culture

La démarche d'expérimentation systèmes de culture a été formalisée selon 5 grandes étapes (Debaeke et al., 2009, cité dans Deytieux et al., 2012) :

1. Définition d'un jeu d'objectifs et de contraintes assignés au système de culture à expérimenter ;
2. Choix de la stratégie agronomique permettant de répondre à ce jeu d'objectifs et de contraintes ;
3. Formulation d'un ensemble cohérent de règles de décision permettant la mise en œuvre pratique et opérationnelle du système de culture ;
4. Application au champ du système de culture et de son jeu de règles de décision ;
5. Evaluation et amélioration de la stratégie agronomique du système de culture et de ses règles de décision.

Si elle s'énonce simplement, cette démarche est complexe à mettre en œuvre en raison de la multiplicité des objectifs recherchés et de possibles antagonismes entre eux (par exemple utilisation des techniques de désherbage mécanique à la place des herbicides et réduction de la consommation d'énergie fossile).

D'autre part, c'est une démarche qui nécessite d'être expérimentée sur le long terme afin de pouvoir mettre en évidence les effets cumulatifs du système de culture (par exemple développement de pathologies spécifiques après quelques années d'expérimentation, suite à l'augmentation de la quantité d'inoculum dans le sol).

2.3 Un cahier des charges commun

Les systèmes de culture ont été conçus par chaque site sur la base d'un cahier des charges commun dont les objectifs et contraintes sont résumés dans le Tableau 1.

¹ www.inra.fr/reseau-pic

² www.systemesdecultureinnovants.org

Tableau 1 : Objectifs et contraintes communs assignés aux systèmes de culture du réseau expérimental RésOPest lors de la conception.

Contraintes	Objectifs
<ul style="list-style-type: none"> • Ne pas recourir aux pesticides (seuls sont autorisés les produits répertoriés en tant que moyens biologiques ou Stimulateurs des Défenses Naturelles, dans l'Index Phytosanitaire ACTA) ; • Maintenir les cultures représentatives de la région dans la succession culturale. 	<p>Sous ces contraintes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Maximiser une production de qualité ; • Limiter les impacts environnementaux autres que ceux liés aux pesticides ; • Maximiser le revenu de l'agriculteur.
<p>RésOPest se démarque de l'agriculture biologique par la possibilité d'utiliser des engrais de synthèse et, par conséquent, la possibilité de viser des rendements plus élevés (Berry et al., 2002 ; Seufert et al., 2012, thèse de Camille Amossé, 2013, p. 3).</p>	

Au niveau du dispositif, les situations expérimentales présentent des contraintes communes :

- Plusieurs termes de la rotation (au minimum 50 %) implantés chaque année pour permettre une meilleure prise en compte de la variabilité inter annuelle ;
- Une surface minimale recommandée pour chaque parcelle élémentaire : 0,5 ha (largeur minimale recommandée : 48 m ; longueur minimale : 100 m) ;
- Une durée minimale d'expérimentation équivalente à la durée de la rotation (avec un minimum de 6 ans dans le cas de rotations courtes), pour étudier les effets cumulatifs de la succession ;
- Pas de système de référence expérimenté, les performances du système de culture étant comparées à des données régionales et à celles du domaine expérimental ;
- Des aménagements paysagers obligatoires (au minimum bande enherbée³).

2.4 Ateliers de co-conception

Au démarrage du réseau, chaque site a organisé des ateliers de co-conception des systèmes de culture à partir du jeu d'objectifs et de contraintes présenté ci-dessus. La méthode mobilisée est celle formalisée dans le guide pratique pour la conception de systèmes de culture plus économes en produits phytosanitaires (couramment nommé guide STEPHY⁴). Ces ateliers ont regroupé les expérimentateurs, des agriculteurs, des chercheurs et des représentants des instituts techniques agricoles. Ils ont été animés par des membres actifs du RMT Systèmes de culture innovants. Les animateurs de RésOPest ont participé à plusieurs ateliers de travail pour fédérer le réseau et s'assurer que les principes agronomiques de protection intégrée mobilisés et expérimentés étaient cohérents au sein du réseau. Les personnes participant à la conduite de l'essai étaient bien sûr partie prenante de ces ateliers.

2.5 Utiliser les principes de la protection intégrée des cultures

Les systèmes de culture ont été construits en combinant des techniques alternatives, éprouvées ou suggérées par la bibliographie et les connaissances actuelles sur les bioagresseurs, en vue de réduire leur risque de développement et de favoriser la mise en place de régulations biologiques.

Ces combinaisons ont été conçues à l'échelle de chaque culture mais aussi à celle de la succession culturale dans son ensemble (Figure 1) et en intégrant les abords des parcelles.

³ Le site de Grignon a débuté son expérimentation en 2008 et ne comporte pas d'aménagements paysagers.

⁴ Disponible au téléchargement : <http://agriculture.gouv.fr/file/guidestephyoptpdf>

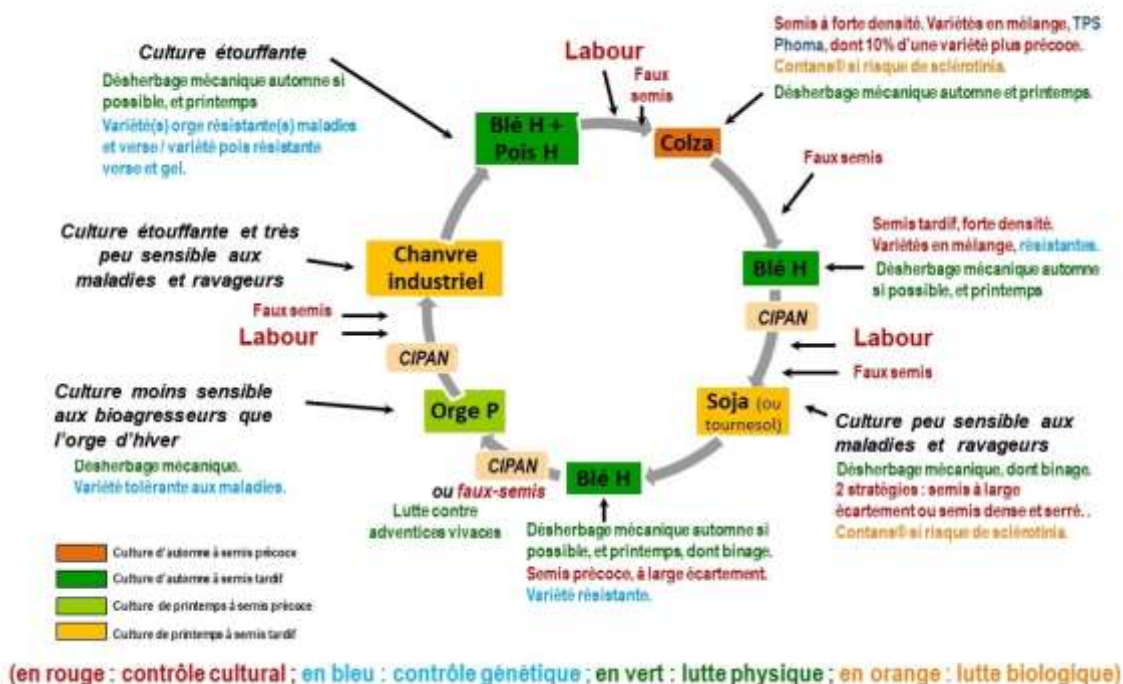


Figure 1 : Exemple de combinaison de techniques sur le site de Bretenièrre.

L'objectif de Rés0Pest est d'analyser si des systèmes de culture combinant les principes de la protection intégrée des cultures peuvent se passer durablement de pesticides. Pour ce faire, il est nécessaire de (i) caractériser le niveau de production permis par ces systèmes et leur évolution, (ii) réaliser un diagnostic du fonctionnement des agroécosystèmes créés et (iii) tirer les enseignements des échecs et des succès.

2.6 Des successions de cultures différentes, adaptées à chaque site

Lors des ateliers de conception des systèmes de culture, les spécificités liées à la situation de production ont été prises en compte (Tableau 2) : pédo-climat, principales pressions biotiques (fréquence et nuisibilité), orientation des productions, filières de vente locales, potentiel agronomique des cultures, contraintes techniques (disponibilité du matériel) et enjeux environnementaux locaux (sites localisés pour la plupart en zone vulnérable nitrates).

D'autres choix ont été le fait des expérimentateurs comme la volonté d'explorer de nouvelles alternatives à celles déjà expérimentées sur les sites (par exemple, pas de luzerne à Bretenièrre, pas de cultures en association à Auzeville) ou la prise en compte d'enjeux environnementaux globaux (ressource en eau, consommation d'énergie fossile...).

La démarche a abouti à des successions culturales différentes, adaptées à chacun des sites (Figure 2).

Pour chaque dispositif du réseau, la succession culturale ainsi définie est fixe sur la période d'expérimentation 2012-2017, sauf en cas d'échec d'une culture comme à Mauguio où la culture de pois chiche a été remplacée deux fois par du tournesol (très mauvaise levée en 2013 et destruction par les sangliers en 2014) ou à Nouzilly où le tournesol 2017 a été détruit deux fois par des lièvres et remplacé par un maïs ensilage mieux adapté à une date de semis devenue tardive.

Tableau 2 : Principales caractéristiques des sites expérimentaux Rés0Pest (RU : Réserve Utile ; MO : Matière Organique).

Site	Climat	Type de sol	Parcelles	Infrastructures agroécologiques	Cultures représentatives	Enjeux environnementaux
Auzeville	Océanique dégradé sous influence méditerranéenne (650 mm/an)	Alluvions récentes argilo-limoneuses (28 à 25 % d'argile), profondeur entre 80 et 120 cm, non hydromorphe, non drainé, RU = 200 mm, teneur en MO de 1,5 à 2 %	5 parcelles de 0,47 à 0,63 ha	Bandes enherbées	Blé dur Tournesol	Réduction de la fertilisation azotée (introduction d'une légumineuse)
Mauguio	Méditerranéen (550 mm/an)	Sol limono argilo sableux sensible à la battance, profondeur de 200 cm, non hydromorphe, non drainé, RU = 160 mm, teneur en MO < 1,5 %	3 parcelles de 0,4 ha	Bandes enherbées, proximité d'une ripisylve	Blé dur	Zone vulnérable nitrates (fertilisation ajustée), irrigation limitée à la levée des cultures de printemps
Bretenière	Océanique à tendance semi-continentale (760 mm/an)	à Sol Argilo-limoneux hétérogène (45 % d'argile), profondeur entre 45 et 75 cm, non hydromorphe, drainé, RU = 100 mm, teneur en MO de 3,9 %	4 parcelles de 0,8 ha	Bandes enherbées	Blé tendre d'hiver panifiable, le colza et l'orge brassicole	Limiter la consommation d'énergie et d'eau (irrigation limitée à la levée des cultures de printemps)
Estrées-Mons	Océanique dégradé (705 mm/an)	Limon moyen homogène, profondeur de 10 m, non hydromorphes, non drainés, RU = 220 mm, teneur en MO de 2 %	3 parcelles de 0,6 ha	Bandes enherbées bandes fleuries	Blé panifiable et betterave sucrière	Limiter la consommation d'énergie et d'eau
Grignon	Océanique dégradé (695 mm/an)	Limon homogène, profondeur entre 120 et 150 cm, non hydromorphe, drainé, RU = 175 mm, teneur en MO de 3,3 %	3 parcelles de 0,4 ha	Aucune	Cultures de vente céréalières	Fertilisation azotée ajustée et objectifs de rendement réduits
Lusignan	Océanique dégradé (790 mm/an)	Sol limono-argileux battant (15% d'argile), profondeur de 90 cm, hydromorphie temporaire, non drainé, RU = 130 mm, teneur en MO de 2,5 %	4 parcelles de 0,9 à 1,6 ha	Bandes enherbées haies extrémités	Blé tendre d'hiver, colza et cultures fourragères pour les vaches laitières	Limiter la consommation d'énergie et d'eau
Nouzilly	Océanique dégradé (695 mm/an)	Limono-argileux sensible à la battance (60 % de limons), profondeur de 80 à 120 cm, hydromorphe, drainé, RU = 150 mm, teneur en MO de 2,3 %	4 parcelles de 0,5 ha	Bandes enherbées haies	40% minimum de cultures fourragères sans pâturage et 50% de cultures de vente (dont blé panifiable).	Limiter la consommation d'énergie et d'eau Fertilisation minérale azotée ajustée
Le Rheu	Océanique (695 mm/an)	Limon fin (éolien), très sensible à la battance, profondeur entre 50 et 150 cm, localement hydromorphe, non drainé, RU = 60 à 120 mm, teneur en MO de 2,4 %	4 parcelles de 0,5 à 0,8 ha.	Bandes enherbées proximité d'un bois	35% minimum de cultures fourragères sans pâturage et 40% de céréales (maïs ensilage et céréales à paille).	Zone vulnérable nitrates (fertilisation azotée ajustée)

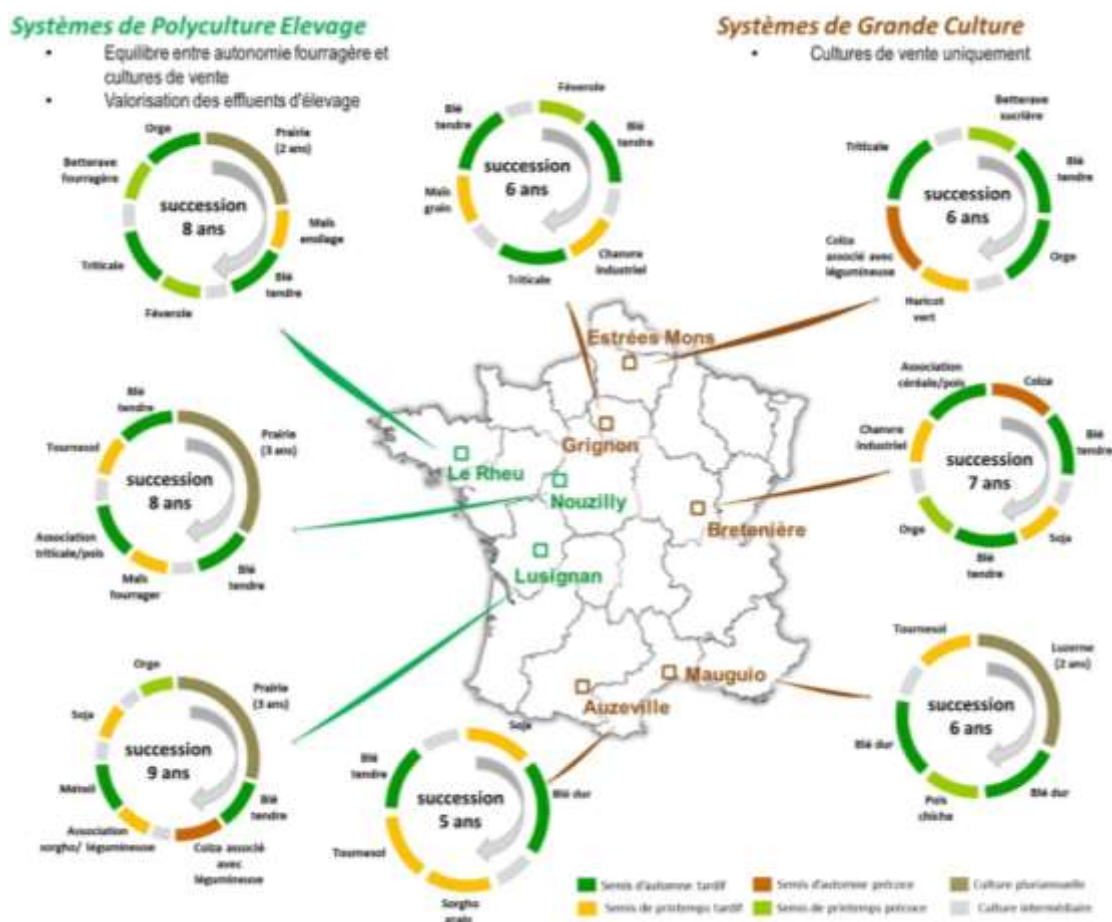


Figure 2 : Successions culturales conçues et expérimentées dans chacun des sites Rés0Pest.

2.7 Les principales techniques utilisées

Différentes techniques ont été combinées à l'échelle de la culture ou à l'échelle pluriannuelle de manière à répondre aux objectifs des systèmes de culture. Les techniques mobilisées visent essentiellement à défavoriser les bioagresseurs pour les maîtriser sans pesticides. Lorsque cela reste compatible, d'autres techniques visant à réduire l'utilisation des intrants et leurs impacts sur l'environnement sont aussi mobilisées (ex : introduction de légumineuses pour fixer de l'azote atmosphérique et limiter le recours aux engrais de synthèse).

Dans le réseau, les principales techniques combinées à l'échelle pluriannuelle sont :

- Des successions culturales longues et diversifiées avec des familles de cultures et des périodes de semis diversifiées (Figure 2) ;
- L'introduction de légumineuses (cultures principales, seules ou en association, cultures intermédiaires), de cultures pluriannuelles (prairie temporaire, luzerne), de cultures étouffantes (chanvre), de cultures peu sensibles aux bioagresseurs, de cultures intermédiaires ;
- L'alternance labour/non-labour et le travail du sol superficiel de façon répétée, en interculture ;
- La présence et les modalités d'entretien d'infrastructures paysagères.

A l'échelle de chaque culture, de nombreuses techniques ont été combinées pour limiter les pressions biotiques à l'aide :

- Du contrôle génétique (variétés résistantes ou tolérantes aux agents pathogènes, variétés couvrantes) ;

- Du contrôle cultural (adaptation de la densité de semis, réalisation de faux-semis et décalages des dates de semis, raisonnement de la fertilisation) ;
- De la lutte physique (désherbage mécanique, utilisation d'effaroucheurs à oiseaux) ;
- De la lutte biologique.

3. Les stratégies de gestion des plantes adventices

La gestion des plantes adventices est un volet important de la maîtrise technique des systèmes de culture sans pesticides, en particulier en raison des conséquences que peut avoir une mauvaise gestion ponctuelle des plantes adventices sur le long-terme, en contribuant à l'enrichissement du stock semencier de la parcelle. Selon le concept E-S-R (efficacité, substitution, re-conception) utilisé pour distinguer les stratégies de diminution des intrants (Hill et MacRae, 1995), les stratégies de gestion des adventices au sein du réseau Rés0Pest relèvent clairement de la re-conception : mobilisation de plusieurs leviers de gestion complémentaires dans un système dont la cohérence d'ensemble est repensée.

3.1 Méthode utilisée

Suite aux ateliers de conception, les expérimentateurs ont mis en œuvre les combinaisons de techniques destinées à lutter contre les plantes adventices. Après cinq années de recul, ils ont été interrogés sur leur perception de l'efficacité de ces leviers et sur le niveau de maîtrise des plantes adventices qui en résulte. Ce travail comporte forcément une part de subjectivité, d'autant plus qu'il est parfois difficile d'évaluer l'efficacité de leviers qui n'ont de sens qu'en combinaison avec d'autres.

3.2 Classement des leviers de gestion des plantes adventices

Le Tableau 3, montre le classement, selon les expérimentateurs, de l'importance relative des leviers au sein de la stratégie de gestion des plantes adventices mise en œuvre dans leur système de culture.

Tableau 3 : Identification des leviers de gestion des plantes adventices importants au regard des expérimentateurs et classement de leur importance ressentie par les expérimentateurs (chiffres indiqués dans les cases du tableau : de 1 (plus important) à 19 (moins important)). Le dégradé de couleur indique si le levier est considéré comme très (vert foncé), peu (vert clair) important ou non classé (sans couleur).

Site	Succession culturale		Interculture		Couverture du sol				Evitement	Désherbage mécanique en culture				Fertilisation	Fauches et broyages				
	Alternance des périodes de semis	Alternance labour non-labour	Espèces couvrantes	Destruction précoce (prairie, couvert)	Lutte contre les vivaces	Faux-semis en interculture	Couvert d'interculture	Densité de semis élevée		Variétés ou mélanges variétaux couvrants	Plantes associées ou association d'espèces	Semis tardif	Herse étrille		Houe rotative	Bineuse	Écimeuse	Désherbage manuel	Fertilisation azotée ajustée
Auzeville		1			4					6	2	4	3	7	7				
Mauguio	1	6	3	18	17	12	14	2	4	16	7	10	9	8	15	11	13	5	19
Bretenièrre	1	3	11	18	10	9	2	8	4	16	6	7	12	12	12	17	5	15	
Estrées-Mons	1	1			3	3	3			10	3	8	8	3		10	10		
Grignon	7	7	5				2	3	5		3			1			9		
Lusignan	1	4	5	2	3	17	10	12	9	10	14	7	8	6			16	15	12
Nouzilly	1	3		8	8	4	6		11	10	2	12		5		7	14	13	
Le Rheu	4	7		1	1	1	6	8	8		4	11	11	11		16	10	14	14

Les leviers principaux se situent au niveau de la succession culturale avec l'alternance des périodes de semis (2 à 5 périodes différentes selon les systèmes) et du labour (fréquence de 35 à 80 % selon les systèmes), et dans une moindre mesure les espèces couvrantes moins répandues dans le réseau.

La période d'interculture est souvent mise à profit pour lutter contre les vivaces (associée avec une destruction précoce des prairies le cas échéant) ou réduire le stock semencier grâce à des faux-semis (entre 1,5 et 3,5 passages de travail du sol/an hors labour et herse rotative). La stratégie d'évitement par semis tardif est très utilisée et permet aussi de rallonger la période d'interculture.

La couverture du sol est également très utilisée que ce soit en interculture ou par l'implantation de variétés ou d'espèces couvrantes. Les discussions qui ont accompagné ce travail de classification ont montré une évolution de la prise de conscience de **l'intérêt de la couverture du sol au cours des trois premières années d'expérimentation**.

Le désherbage mécanique en culture est un levier important même s'il apparaît plus dilué dans le tableau car le classement concerne chacun des outils. Selon les systèmes, on recense de 0,8 à 4,5 passages de désherbage mécanique en culture/an tous types d'outils confondus.

3.3 Notation de la maîtrise des plantes adventices

La note de maîtrise des plantes adventices utilisée dans l'évaluation multicritère des systèmes de culture RésOPest est donnée « à dire d'expert » par l'expérimentateur en fonction des résultats qu'il obtient et des difficultés rencontrées. Après une période de mise au point en début de projet, les expérimentateurs considèrent qu'ils maîtrisent mieux les plantes adventices et que le potentiel de production n'est pas impacté par ce critère (Figure 3). Pour les deux sites où le potentiel de production reste un peu dégradé, il s'agit principalement de problèmes de gestion des rumex dans les prairies temporaires. Les données recueillies dans les essais RésOPest (notes d'abondance, comptages et biomasse), sont en cours de valorisation et permettront de disposer d'un jugement objectif sur l'évolution de la flore adventice dans ces systèmes de culture sans pesticides.



Figure 3 : Evolution de la note de maîtrise des plantes adventices attribuée par les expérimentateurs aux systèmes RésOPest d'Auzeville (Au), Mauguio (Ma), Bretenière (Br), Grignon (Gr), Estrées-Mons (Mo), Lusignan (Lu), Nouzilly (No) et Le Rheu (Rh), entre 2015 et 2017. La couleur indique si le potentiel de production s'est un peu dégradé du fait de la présence de plantes adventices (orange) ou s'il est maintenu (vert).

4. Evaluation multicritère de la durabilité

Une évaluation multicritère de la durabilité des systèmes de culture expérimentés dans le réseau RésOPest a été conduite afin d'avoir une vue d'ensemble des performances obtenues, de vérifier qu'il n'y a pas de dégradation de performance non attendue (temps de travail, consommation d'énergie...) et d'identifier les axes d'amélioration des systèmes de culture expérimentés.

4.1 Méthode utilisée

Dans le cadre d'une approche système cohérente, l'analyse des performances d'un système de culture doit se faire à l'échelle de la succession culturale pour intégrer les effets « du précédent » et la « sensibilité du suivant ». Il s'agit d'évaluer le système dans son ensemble, et non pas les cultures prises une à une, certaines d'entre-elles pouvant avoir des performances peu intéressantes tout en

améliorant très positivement les performances du système global via leur contribution à la fourniture en azote du système ou à la gestion de certains bioagresseurs.

La première évaluation multicritère a été réalisée après cinq campagnes expérimentales et la méthode utilisée a été de reconstituer les successions à partir des cultures présentes sur les différentes parcelles.

Les outils utilisés sont Criter 5.4⁵ pour le calcul de critères de performances élémentaires et MASC 2.0⁶ (Sadok et al., 2009 ; Craheix et al., 2012) pour l'agrégation progressive des critères de performances élémentaires selon les trois dimensions de la durabilité de manière à disposer d'une évaluation globale de la contribution de chaque système de culture au développement durable. Afin de pouvoir comparer les résultats à ceux produits par le RMT SdCi, auquel Rés0Pest est affilié, il a été décidé d'utiliser les mêmes choix méthodologiques : choix d'une année météo représentant un risque de lessivage moyen pour chaque site, limitation de biais liés à des choix d'exploitations (prix de vente et d'intrants communs - 8 scénarios de prix utilisés), parc matériel standardisé (possibilité de moduler les charges de mécanisation selon 3 niveaux d'utilisation), pondération et seuillage standard de MASC (seul le seuillage de la marge semi-nette est régionalisé).

4.2 Contribution au développement durable

L'analyse des données des systèmes Rés0Pest avec les outils Criter 5.4 et MASC 2.0 permet de connaître leur contribution au développement durable selon les trois piliers de la durabilité selon une échelle de notation de « très faible » à « très élevé », représentée par un gradient de couleur (Figure 4).

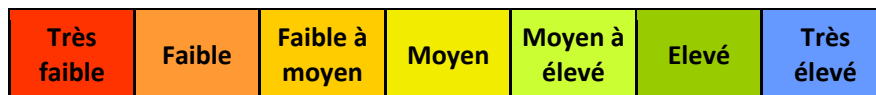


Figure 4 : Echelle de notation de la durabilité MASC 2.0.

Après cinq campagnes, la durabilité globale est de « faible à moyenne » à « élevée » selon les systèmes (Figure 5). Cinq systèmes sur huit présentent une durabilité « élevée ». C'est la contribution de la dimension économique et de la dimension sociale, qui présente le plus de différences entre systèmes, tous les systèmes ayant une contribution « élevée » à « très élevée » pour la dimension environnementale. La dimension sociale représente le point faible des systèmes Rés0Pest. Elle est « faible » ou « moyenne » à l'exception du système de Mauguio pour lequel elle est « élevée ».

4.3 Dimension économique

La durabilité économique est « très élevée » pour quatre systèmes de culture et elle est « moyenne » pour les quatre autres (Figure 5). Il n'y a pas de dégradation de la **capacité productive à long-terme après cinq ans d'expérimentation**⁷ même si le niveau de maîtrise des bioagresseurs sur le long-terme reste à confirmer. Il n'y a pas de dégradation de la qualité des produits récoltés (voir Rendement et qualité des principales cultures).

⁵ <http://wiki.inra.fr/wiki/deximasc/package+MASC/CRITER>

⁶ <http://wiki.inra.fr/wiki/deximasc/package+MASC/>

⁷ Cette notion est à interpréter indépendamment du niveau de rendement obtenu sur chaque site.

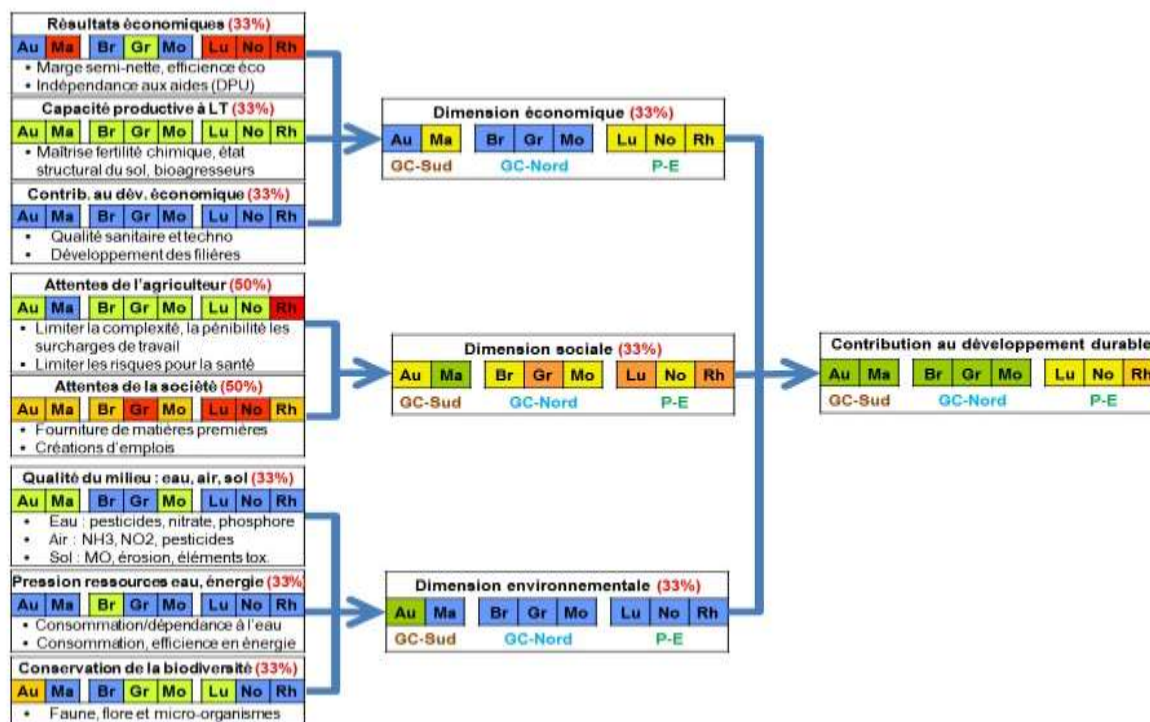


Figure 5 : Contribution au développement durable des huit systèmes de culture Rés0Pest (grande culture Sud (GC-Sud) : Au : Auzeville, Ma : Mauguio, grande culture Nord (GC-Nord) : Br : Bretenière, Gr : Grignon, Mo : Estrées-Mons, polyculture-élevage (P-E) : Lu : Lusignan, No : Nouzilly, Rh : Le Rheu). Les pondérations attribuées à chaque pilier de la durabilité sont indiquées en rouge et les principaux critères élémentaires pris en compte sont rappelés dans les cadres de gauche. La couleur des cadres correspond à l'échelle de notation de la durabilité MASC 2.0 (Figure 4).

4.3.1 Rendement et qualité des principales cultures

Le rendement de chacune des cultures des systèmes Rés0Pest ne doit pas être interprété seul car ce sont les performances du système de culture qu'il faut prendre en compte mais il permet de constater que le niveau de production en céréales, colza et betteraves, s'il est souvent inférieur à celui des conduites conventionnelles, est supérieur à ce qui était attendu au début du projet pour des productions conduites sans aucun pesticide (Tableau 4). Cela constitue en soi un résultat très important de cette expérimentation. Les rendements constatés en colza sont d'un niveau élevé, d'autant plus que le colza 2013 d'Estrées-Mons a subi des dégâts de grêle estimés à au moins 5q/ha. De bons résultats sont également observés pour les betteraves sucrières (et dans une moindre mesure pour les betteraves fourragères) mais le désherbage de cette culture n'est pas bien maîtrisé et nécessite trop d'interventions manuelles (au minimum 20h/ha), qui réduisent fortement leurs performances économiques.

Tous les échantillons de céréales à paille récoltés dans les essais Rés0Pest ont été analysés quant à leur teneur en mycotoxines (Déoxynivalénol et Nivalénol) par l'UR MycSA de l'INRA de Bordeaux. Les résultats des quatre premières campagnes culturales témoignent d'une bonne qualité sanitaire des récoltes puisqu'**aucun lot ne dépasse les normes** alimentation humaine (1 250 ng/g pour blé tendre et orge brassicole et 1 750 ng/g pour le blé dur) ou animale (8 000 ng/g pour orge d'hiver et triticale). En 2014, aucune mycotoxine n'a été détectée et en 2015 les teneurs sont restées en dessous de 100 ng/g. Les teneurs de l'année 2016 sont plus élevées mais restent en deçà des normes avec un maximum de 1204 ng/g (blé tendre à Grignon).

Tableau 4 : Niveaux de rendements céréales, colza et betteraves et satisfaction de l'expérimentateur. Les rendements entre parenthèses sont ceux des cultures conventionnelles dans la petite région ou sur le domaine expérimental, quand ils sont disponibles. Le code couleur montre la satisfaction de l'expérimentateur (atteinte de l'objectif de rendement, rendement équivalent à ceux de la petite région).

Culture	Objectif de rendement	Site	2013	2014	2015	2016	2017
Blé dur d'hiver	55 q/ha	Auzeville	36,5 (51)	35,2 (56)	38,7 (65)	27,7(50)	45,6 (65)
	40 q/ha	Mauguio	47	16,5	-	33,8	59
Blé tendre d'hiver	65 q/ha	Auzeville	45,1 (85)	49,2 (83)	53,1 (86)	43,5(84)	54,5(83)
	70 q/ha	Bretonnière	56,5 (70)	57 (56)	64,5 (72)	-	60 (75)
	70 q/ha	Estrées-Mons	-	-	64,1 (112)	44,4 (56)	-
	55 q/ha	Grignon	-	72 (86)	82 (87)	43 (50)	58 (80)
	45 q/ha	Lusignan	-	-	51 (75)	10,4 (40)	-
	60 q/ha	Nouzilly	53,6 (63)	36,4 (82)	58,9 (85)	-	74,8 (91)
Triticale	70 q/ha	Estrées-Mons	70,1	80,3	-	40,4	-
	50 q/ha	Grignon	59 (65)	40 (65)	-	-	-
	65 q/ha	Le Rheu	33,1	-	-	67,7	-
Orge d'hiver	65 q/ha	Estrées-Mons	68	-	-	45,3	60
	50 q/ha	Le Rheu	-	46	67,5	-	-
Orge de Printemps	50 q/ha	Bretonnière	-	38 (38)	56 (37)	25 (39)	-
	30 q/ha	Lusignan	-	30 (45)	-	20 (30)	-
Colza d'hiver	30 q/ha	Bretonnière	-	32 (40)	-	-	40 (44)
	30 q/ha	Estrées-Mons	23 (40)	-	43,6 (43)	-	-
	20 q/ha	Lusignan	-	-	-	18,8 (33)	17 (40)
Betteraves sucrières	50 t/ha	Estrées-Mons	-	112 (100)	72,6 (99)	-	101,3 (101)
Betteraves fourragères	15t MS/ha	Le Rheu	12,4	14,7	-	-	11,4

4.3.2 Rentabilité des systèmes de culture

Dans MASC 2.0, la rentabilité est estimée par la marge semi-nette du système de culture :

Marge Semi-Nette = (Produit Brut + Aides) - (Charges Opérationnelles + Charges de Mécanisation)

La note MASC 2.0 est attribuée avec la méthodologie du RMT SdCi, selon le nombre de SMIC (base 2015) dégagés par le système de culture pour une Unité Travailleur Humain (UTH) :

$$Seuil_{Nb} = \frac{Nb * SMIC \text{ brut annuel par UTH}}{\text{Surface Agricole Utile par UTH}} + \frac{\text{Fermage}}{ha} + \text{Charges de structure /ha}$$

La marge semi-nette sera « très faible » si elle est inférieure au seuil1 (moins d'un SMIC/UTH dégagé), « faible à moyenne » si elle se situe entre le seuil1 et le seuil2 (entre un et deux SMIC/UTH dégagés), « moyenne à élevée » si elle se situe entre le seuil2 et le seuil3 (entre deux et trois SMIC/UTH dégagés) et « très élevée » si elle est supérieure au seuil3 (plus de trois SMIC/UTH dégagés), les seuils étant propres à chaque système. La marge semi-nette est calculée selon différents scénarios de prix, communs à tous les systèmes (Tableau 5). **Aucune valorisation économique particulière des récoltes produites sans aucun pesticide, n'a été appliquée.**

La rentabilité des systèmes Rés0pest est très variable d'un système à un autre : de 295 €/ha/an à Mauguio à 843€/ha/an à Mons. Il est possible d'obtenir une bonne rentabilité pour des systèmes de

culture sans pesticides au moins dans certaines situations de production et ceci sans accorder une plus-value économique à ces produits (Figure 6). Ces résultats concernent les cinq premières campagnes d'expérimentation (2013-2017) pendant lesquelles il y a eu une phase de mise au point et d'adaptation des systèmes de culture ainsi qu'une phase d'apprentissage des expérimentateurs à la maîtrise technique de ces systèmes. Sur cette période, les mauvaises performances des céréales en 2016, dues à des conditions météo exceptionnelles ont pu également peser sur les résultats dans certains sites.

Les systèmes de polyculture-élevage ont plus de mal à dégager une bonne rentabilité mais cela reste à resituer dans le cadre du système d'élevage auquel il fournit une partie des ressources alimentaires.

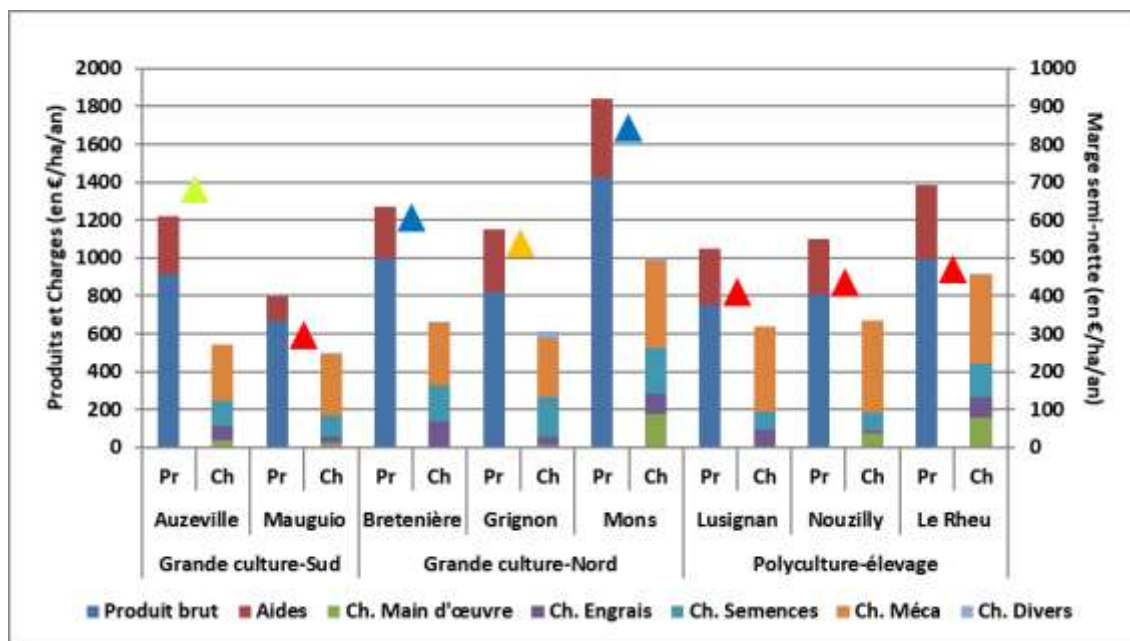


Figure 6 : Produits (Pr), charges (Ch) et marge semi-nette, en €/ha/an, des systèmes de culture Rés0Pest sur la période 2013-2017. La couleur des triangles représentant la MSN correspond à la note MASC 2.0 (Figure 4). Les résultats présentés correspondent au scénario 'prix médian des cultures et des intrants' du RMT SdCi dont les principales hypothèses de prix sont les suivantes : blé tendre (171€/t), blé dur (207€/t), orge (159€/t), tournesol (313€/t), colza (359€/t), soja (419€/t), betterave sucrière (30€/t), carburant (0,71€/l), ammonitrate (1,02€/u), azote liquide (0,78€/u).

Les résultats du système de Mauguio sont très faibles en raison d'un problème de maîtrise d'implantation de la culture du pois chiche, remplacée deux fois par un tournesol avant de pouvoir être menée à terme, et de la difficulté à conduire un système de culture de ce type sans irrigation sous ce climat.

Dans le réseau, les charges de semences sont élevées en raison des couverts d'interculture qui sont fréquemment utilisés (entre 13 et 60 % d'intercultures avec un couvert) et dont le coût peut être important si on utilise des mélanges spécifiques, sans recours à des semences de ferme.

Les charges de mécanisation (incluant le carburant) sont élevées dans les systèmes de polyculture-élevage en raison des nombreuses opérations de récolte liées à la production de fourrage ainsi que sur le site d'Estrées-Mons où le travail du sol est très fréquent (4,5 passages de désherbage mécanique/an et 4,3 passages de travail du sol en interculture/an).

Les charges de main d'œuvre correspondent à des opérations de désherbage manuel réalisées principalement en cas d'échec de la stratégie de désherbage. Ce type d'opération est autorisé dans Rés0Pest et son incidence financière est prise en compte. Sur le site d'Estrées-Mons, il s'agit

essentiellement du désherbage de la betterave sucrière où le temps de désherbage manuel a été de 85h/ha en 2014, 50h/ha en 2015 et se stabilise maintenant autour de 20h/ha montrant une progression dans la maîtrise des plantes adventices pour cette culture.

4.3.3 Scénarios économiques

Pour évaluer la sensibilité de la performance économique des systèmes de culture Rés0Pest aux fluctuations de prix, la rentabilité des systèmes a été calculée selon différents scénarios de prix des intrants et des produits agricoles proposés par le RMT SdCi à partir de l'analyse des prix mensuels (source INSEE) sur la période 01/2007 - 07/2014 (Massot et al., 2016). Ces scénarios (Tableau 5) représentent des situations de prix contrastées, sauf pour certaines cultures dont les prix restent constants (betteraves sucrières et fourragères, prairies, sarrasin, pois-chiche...).

Tableau 5 : Rentabilité des systèmes de culture Rés0Pest selon les huit scénarios de prix du RMT SdCi. La couleur des cases correspond à la note de durabilité MASC 2.0 (Figure 4).

Scénarios		Auzeville	Mauguio	Bretenièrre	Grignon	Mons	Lusignan	Nouzilly	Le Rheu
1	Prix médian des cultures et des intrants	Orange	Vert	Bleu	Orange	Bleu	Vert	Vert	Vert
2	Prix assez élevé du blé, médian du colza, du fioul et des engrais	Orange	Vert	Orange	Orange	Bleu	Vert	Vert	Orange
3	Prix très élevé des cultures et médian des intrants	Bleu	Vert	Bleu	Orange	Bleu	Vert	Orange	Orange
4	Prix élevé du colza et du fioul, médian du blé et des engrais	Orange	Vert	Orange	Orange	Bleu	Vert	Vert	Vert
5	Prix médian des cultures et élevé des intrants	Orange	Vert	Orange	Orange	Orange	Vert	Vert	Vert
6	Prix faible des cultures et du fioul et prix élevé des engrais	Orange	Vert	Orange	Vert	Bleu	Vert	Vert	Vert
7	Prix faible des cultures et des intrants	Vert	Vert	Vert	Vert	Orange	Vert	Vert	Vert
8	Prix très faible des intrants (sauf potasse) et des cultures	Vert	Vert	Vert	Vert	Orange	Vert	Vert	Vert

Pour les systèmes en polyculture-élevage et le site de Mauguio en grande culture, les performances sont trop faibles pour pouvoir mettre en évidence un effet des scénarios économiques, d'autant plus que le prix des récoltes des prairies est constant. Les autres sites de grande culture ont des niveaux de performance plus différenciés selon les scénarios. Le site de Grignon présente moins de variation en raison d'un niveau de performance moins élevé dû à une SAU/UTH plus faible que les autres sites.

Les performances des systèmes de culture sont très dépendantes du niveau de prix des cultures comme le montre l'effet des scénarios 7 et 8 sur les sites de grande culture (hors Mauguio). Dans une moindre mesure, un prix élevé des intrants (scénario 5), conduit également à une baisse des performances économiques. Le scénario 6 montre l'effet d'un prix faible du fioul qui peut compenser un prix faible des cultures dans les sites ayant une consommation en énergie élevée (Bretenièrre et Mons).

Le scénario 3, qui correspond à un prix élevé des cultures (blé tendre à 196€/t, colza à 444€/t, maïs grain à 204€/t...) montre une amélioration notable de la rentabilité des systèmes de culture de 13 à 28 % par rapport au scénario 1, sauf pour Lusignan qui reste stable en raison de la forte proportion de cultures fourragères non concernées par ces scénarios. L'acceptabilité par le consommateur d'un prix plus élevé pour des produits issus de matières premières cultivées sans pesticides et la faisabilité de mise en place de filières spécifiques reste à explorer.

4.4 Dimension sociale

La durabilité sociale est « moyenne » pour six systèmes de culture, « faible » et « très faible » pour les deux autres (Figure 5). Les attentes de l'agriculteur sont satisfaites pour la plupart des systèmes de culture, avec en particulier peu de risques pour la santé (pas de produits dangereux utilisés) mais moins en ce qui concerne la complexité, la pénibilité et les surcharges de travail, notamment pour le système du Rheu pour lequel l'expérimentateur évalue que la difficulté physique de mise en œuvre de son système de culture est « élevée ». Le critère « création d'emplois » est pénalisant mais il faut souligner qu'il ne correspond pas à l'un des objectifs visés lors de la conception, les systèmes de grande culture étant généralement peu générateurs d'emplois.

4.5 Dimension environnementale

La durabilité environnementale est « élevée » à « très élevée » pour tous les systèmes de culture (Figure 5). La non-utilisation de pesticides a un effet positif sur les indicateurs de qualité du milieu (eau et air) ainsi que sur la conservation de la biodiversité. Le bilan est plus nuancé en ce qui concerne la qualité du sol, en raison d'une maîtrise du statut organique « faible » ou « faible à moyenne » sur certains sites en raison d'un recours important au travail du sol. En raison d'une utilisation réduite de la fertilisation minérale, les indicateurs correspondants (maîtrise des pertes de P et de NO₃ dans l'eau, maîtrise des émissions de NH₃ et de N₂O dans l'air) sont « moyens à élevés » ou « très élevés » sauf pour la maîtrise des émissions de NH₃ dans l'air sur le site de Nouzilly qui utilise beaucoup d'engrais organiques. Dans certains cas (Bretenière et Estrées-Mons), la consommation d'énergie est importante en raison de nombreuses interventions de travail du sol comme le désherbage mécanique. La conservation de la biodiversité est réduite dans certains cas, en partie à cause du travail du sol fréquent qui a un effet négatif sur la conservation de la macrofaune du sol.

5. Conclusions et perspectives

5.1 Des résultats provisoires...

Les résultats présentés ici doivent être pondérés par le fait qu'ils sont issus d'une reconstitution des successions culturales à partir des premières années d'expérimentation, ce qui ne permet pas de tenir compte de tous les effets cumulatifs des systèmes de culture. Pendant ces premières années, il y a également eu certains échecs dus aux apprentissages des expérimentateurs qui n'étaient pas tous familiers de la démarche d'expérimentation système de culture et ne maîtrisaient pas toutes les techniques à mettre en œuvre pour piloter les systèmes (ex : désherbage mécanique). L'année 2016 a également pesé d'un poids important sur les résultats des céréales dans certains sites.

...mais encourageants

Même s'ils demandent à être confirmés, les niveaux de production atteints (quantité et qualité), le maintien de la capacité productive à long-terme (fertilité physico-chimique et maîtrise des bioagresseurs) et dans une moindre mesure les résultats économiques obtenus, sont très encourageants pour des systèmes de culture avec un tel niveau de rupture vis-à-vis de l'utilisation des pesticides.

La rentabilité des systèmes de culture a été calculée à partir des prix de vente retenus dans les scénarios économiques du RMT SdCi (171€/t pour le blé tendre dans le scénario médian). Une des clés de la rentabilité de ces systèmes de culture réside sans doute dans la possibilité de mieux valoriser les récoltes issues de culture non traitées et qui ont donc un impact moindre sur l'environnement et la santé.

5.2 Poursuivre l'expérimentation

Disposer d'informations sur une période plus longue permettra de mieux explorer la réponse de ces systèmes à la variabilité du climat et des pressions biotiques, d'autant plus que les différents termes de la succession culturale ne sont pas tous présents chaque année dans les sites (sauf Auzeville). Il sera alors possible d'analyser la variabilité des performances ainsi que la notion de risque associée aux systèmes de culture sans pesticides. En effet, il est couramment affirmé que ce type de système est plus risqué car vulnérable aux attaques importantes de maladies et/ou ravageurs mais son principe étant de mettre en œuvre des mesures prophylactiques et de diversifier la succession culturale, **il serait pertinent d'analyser si ces systèmes ne sont pas plus robustes en termes de production et de qualité que les systèmes conventionnels vis-à-vis des différents stress biotiques et abiotiques.**

La poursuite de l'expérimentation (financement DEPHY EXPE V2 acquis pour la période 2018-2023) permettra de mettre en évidence les éventuels effets cumulatifs des systèmes de culture, que ce soit dans le sens positif (mise en place de régulations biologiques, restauration de la fertilité des sols) ou négatif (altération de la capacité productive).

Il est important de souligner la force que représente un réseau expérimental de huit sites pour analyser les résultats de systèmes de culture différents, tous conçus selon les principes de la protection intégrée des cultures avec un cahier des charges commun. Au niveau expérimental, le partage d'expérience au sein du réseau permet de progresser ensemble dans la maîtrise des systèmes et les enseignements qui pourront être tirés des expérimentations seront plus robustes s'il s'avère qu'ils sont communs à tous les sites ou pourront être nuancés selon leur adaptation à certaines situations de production.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier tous les agents des unités expérimentale de l'INRA et du lycée agricole d'Auzeville qui ont mis leurs compétences au service des essais Rés0Pest ainsi que Marie-Hélène Bernicot, première coordinatrice du projet de 2012 à 2013 et Anne-Laure Toupet et Ségolène Plessix qui ont participé à l'animation du réseau à son démarrage. Merci également au projet MARKIZ piloté par M'hand Fares (INRA) et soutenu par la fondation Daniel et Nina Carasso, qui a financé le stage d'Olfa Hanneche qui a initié l'évaluation multicritère des systèmes de culture Rés0Pest.

Références bibliographiques

Amossé C., 2013. Thèse d'agronomie. Analyse expérimentale de l'effet de couverts de légumineuses associés en relais à un blé d'hiver, conduit en agriculture biologique, sur les performances des cultures, la maîtrise des adventices et la dynamique de l'azote (<https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01179727/document>).

Aubertot J.N., Barbier J.M., Carpentier A., Gril J.J., Guichard L., Lucas P., Savary S., Savini I., Voltz M., 2005. Pesticides, agriculture et environnement : Réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux. Expertise scientifique collective. INRA – CEMAGREF. INRA édition.

Baldi I., Cordier S., Coumoul X., Elbaz A., Gamet-Payrastré L., Le Bailly P., Multigner L., Rahmani R., Spinosi J., Van Maele-Fabry G., 2013. Pesticides, effets sur la santé. Expertise collective, synthèse et recommandations. Les éditions INSERM, Paris.

Berry P.M., Sylvester-Bradley R., Philipps L., Hatch D.J., Cuttle S.P., Rayns F.W., Gosling P., 2002. Is the productivity of organic farms restricted by the supply of available nitrogen? *Soil Use Manage.* 18, 248-255.

Butault J.P., Dedryver C.A., Gary C., Guichard L., Jacquet F., Meynard J.M., Nicot P., Pitrat M., Reau R., Sauphanor B., Savini I., Volay T., 2010. Ecophyto R&D : Quelles voies pour réduire l'usage des pesticides ?

Colnenne-David C., Doré T., 2015. Designing innovative productive cropping systems with quantified and ambitious environmental goals. *Renewable Agriculture and Food Systems*. doi:10.1017/S1742170514000313, volume 30, issue 06, pp. 487-502.

Colnenne-David C., Grandeau G., Jeuffroy M.H., Doré T., 2017. Ambitious multiple goals for the future of agriculture are unequally achieved by innovative cropping systems. *Field Crops Research*, 114-128

Craheix D., Angevin F., Bergez J.-E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Reau R., Doré T., 2012. MASC 2.0, un outil d'évaluation multicritère pour estimer la contribution des systèmes de culture au développement durable. *Innovations Agronomiques* 20, 35-48

Debaeke P., Munier-Jolain N.M., Bertrand M., Guichard L., Nolot J.M., Faloya V., Saulas P., 2009. Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: methodology and case studies. *A review. Agronomy for Sustainable Development* 29, 73-86.

Deytieux V., Vivier C., Minette S., Nolot J.-M., Piaud S., Schaub A., Lande N., Petit M.-S., Reau R., Fourrié L., Fontaine L., 2012. Expérimentation de systèmes de culture innovants : avancées méthodologiques et mise en réseau opérationnelle. *Innovations Agronomiques* 20, 49-78.

Institut français de l'environnement. 2016. Repères : Pollution de l'eau et des milieux aquatiques : chiffres clés Edition 2016

Hill S.B., MacRae R.J., 1995. Conceptual framework for the transition from conventional to sustainable agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture*, 7(1), 81-87.

Massot P., Deytieux V., Fonteny C., Schaub A., Toqué C., Pagès B., Dubois B., Hirschy M., Petit M.S., 2016. Des scénarios de prix pour évaluer les performances économiques des systèmes de culture. Poster, Colloque «Systèmes de culture innovants: concevoir, former, accompagner», Paris, mai 2016.

Reau R., Monnot L.A., Schaub A., Munier-Jolain N., Pambou I., Bockstaller C., Cariolle M., Chabert A., Dumans P., 2012. Les ateliers de conception de systèmes de culture pour construire, évaluer et identifier des prototypes prometteurs. *Innovations Agronomiques* 20, 5-33.

Sadok W., Angevin F., Bergez J.E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Reau R., et al., 2009. MASC : a qualitative multi attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development* 29 : 447-61.

Schrack D., Coquil X., Ortar A., Benoît M., 2009. Rémanence des pesticides dans les eaux issues de parcelles agricoles récemment converties à l'Agriculture Biologique. *Innovations Agronomiques* 4, 259-268.

Seufert V., Ramankutty N., Foley J.A., 2012. Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature* 485, 229–232. doi:10.1038/nature11069

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « *Innovations Agronomiques* », la date de sa publication, et son URL ou DOI).