



HAL
open science

Des systèmes de culture agroécologiques pour diminuer l'usage des pesticides

Marie-Hélène Jeuffroy, Rémy Ballot, Anne Merot, Jean-Marc Meynard, Simon Sylvaine

► **To cite this version:**

Marie-Hélène Jeuffroy, Rémy Ballot, Anne Merot, Jean-Marc Meynard, Simon Sylvaine. Des systèmes de culture agroécologiques pour diminuer l'usage des pesticides. *Zéro pesticide. Un nouveau paradigme de recherche pour une agriculture durable*, Éditions Quae, pp.81-116, 2022, 9782759233113. hal-04228209

HAL Id: hal-04228209

<https://hal.inrae.fr/hal-04228209>

Submitted on 4 Oct 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

ZÉRO PESTICIDE

Un nouveau paradigme de recherche
pour une agriculture durable

F. Jacquet, M.-H. Jeuffroy, J. Jouan, E. Le Cadre,
T. Malausa, X. Reboud, C. Huyghe, coord.



Chapitre 3

Des systèmes de culture agroécologiques pour diminuer l'usage des pesticides

Marie-Hélène Jeuffroy, Rémy Ballot, Anne Merot,
Jean-Marc Meynard, Sylvaine Simon

La question du faible usage des pesticides dans les systèmes agricoles n'est pas nouvelle (pas ou très peu de pesticides étaient disponibles au XIX^e siècle). Mais, dès lors que ces intrants ont été développés, ils sont progressivement devenus la clé de voûte des systèmes agricoles (Meynard et Girardin, 1991). La mise en évidence de liens entre l'agriculture et les problèmes environnementaux, puis, plus récemment, de santé humaine, a stimulé le développement de recherches sur la réduction de l'usage de ces intrants, et de politiques publiques, aussi bien en France qu'en Europe. Pourtant, on est encore loin d'une réduction de l'usage dans la pratique. En effet, les pesticides restent, pour beaucoup d'acteurs du monde agricole, emblématiques du progrès technique, et de très nombreux agriculteurs dans les pays du Nord en utilisent pour accroître les rendements et la qualité des produits. De plus, leur efficacité élevée et leur faible coût ont conduit à négliger, pendant longtemps, les recherches sur les méthodes alternatives. L'investissement des agronomes sur la protection intégrée des cultures a démarré (timidement d'abord) à partir des années 1970-1980, avec des travaux sur la lutte intégrée, et n'a pris de l'ampleur que dans les dernières années du XX^e siècle, avec le développement de l'agronomie système (Lucas et Meynard, 2000).

►► Se passer de pesticides nécessite un changement radical du mode de raisonnement des pratiques

Le raisonnement des systèmes actuels est construit autour des pesticides

En Europe de l'Ouest, l'intensification des systèmes agricoles, initiée dans les années 1950, marque encore fortement les modes de production actuels : malgré les

enjeux environnementaux, sanitaires et sociaux, la plupart des systèmes de culture dépendent encore des pesticides pour obtenir la production maximale ou maîtriser la qualité des produits. Les divers facteurs limitants (maladies, insectes, adventices, carence azotée, stress hydrique, verse) sont contrôlés par des intrants (pesticides, engrais azoté, irrigation, régulateurs de croissance). Les innovations techniques, proposées successivement depuis les années 1950, étaient cohérentes avec la disponibilité de ces intrants, et ont rendu de plus en plus nécessaire leur utilisation par les agriculteurs, les plaçant au cœur des systèmes de production. En culture de blé, par exemple, la sélection de variétés plus productives (mais pas plus résistantes aux bioagresseurs), l'avancée des dates de semis et l'augmentation des densités de semis (pour capter, dès le début du cycle, une plus grande quantité d'énergie lumineuse), ainsi que la recherche d'une alimentation azotée non limitante ont accompagné cette intensification et ont rendu obligatoire l'utilisation de fongicides et de régulateurs de croissance (pour contrôler la verse), et plus fréquente l'utilisation d'insecticides à l'automne (Meynard et Girardin, 1991). Dans les systèmes viticoles, la mise en œuvre des pratiques de gestion du feuillage, comme l'écimage ou l'effeuillage, a surtout été raisonnée par rapport à l'équilibre entre l'offre en carbone dans les feuilles et la demande en carbone des grains (basé sur des indicateurs de vigueur de la culture ; Merot et Wéry, 2017), mais moins pour des objectifs de gestion du microclimat autour de la grappe. Pourtant un microclimat aéré limite le développement des maladies cryptogamiques (Fernaud *et al.*, 2001). Pour résumer, dès lors que l'on a su que l'on pouvait compter sur les pesticides pour faire face aux dégâts de bioagresseurs, on n'a plus craint que les autres techniques en accroissent les risques, et on a négligé la prophylaxie : les pesticides sont devenus incontournables ! Cependant, plus l'utilisation des pesticides s'est généralisée, plus les populations de bioagresseurs se sont adaptées via le développement de résistances aux molécules et à leurs modes d'action. Ainsi, dans certaines régions, la forte présence de colza a été propice à une augmentation des populations d'insectes affectant cette culture, conduisant à un usage élevé d'insecticides (Schott *et al.*, 2010). Cette pratique a induit un développement, puis une généralisation des résistances aux pyréthrinoides dans les populations de grosse altise et de charançon du bourgeon terminal (Terres Inovia, 2019), qui conduisent aujourd'hui les agriculteurs à abandonner cette culture ou à recourir à une autre molécule au spectre toxicologique/écotoxicologique délicat (le phosmet). Les mêmes évolutions ont été décrites, par exemple, sur le coton en Thaïlande (Castella *et al.*, 1999), ou sur le soja en Argentine (Salembier *et al.*, 2014). Les pesticides ont été tellement utilisés qu'ils sont devenus moins efficaces, et les agriculteurs en ont alors utilisé encore davantage pour réussir le contrôle des bioagresseurs, ceci construisant à long terme à une forme d'impasse, renforcée par le retrait de nombreuses molécules et par l'absence de découverte de nouveaux modes d'action.

Par conséquent, seule une approche systémique, reconfigurant le raisonnement de la conduite des cultures, permettra de se passer des pesticides tout en limitant les pertes liées aux bioagresseurs. C'est en effet à partir d'une modification radicale des objectifs de départ, visant à réduire en amont les risques de bioagresseurs sur la culture, qu'on pourra réduire de manière significative l'usage de pesticides (Loyce *et al.*, 2008 ; Jacquet *et al.*, 2011). Mais le faible coût des pesticides (en comparaison aux coûts cachés de leurs impacts), leur facilité d'usage, la logique dominante du

raisonnement de la conduite des cultures (s'appuyant sur leur disponibilité), et l'organisation du conseil agricole autour de ces intrants, rendent extrêmement difficile aujourd'hui ce changement de raisonnement. C'est la cohérence globale des systèmes agricoles, de l'échelle parcellaire au territoire, qu'il faut remettre en cause, induisant un changement profond dans les activités et l'organisation de la R&D actuelle.

Pour se passer de pesticides, mobiliser un raisonnement systémique visant la prophylaxie

Pour éviter de mobiliser la lutte chimique (ou ne l'utiliser qu'en dernier recours), plusieurs catégories de techniques permettent de maîtriser les bioagresseurs, soit en amont, par des mesures prophylactiques (on parle de contrôle), soit en curatif (on parle de lutte) : le contrôle génétique, la lutte physique, la lutte biologique, et le contrôle cultural (Attoumani-Ronceux *et al.*, 2011). C'est en mobilisant des mesures prophylactiques (contrôle génétique et cultural), visant explicitement à réduire les risques de bioagresseurs en amont de l'épidémie, et des dégâts et dommages dont ils sont à l'origine, qu'on réussit à réduire le plus les pesticides (Meynard *et al.*, 2003). En cultures pérennes (arboriculture, viticulture), c'est dès la plantation que ces techniques doivent être raisonnées, les marges de manœuvre en culture étant moindres qu'en cultures annuelles (encadré 3.3). Plus précisément, le raisonnement des pratiques vise à affecter différentes étapes du cycle des bioagresseurs et de la culture, de manière à limiter l'arrivée, le développement, l'incidence des bioagresseurs, la contamination de la culture et les pertes engendrées. Ces méthodes concernent différentes stratégies :

- (1) la réduction du stock initial (l'inoculum), dans le but de limiter les populations de bioagresseurs,
- (2) l'évitement, visant à éviter la concordance entre la phase de contamination par le bioagresseur et la période de sensibilité de la culture,
- (3) l'atténuation en culture, visant à réduire les dégâts lorsque le bioagresseur est présent sur la culture,
- (4) des solutions de rattrapage, permettant de limiter les dégâts lorsque les leviers mis en place en amont n'ont pas été suffisants pour empêcher des attaques induisant des pertes trop élevées.

Déclinés et adaptés par grand type de bioagresseurs (champignons, insectes, adventices, etc.), ces grands principes sont synthétisés dans des guides méthodologiques opérationnels pour les grandes cultures (Attoumani-Ronceux *et al.*, 2011), les productions viticoles (Barbier *et al.*, 2011), les systèmes légumiers (Launais *et al.*, 2014), les productions fruitières (Laget *et al.*, 2015), et les productions tropicales (Bruchon *et al.*, 2015). Ces principes, qui permettent d'identifier un grand panel de pratiques mobilisables, ont été largement utilisés pour la reconception de systèmes agricoles visant une réduction forte des pesticides, dans le cadre du réseau mixte technologique (RMT) « Systèmes de culture innovants » (RMT SdCi, Petit *et al.*, 2012b). Ratnadass *et al.* (2012) précisent les processus biologiques mobilisables dans les associations d'espèces : (1) dilution des ressources et perturbation visuelle et

olfactive, (2) perturbation du cycle spatial, (3) perturbation du cycle temporel, (4) effets allélopathiques, (5) effet suppressif de la microfaune et macrofaune du sol sur les bioagresseurs, (6) résistance physiologique des cultures, (7) conservation des ennemis naturels et facilitation de leur action contre les ravageurs aériens et (8) effets architecturaux/physiques directs et indirects (encadré 3.1).

Encadré 3.1. Le projet de recherche BE-CREATIVE : co-conception de territoires sans pesticides (PPR CPA – 2020/2026)

BE-CREATIVE s’est construit sur la conviction que le projet d’une agriculture sans pesticides nécessite de penser de manière systémique, à l’échelle territoriale. Le projet développe une approche innovante de co-conception vers des territoires sans pesticides pour penser de façon disruptive les dynamiques écologiques, socio-économiques et techniques, avec et pour les acteurs des territoires. Pour mener à bien ce projet, un ambitieux dispositif de recherche a été construit sur dix territoires cas d’étude répartis sur l’ensemble du territoire métropolitain, dans lesquels les chercheurs du consortium travaillent déjà avec des partenaires locaux pour mettre fin à l’utilisation des pesticides.

Le projet s’articule autour de trois grands objectifs : (1) définir la cible de conception sur la base de la réalisation de diagnostics sociotechniques dans les territoires cas d’étude, (2) générer des solutions par la conception innovante, pour concevoir des territoires zéro phyto, (3) évaluer les performances, impacts et services des solutions construites et mises en œuvre dans les territoires (INRAE, 2021b).

Chaque pratique ayant un effet partiel, la maîtrise des bioagresseurs sans recours à l’application de pesticides suppose de combiner, dans le temps et dans l’espace, plusieurs techniques culturales. De plus, l’effet de chaque technique étant dépendant (i) des autres techniques mises en œuvre (fortes interactions entre techniques), et (ii) des conditions climatiques et biologiques, il est quasiment impossible de prévoir précisément les effets attendus de la mise en œuvre d’une technique dans un contexte donné. Il est donc illusoire de chercher à quantifier précisément les effets partiels de chaque technique individuelle, puis d’additionner ces effets, dans la mesure où ces effets partiels sont conditionnés par les autres leviers actionnés. Il faut donc mobiliser, dans chaque situation, un raisonnement adapté aux conditions locales, visant à mettre au point les combinaisons de pratiques qui permettront une « protection agroécologique des cultures » (Deguine *et al.*, 2021) et s’appuyant avant tout sur la prophylaxie.

Cette approche suppose un raisonnement systémique des liens entre les résultats attendus, les processus biologiques, écologiques et physico-chimiques qui peuvent intervenir dans le cycle des bioagresseurs visés, et les pratiques susceptibles de modifier ces processus. Ainsi, par exemple, pour réduire l’usage de pesticides dans une culture de blé, il est indispensable de modifier profondément le raisonnement de l’itinéraire technique, et de combiner plusieurs choix techniques visant explicitement à réduire les risques de bioagresseurs (Meynard *et al.*, 1991 ; Loyce *et al.*, 2008 ; figure 3.1) :

– un report de la date de semis, pour réduire les risques d’infestation en ray-grass et vulpin, les deux adventices majeures du blé, et les attaques de pucerons d’automne,

mais aussi pour limiter les besoins en azote précoces, qui influencent les risques de verse et de maladies ;

- une réduction de la densité de semis, pour réduire les besoins en azote et la croissance précoce des tiges, et donc pouvoir se passer de régulateur de croissance ;
- le choix d'une variété résistante aux maladies, ou d'une association variétale, pour réduire les risques de maladies aériennes et l'usage de fongicides ;
- le choix d'une variété tolérante aux carences azotées précoces et à bonne capacité de panification même en nutrition azotée limitante, pour maintenir une production quantitative et qualitative élevée ;
- une stratégie de fertilisation azotée moins élevée et plus tardive, réduisant également les risques de maladies aériennes et affaiblissant la croissance des adventices nitrophiles ;
- une rotation moins chargée en céréales, pour réduire les risques de maladies telluriques, et donc supprimer certains fongicides.

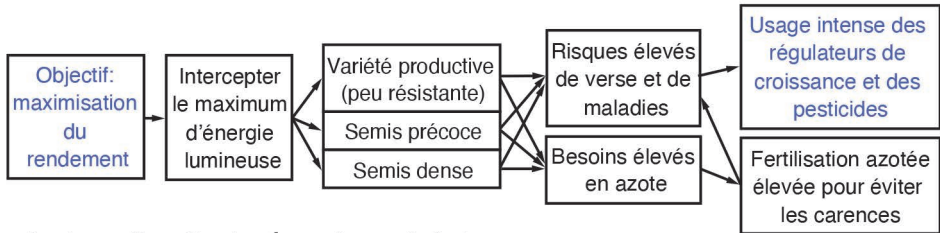
En culture maraîchère sous abri, la combinaison d'un allongement des rotations, de la pratique d'associations d'espèces, de l'introduction d'auxiliaires, de la solarisation et de diverses mesures de réduction de l'inoculum permet, comme l'ont montré Lefèvre *et al.* (2020), de maîtriser les maladies et ravageurs tout en réduisant fortement l'usage de pesticides. Dans le cas des cultures pérennes comme la vigne, certains leviers comme les rotations ne peuvent tout simplement pas être mis en œuvre et les décalages de cycle sont limités et incertains. Mais d'autres pratiques alternatives existent, telles que l'effeuillage, l'enherbement maîtrisé, l'utilisation de la confusion sexuelle, l'épamprage et l'ébourgeonnage³ pour réduire les pesticides, ou encore le choix de cépages résistants au mildiou et à l'oidium lors du renouvellement des vignes (Barbier *et al.*, 2011).

Enfin, ce raisonnement suppose la disponibilité de connaissances nouvelles, sur les alternatives techniques et sur les processus biologiques à valoriser, largement délaissées jusqu'à présent, car les agronomes s'étaient focalisés, dans la seconde moitié du xx^e siècle, sur la gestion de l'eau, de la matière organique et des éléments minéraux (Caron *et al.*, 2014). Pour réussir la prophylaxie, les connaissances actuelles sont encore fragmentaires sur les espèces de diversification, sur les plantes compagnes de service, sur les effets allélopathiques de certaines espèces végétales, sur les systèmes naturels de défense des plantes et la manière de les activer, sur les effets des infrastructures agroécologiques envers les ravageurs et les auxiliaires des cultures, sur les effets de différentes pratiques et combinaisons de pratiques, sur les conditions de mise en place et de maintien dans le temps des régulations biologiques des insectes ravageurs des cultures. De même, des travaux récents montrent l'intérêt d'une approche globale du fonctionnement des plantes. Ainsi, à partir d'une large revue de la littérature, Husson *et al.* (2021) montrent que le développement et les attaques de bioagresseurs sont corrélés aux variations spatio-temporelles de l'homéostasie E_h (potentiel redox) – pH (potentiel hydrogène) dans les plantes. Les recherches sur cet équilibre E_h – pH devraient être accrues, car cette homéostasie pourrait devenir

3. L'épamprage qui consiste à éliminer les rameaux non fructifères qui poussent sur la souche ou le porte-greffe, et l'ébourgeonnage, qui consiste à supprimer tous les bourgeons ou début de rameaux indésirables, permettent une meilleure aération de la végétation et un meilleur état sanitaire en réduisant notamment le risque de contaminations primaires telles que le mildiou.

un outil très puissant pour développer un raisonnement systémique de la santé du sol, des plantes, des cultures, des animaux, dans une approche One Health.

Logique passée visant la production maximale :



Logique alternative basée sur la prophylaxie :

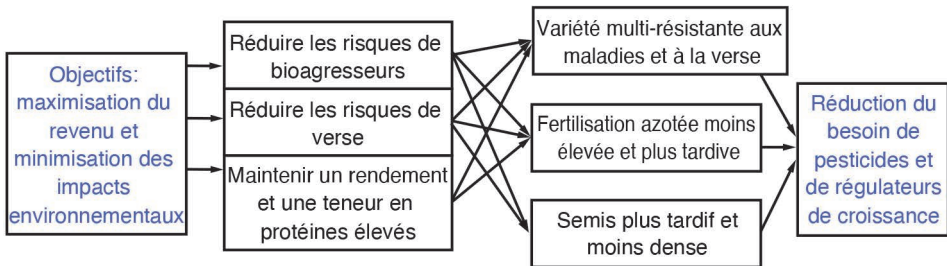


Figure 3.1. Logiques de raisonnement de la conduite de la culture du blé, basées soit sur le recours non limitant aux intrants (logique passée visant la production maximale), soit sur la réduction du recours aux intrants (logique alternative basée sur le recours à la prophylaxie)

À retenir

En France, la plupart des systèmes de culture actuels dépendent fortement des pesticides, pour obtenir la production maximale et/ou maîtriser la qualité des produits. Cependant, les situations d'impasse se multiplient, telles que les résistances de bioagresseurs aux pesticides, les explosions de populations de bioagresseurs dans des monocultures ou des rotations courtes. Pour sortir de la dépendance aux pesticides qui caractérise l'agriculture actuelle, tout en assurant une production élevée, il est indispensable de mobiliser les régulations biologiques, en combinant différentes échelles d'action (plante, peuplement, parcelle, paysage). Pour transformer en profondeur les pratiques, il est donc essentiel de mettre en œuvre une approche systémique, visant à réduire les risques de bioagresseurs en amont de leur émergence, en promouvant la prophylaxie via des combinaisons de pratiques valorisant les conditions locales, et en s'appuyant sur une redéfinition des résultats attendus des agroécosystèmes et des critères de leur évaluation.

► Les solutions agronomiques existantes pour réduire et supprimer l'usage des pesticides

Diversifier les rotations, les assolements et les paysages

L'allongement des rotations est un levier très efficace pour réduire l'usage des pesticides, comme en atteste la mobilisation fréquente de cette pratique dans les systèmes en AB. Dans les systèmes d'agriculture conventionnelle, on a pu également observer des IFT moins élevés (jusqu'à 30 % de réduction) sur les cultures incluses dans des successions longues (ex. de la Bourgogne, tableau 3.1). Or, les successions de cultures se sont beaucoup raccourcies depuis les années 1970, et cette tendance se poursuit, même si elle tend à ralentir (Mignolet *et al.*, 2004 ; Schott *et al.*, 2010). Ainsi, par exemple, dans certains départements, des cultures de blé succèdent à du blé dans plus de 20 % des cas, encore en 2017 (d'après le registre parcellaire graphique (RPG) 2018-2019 ; IGN, 2021). Parmi les leviers mobilisables dans la diversification des cultures, l'alternance entre cultures d'hiver et de printemps permet de varier les dates de semis, avec un effet fort sur la nature des adventices levées (Chauvel *et al.*, 2001) et constitue donc une technique efficace pour contrôler les adventices (Chikowo *et al.*, 2009). Introduire une espèce d'une famille différente dans la rotation permet de rompre les cycles des pathogènes susceptibles de se développer dans la parcelle. Ainsi, des rotations moins chargées en céréales conduisent à des risques moins élevés de piétin-verse, fusarioses du pied, piétin-échaudage (Colbach *et al.*, 1997) et de certaines adventices, ray-grass et vulpin en particulier (Chauvel *et al.*, 2001).

Tableau 3.1. Comparaison des IFT par catégorie (herbicide, fongicide, insecticide) ou total, dans des successions courtes (colza et céréales à paille) ou plus diversifiées (avec protéagineux), et pour des cultures (colza et blé) insérées dans ces successions. Exemple de la Bourgogne. Source : SSP – Agreste (2017)

	IFT_Herbicide	IFT_Fongicide	IFT_Insecticide	IFT_Total
Successions				
Colza – céréales à paille	1,77	1,30	0,73	3,81
Avec protéagineux	1,43	1,22	0,77	3,42
Différence	- 19 %	- 6 %	+ 5 %	- 10 %
Colza				
Dans une succession colza – céréales à paille	2	1	2,5	5,6
Dans une succession avec protéagineux	1,8	1	1,9	4,7
Différence	- 10 %	=	- 25 %	- 16 %
Blé tendre				
Dans une succession colza – céréales à paille	1,7	1,3	0,2	3,2
Dans une succession avec protéagineux	1,6	0,9	0,2	2,7
Différence	- 1 %	- 32 %	=	- 15 %

Dans les années 1990, le retour très fréquent du pois protéagineux dans les mêmes parcelles de certains départements du Bassin parisien, a conduit à des infestations d'une maladie racinaire due à *Aphanomyces euteiches*, qui empêche aujourd'hui de cultiver du pois dans les parcelles atteintes. Le même problème apparaît dans les régions où la lentille sous label (AOC, AOP) est cultivée, sa rentabilité élevée conduisant les producteurs à raccourcir les rotations en cultivant la lentille plus souvent sur les mêmes parcelles, la surface éligible au signe de qualité étant limitée par l'aire d'appellation, de petite taille. Au contraire, introduire un pois ou une autre légumineuse dans une rotation courte (encadré 3.2), exclusivement à base de céréales et oléagineux (la rotation colza-blé-orge, très fréquente en France), contribue à limiter plusieurs bioagresseurs, notamment les adventices et certaines maladies telluriques, et permet de réduire les pesticides appliqués (Carrouée *et al.*, 2012). Dans le sud du Bassin parisien, c'est parfois la betterave qui joue cette fonction de diversification. Le même effet de la diversification des espèces cultivées dans la rotation est observé sur les légumes en France (Puech *et al.*, 2021), ou dans les systèmes de grande culture de la pampa argentine, où la diversification (par rapport à la quasi-monoculture de soja qui domine les assolements) permet de réduire l'usage du glyphosate, mais aussi des autres herbicides, mobilisés pour faire face aux adventices devenues résistantes au glyphosate (Salembier *et al.*, 2016).

À l'échelle du paysage, les exemples sont nombreux montrant l'effet de la diversité des systèmes de culture et de la présence d'habitats semi-naturels sur la réduction des bioagresseurs. En effet, les mosaïques de systèmes de culture, en créant une hétérogénéité fonctionnelle des paysages cultivés, aussi bien spatiale que temporelle, liée à la diversité de la phénologie des cultures, de leur cycle de croissance, des techniques qui leur sont appliquées et de leur succession, jouent un rôle clé sur les processus écologiques, en particulier la régulation biologique des ennemis des cultures, par la dynamique des populations d'arthropodes (Vasseur *et al.*, 2013). Ainsi, par exemple, une fréquence moins élevée de colza dans une petite région agricole est corrélée avec un usage moins élevé de pesticides sur chaque parcelle de cette culture (Schott *et al.*, 2010 ; figure 3.2), la multiplication des bioagresseurs étant défavorisée par la fréquence moins élevée des cultures hôtes dans le paysage. Par ailleurs, une proportion plus élevée de forêts et d'habitats semi-naturels dans le paysage, ainsi que la fréquence de champs où le colza, cultivé l'année précédente, est suivi d'un travail du sol réduit (permettant de ne pas détruire les auxiliaires qui passent une partie de leur cycle de vie dans le sol) expliquent un contrôle biologique plus efficace des méligèthes (insectes ravageurs du colza) par les auxiliaires dans ces parcelles (Rusch *et al.*, 2012). En viticulture, les vols d'*Eudemis* et *Cochylis*, et les applications d'insecticides pour réduire leurs impacts, sont beaucoup plus fréquents dans des paysages simplifiés, comparés à des paysages dans lesquels la vigne est entourée d'habitats semi-naturels (Paredes *et al.*, 2021). En arboriculture, la composition du paysage a un fort effet sur la présence des bioagresseurs tels que le carpocapse du pommier (Ricci *et al.*, 2009).

Ainsi, l'implantation d'infrastructures agroécologiques (bandes fleuries, haies) vise à favoriser le maintien, la multiplication et l'efficacité des auxiliaires des cultures, dans le but d'assurer un contrôle des ravageurs présents dans les cultures. Pour accroître leur efficacité, c'est-à-dire permettre une lutte biologique par conservation (Landis *et al.*, 2000), tout en minimisant les effets préjudiciables sur la culture, il est

indispensable de bien raisonner la composition de ces infrastructures, ainsi que la conduite des cultures voisines. Ainsi, un assortiment végétal de dix essences (choisies sur la base de la connaissance de leur peuplement entomologique) dans une haie en bordure de verger de poiriers, a favorisé le maintien d'un cortège diversifié d'auxiliaires actifs contre le psylle du poirier, un des principaux bioagresseurs du poirier (Simon *et al.*, 2009). La combinaison des essences a permis de fournir à divers groupes d'auxiliaires une succession de ressources et d'habitats : abris d'hivernation (essences à feuilles persistantes), de la nourriture à des périodes où elle est rare et qualitativement importante pour la reproduction (pollen d'essences à floraison précoce), des proies de substitution (phytophages spécifiques de certaines essences), nectar et pollen tout au long de la saison. Ainsi, la composition de ces infrastructures doit être raisonnée précisément pour assurer la disponibilité et l'accessibilité des ressources en quantité et qualité suffisantes, tout au long de l'année, ainsi que les conditions permettant de favoriser un habitat et un microclimat favorables, conditions indispensables à la gestion des communautés d'arthropodes susceptibles d'assurer un contrôle efficace des insectes bioagresseurs (Gardarin *et al.*, 2018). Le rôle déterminant du paysage conduit à la nécessité de conduire des réflexions collectives à l'échelle de territoires pour concevoir des paysages nouveaux favorisant les régulations, et résilients aux bioagresseurs émergents.

Une synthèse des effets de diversification et de réduction de la taille des parcelles, et de la présence d'espaces semi-naturels, conduisant à une plus grande hétérogénéité des paysages, a été proposée par Sirami *et al.* (2019). En observant sept taxons (plantes, abeilles, papillons, syrphes, carabes, araignées et oiseaux) dans 435 paysages, ces auteurs montrent que les chaînes trophiques riches permettent plus de régulation. On y retrouve l'ensemble des éléments soulignés dans les différents exemples, avec la mise en évidence de relations non-linéaires et de nombreuses interactions entre les leviers qui conduisent à une hétérogénéité des paysages agricoles. Ceci montre l'importance de concevoir des paysages favorables aux régulations (Tschardtke *et al.*, 2021).

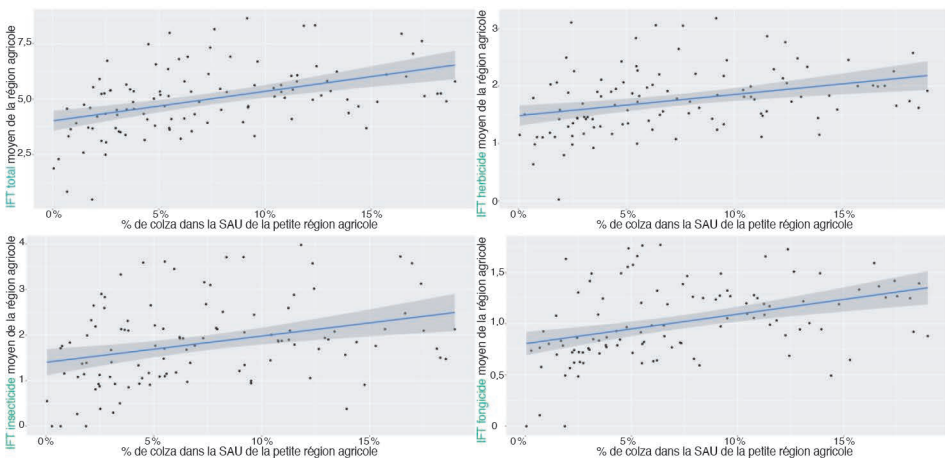


Figure 3.2. Relation entre la proportion de colza dans la SAU par petite région agricole (abscisse) et l'indice de fréquence de traitements phytosanitaires par parcelle de colza (IFT). Sources : SSP – Agreste (2017) et IGN (2021)

Encadré 3.2. Le projet de recherche SPECIFICS : conception de systèmes de culture sans pesticides et riches en légumineuses à graines (PPR CPA – 2020/2026)

L'objectif de SPECIFICS est d'identifier et d'évaluer différents leviers permettant la transition vers des systèmes de grande culture sans pesticides et incluant des légumineuses à graines en recherchant de nouvelles sources de résistance, en intégrant davantage de diversité biologique dans le temps (rotation) et dans l'espace (cultures associées intra et interspécifiques, infrastructures agroécologiques, etc.), en étudiant des solutions de valorisation et de promotion de ces systèmes. Le projet réunit agronomes, généticiens, pathologistes, entomologistes, écologues, économistes et sociologues pour concevoir des variétés, conduites, itinéraires techniques, modes de valorisation et de conseil qui permettront d'atteindre les objectifs de durabilité économique et agronomique des systèmes de culture sans pesticides et intégrant une part importante de légumineuses à graines. Les expérimentations s'appuient notamment sur des plateformes expérimentales en agroécologie, dans lesquelles des systèmes de culture sans pesticides et riches en légumineuses sont largement mis en œuvre, ainsi que sur un large dispositif d'enquêtes et de traitement de données économiques.

Le projet combine trois approches à trois échelles différentes, pour fournir des outils et recommandations à tous les acteurs impliqués dans la transition : (1) au niveau de la plante, il s'agit de travailler sur les résistances variétales des légumineuses pour contrôler une diversité de maladies ou de ravageurs, depuis la production de connaissances sur les locus, gènes, mécanismes et traits de protection des plantes jusqu'à la conception de variétés résilientes vis-à-vis des bioagresseurs, et leur évaluation multicritère ; (2) au niveau du système de culture, le prototypage et l'évaluation de systèmes innovants visant à réduire drastiquement les pesticides seront mis en œuvre pour analyser la coévolution des cultures, des bioagresseurs et des auxiliaires dans les systèmes basés sur la biodiversité cultivée et associée ; (3) au niveau des systèmes agricoles et alimentaires, une analyse des verrouillages permettra de comprendre les freins et leviers au déploiement de systèmes de culture sans pesticides riches en légumineuses, et de définir des incitations solides pour les parties prenantes (INRAE, 2021a).

Introduire de la diversité dans les variétés et les espèces cultivées au sein des parcelles

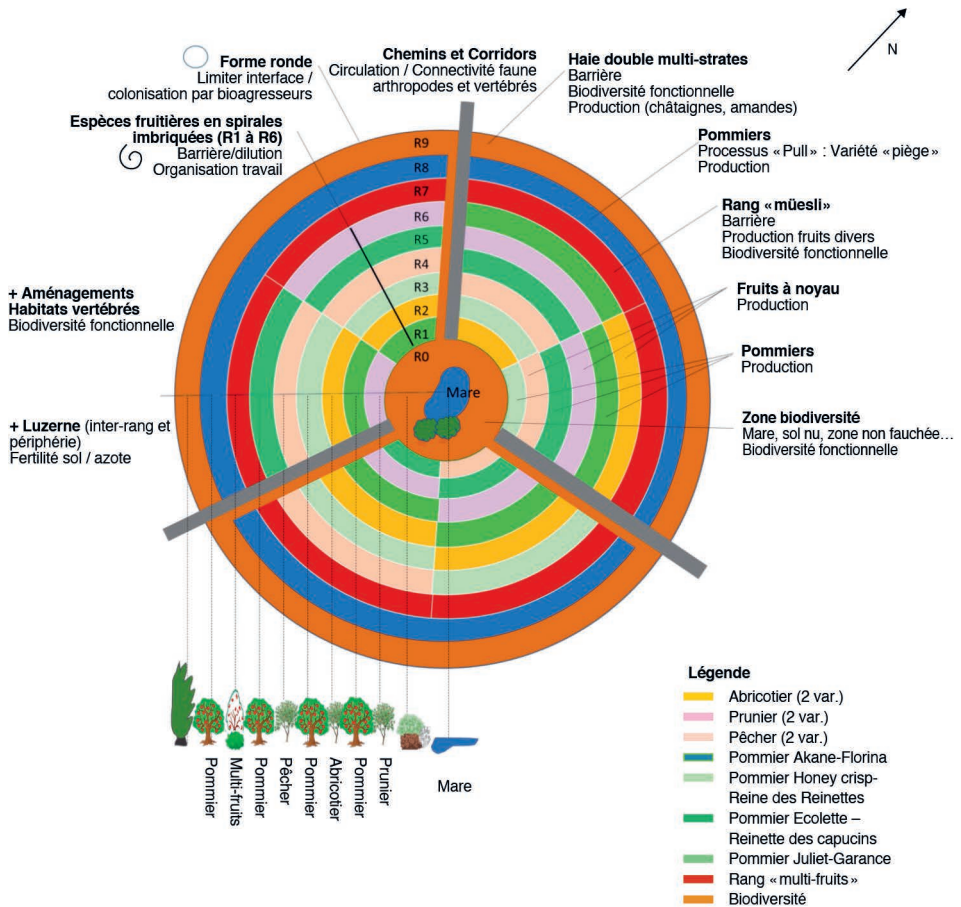
La mise en place de successions diversifiées est un moyen très efficace (au moins en cultures annuelles) de réduire les pesticides, mais cela suffit rarement, rendant nécessaire le recours à des moyens supplémentaires. L'introduction de variétés résistantes dans les parcelles constitue un autre levier efficace pour réduire l'usage de pesticides, en particulier de fongicides (Loyce *et al.*, 2008 ; Pertot *et al.*, 2017). Ainsi, en système viticole, la mise en place de cépages résistants a progressé ces dernières années, permettant une réduction drastique des IFT fongicides de 80 % à 90 % (Delière *et al.*, 2017). Toutefois, la fréquence et l'organisation spatiale des gènes de résistance dans le paysage, ainsi que les pratiques culturales ayant un effet sur les capacités d'évolution génétique des bioagresseurs, doivent être raisonnées pour ne pas favoriser des contournements de résistance, mais maintenir des résistances durables (Aubertot *et al.*, 2006 ; Delière *et al.*, 2017 ; Papaïx *et al.*, 2013).

Pour favoriser une multi-résistance des couverts végétaux à la diversité des bioagresseurs susceptibles de les infester dans la région, la culture d'associations de variétés, choisies pour leurs résistances complémentaires, est également très efficace, et permet de maintenir, voire d'accroître légèrement le rendement (Borg *et al.*, 2018 ; de Vallavieille-Pope *et al.*, 2006). Cette technique a été imposée dans les années 1990 sur l'orge de printemps dans l'est de l'Allemagne, conduisant ainsi à une réduction massive des pesticides. Elle a également été très utilisée en Chine sur le riz, avec pour conséquence une réduction du nombre de traitements fongicides de sept à zéro, une réduction très significative de la sévérité de la pyriculariose, et un accroissement du rendement (Zhu *et al.*, 2000), ainsi que sur le caféier en Colombie, pour lutter contre la rouille orangée. En France, malgré l'efficacité de cette technique, démontrée sur le blé contre les rouilles et la septoriose (de Vallavieille-Pope *et al.*, 2006), sur le pommier pour contrôler la tavelure (Parisi *et al.*, 2004), sur les saules contre la rouille, et sur la pomme de terre contre le mildiou (Pilet, 2003), elle est, jusqu'à présent, peu mobilisée par les agriculteurs. Plusieurs raisons expliquent cela : des freins de la part des collecteurs et des premiers transformateurs industriels, qui préfèrent travailler des variétés pures, mieux adaptées aux processus de transformation actuels, et un manque d'adaptation de la réglementation liée à la transformation et à la commercialisation des variétés, privilégiant les variétés pures (Guichard *et al.*, 2017). La réglementation permettant la commercialisation de mélanges de variétés a été adoptée en France dès 2004 pour les espèces fourragères, mais seulement à la fin des années 2010 pour les espèces agricoles annuelles. Par ailleurs, des décalages phénologiques trop importants peuvent perturber la récolte. En viticulture, on rencontre les mélanges de variétés dans des systèmes à fort recours de main d'œuvre, plutôt que dans ceux qui sont fortement mécanisés. Cependant, l'usage des associations variétales augmente : alors qu'elles couvraient moins de 1 % de la sole de blé en 2010, elles représentaient plus de 12 % de celle-ci en 2020 (FranceAgriMer, 2020 ; Arvalis, 2021).

Une autre pratique très efficace pour maîtriser un large spectre de bioagresseurs par le couvert consiste à associer des espèces différentes (Stomph *et al.*, 2020). Le contrôle peut alors être lié à différents mécanismes : dilution de la densité de l'hôte (pour les maladies et insectes), modification du microclimat dans le couvert, effet barrière freinant la dispersion physique du pathogène, ou compétitivité temporelle et spatiale accrue (cas des adventices). En grande culture, même s'ils restent rares, des mélanges d'espèces intégrant souvent des légumineuses sont cultivés, en particulier chez les agriculteurs bio où ils constituent également un moyen pour cultiver des légumineuses, dont la réussite est plus aléatoire en culture pure (Lamé *et al.*, 2015 ; Verret *et al.*, 2020).

Si le mélange de variétés et d'espèces se répand en grande culture, il est encore très rare (voire quasi inexistant) dans les autres systèmes agricoles (viticulture, arboriculture, maraichage), notamment dans des contextes où les contraintes imposées par les acteurs de l'aval ou les signes de qualité sont très fortes. Cependant, des innovations sont explorées par la recherche pour repenser la diversité végétale dans les vergers dans le but de « casser » la monotonie génétique. C'est l'exemple du verger expérimental Z (Simon *et al.*, 2017 ; Penvern *et al.*, 2018), dispositif multi-espèces et multi-variétés (pommiers, fruits à noyau et à coque, petits fruits, etc.), dont la

conception très innovante vise à rendre l'espace de production hostile aux bioagresseurs, grâce à la nature et à l'organisation spatiale et temporelle de ces espèces et variétés, ainsi qu'à l'introduction d'infrastructures agroécologiques dans ce verger à la forme circulaire (figure 3.3). De même, des vergers-maraichers, mixant espèces maraichères et fruitières, émergent dans les fermes mais posent encore des questions de travail et de rentabilité à court et long terme (Paut *et al.*, 2021a).



Réalisation : Équipe SaVAGE, INRA Gotheron-mars 2018

Figure 3.3. Description du verger Z, conçu pour favoriser la régulation des bioagresseurs, implanté depuis 2018 à l'Unité Expérimentale INRAE de Gotheron. L'objectif général a été de créer un espace de production de fruits « suppresseur » vis-à-vis des bioagresseurs, en utilisant la biodiversité et l'agencement spatial pour limiter l'arrivée, l'installation, le développement et enfin la dispersion des bioagresseurs des fruitiers. Dans ce verger conduit sans pesticides, les principaux leviers d'action sont des effets barrière-dilution, un matériel végétal fruitier diversifié et peu sensible à certains bioagresseurs, la prophylaxie et un renforcement de la prédation par la plantation et l'aménagement de zones de biodiversité favorisant auxiliaires vertébrés et invertébrés. Chaque cercle vise plusieurs fonctions listées sur la figure, et chaque fonction est assurée par plusieurs composantes. Ce verger, co-conçu avec des acteurs du territoire, a été implanté début 2018 sur une surface totale de 1,7 hectare.

Pour contribuer à une forte réduction de l'usage de pesticides, la conduite des associations variétales ou plurispécifiques doit également être adaptée. Ainsi, les associations variétales de blé ne sont fréquemment choisies que dans le but de simplifier l'organisation du travail et stabiliser le rendement et la qualité des récoltes à l'échelle de l'exploitation agricole, et ne sont alors pas accompagnées d'une réduction significative de l'usage de pesticides. Comme le soulignent de Vallavieille-Pope *et al.* (2006) et Jeuffroy *et al.* (2010), les associations variétales sont d'autant plus efficaces pour réduire les pesticides que l'on réduit la densité de semis et la fertilisation azotée précoce, voire que l'on retarde la date de semis, pour réduire les risques de maladies. De même, en verger de pommiers, une réduction significative de l'usage de pesticides suppose de combiner les variétés résistantes ou peu sensibles aux maladies avec des méthodes agronomiques telles que le désherbage mécanique du rang d'arbres et la lutte biologique (confusion sexuelle, lutte microbiologique), la gestion de l'architecture des arbres par la taille pour favoriser l'aération à l'intérieur de l'arbre et limiter l'humidité, ainsi qu'une couverture végétale des allées du verger et des haies multi-espèces de bordure pour fournir des ressources et un habitat aux auxiliaires (Simon *et al.*, 2017).

À côté des plantes récoltées pour leur production, l'introduction de plantes de services, non récoltées mais cultivées (et donc choisies) pour les services qu'elles rendent à l'agroécosystème, est également une pratique favorisant l'introduction de biodiversité cultivée, susceptible de contribuer à réduire l'usage de pesticides. Ces plantes de services, cultivées entre deux cultures récoltées (ou en partie pendant leur cycle), permettent de produire simultanément différents services écosystémiques, avec plus ou moins d'efficacité, en fonction des espèces semées, de leur mode de gestion, de la situation pédoclimatique et des cultures de vente auxquelles elles sont liées. Les services produits concernent (i) la gestion de l'azote (effet piège à nitrate), (ii) la protection du sol contre l'érosion, (iii) le stockage de carbone, (iv) la réduction des bioagresseurs (mauvaises herbes, pathogènes), (v) la pollinisation, (vi) l'esthétique du paysage. Ainsi, par exemple, l'association de colza avec des légumineuses gélives, semées en même temps, peut permettre de réduire les adventices (grâce à la compétitivité du couvert ; Lorin *et al.*, 2015 ; 2017), et certains insectes (grâce à un effet de confusion olfactive ou visuelle des plantes compagnes, qui détourneraient les insectes de leur cible ; Breitenmoser *et al.*, 2020), conduisant à une réduction de l'usage des herbicides et insecticides. Des effets de biocontrôle sont également atteints dans des associations de cultures intermédiaires légumineuses-crucifères par différents mécanismes : effets allélopathiques, mélanges de plantes hôtes et non hôtes et cultures pièges, couverture du sol et utilisation des ressources abiotiques, enrichissement en matières organiques. Mais les processus sous-jacents doivent être étudiés de manière plus approfondie pour pouvoir être efficacement mobilisés via des techniques adaptées (Couëdel *et al.*, 2017). En arboriculture, la gestion du couvert de service peut être raisonnée pour contrôler les bioagresseurs. Ainsi, par exemple, un couvert de trèfle blanc sur le rang de pêcheurs permet non seulement de contrôler les adventices, mais également de limiter le développement des monilioses sur les fruits (pourriture de la pêche) en favorisant un grossissement régulier du fruit, limitant ainsi la formation de microfissures de l'épiderme, qui sont des portes d'entrée pour les spores du champignon (Mercier *et al.*, 2008).

Gérer les bioagresseurs par le travail du sol

Le travail du sol a des effets bien connus sur les adventices : en particulier le labour qui, en enfouissant les graines profondément, induit la perte de tout ou partie de leur capacité germinative avant qu'elles ne soient remontées à la surface par un labour ultérieur (Colbach *et al.*, 2000). Cependant, dans le cas d'adventices ayant un taux annuel de décroissance faible, le nombre d'adventices viables après plusieurs années d'enfouissement peut rester élevé, limitant ainsi l'effet de labours fréquents sur le contrôle de ces adventices. Des effets similaires sont observés sur les pathogènes du sol. Dans le cas du phoma du colza (maladie cryptogamique) par exemple, l'enfouissement des résidus de culture permet de limiter les infestations aériennes liées à la diffusion des spores, avec des effets plus ou moins forts selon les outils de travail du sol mobilisés (Schneider *et al.*, 2006). Ainsi, la comparaison de différents scénarios de mosaïques de systèmes de culture visant à contrôler le phoma du colza a montré que le labour était plus efficace que la gestion spatiale des variétés (selon leur résistance) pour gérer la maladie et la durabilité des résistances (Hossard *et al.*, 2018). Cependant, selon la succession de cultures, le labour peut aussi avoir un effet inverse et favoriser les bioagresseurs : par exemple dans le cas du piétin-verse du blé, Colbach et Meynard (1995) ont montré que si le labour suit une culture hôte, il permet d'enfouir l'inoculum primaire, protégeant ainsi la culture hôte suivante, tandis que, si la culture précédente n'est pas hôte de ce pathogène, mais que l'anté-précédente l'est, alors le labour remonte l'inoculum à la surface, augmentant ainsi le risque d'infestation de la culture suivant le labour. Notons que la mobilisation du labour comme moyen de contrôle des bioagresseurs doit également être raisonnée en tenant compte de ses effets sur l'activité biologique du sol.

Il existe différents outils de travail du sol, ayant des effets variés sur l'inversion des horizons du sol et sur l'enfouissement des graines ou des résidus de culture existant en surface après la récolte (Schneider *et al.*, 2006). Des déchaumages répétés, après levée des adventices, sont efficaces pour détruire les cohortes de plantules, mais ont l'inconvénient d'assécher le sol pendant la période estivale où les pluies sont généralement plus rares, ce qui peut entraver la levée des cultures suivantes (par exemple le colza). En AB, mais également de plus en plus fréquemment en systèmes conventionnels, pour réduire l'usage d'herbicides, différents outils de désherbage mécanique sont utilisés pour détruire les plantules de mauvaises herbes qui lèvent en cours de culture : herse étrille, houe rotative, bineuse, scalpeur, moulinets, etc. Cependant, ils ne suffisent généralement pas et sont plutôt mobilisés comme des outils complémentaires des autres techniques visant, en amont, à réduire les populations d'adventices (Casagrande *et al.*, 2009). Pour une contribution efficace au contrôle des bioagresseurs, le raisonnement du travail du sol ne peut donc être indépendant des autres pratiques culturales et de l'état de la parcelle, et devra être ajusté au cas par cas.

Étant donné les multiples effets du travail du sol sur les bioagresseurs, le contrôle de ces derniers devient compliqué dans les systèmes « sans travail du sol », dont l'objectif environnemental premier est la préservation de la qualité du sol en maximisant la restitution de matière organique dans les horizons de surface. Ces systèmes sans travail du sol se développent actuellement, car ils limitent le temps de travail

et l'énergie consommée, favorisent la biodiversité microbienne et la fertilité du sol (Zuber et Villamil, 2016), réduisent l'érosion et, lorsque le non travail du sol est associé à une couverture du sol quasi permanente comme en agriculture de conservation des sols (ACS, Scopel *et al.*, 2013), améliorent le stockage de carbone dans le sol. L'AB de conservation (systèmes dits « ABC ») est un véritable challenge, du fait de la difficulté de maîtrise des adventices (Vincent-Caboud *et al.*, 2017). La culture de couverts végétaux est souvent mobilisée dans ces systèmes, dans le but de créer une forte compétition vis-à-vis des adventices pendant le cycle du couvert, puis de limiter la germination des graines d'adventices, grâce au mulch constitué par les résidus végétaux laissés en surface (Peigné *et al.*, 2015). Toutefois, un couvert mal implanté, peu compétitif vis-à-vis des adventices et des repousses de céréales peut favoriser le développement du stock de semences d'adventices et la multiplication de l'inoculum de piétin-échaudage (Ennaifar *et al.*, 2005). Les difficultés techniques relatives à la gestion du couvert sont nombreuses dans de tels systèmes : en particulier l'établissement du couvert doit être rapide et sa croissance forte pour assurer les effets attendus, ce qui renvoie aux choix des espèces et variétés, de la date et densité de semis, de la date de destruction, et à la disponibilité en azote et en eau (Vincent-Caboud *et al.*, 2019). Le caractère critique de ces choix exige une adaptation fine non seulement à la parcelle mais aussi à l'année. Pour favoriser la couverture quasi permanente du sol, les associations-relais constituent une solution intéressante (Amossé *et al.*, 2013), mais leur conduite suppose une excellente maîtrise technique : il s'agit soit (i) de semer le couvert dans la culture de rente, de manière à ce qu'il soit bien installé au moment de la récolte de cette dernière, tout en évitant une compétition trop forte entre la culture et le couvert pendant la période d'association, soit (ii) de semer la culture de rente dans le couvert non encore détruit, limitant au maximum les périodes où le sol nu pourrait favoriser l'émergence et le développement d'adventices. Cette dernière technique nécessite du matériel spécifique et adapté (Vincent-Caboud *et al.*, 2019). L'objectif de réduction des pesticides, notamment des herbicides, a ainsi conduit à un changement de posture qui se traduit, entre autres, dans le vocabulaire employé : là où on gérait les mauvaises herbes, il s'agit maintenant de gérer une végétation associée de façon à maximiser ses bienfaits et limiter les concurrences avec la culture principale. Ainsi, au-delà du rôle premier de réduction des herbicides, le maintien d'un couvert dans les cultures pérennes en rangs limite l'érosion, ou encore permet aux opérateurs de rentrer plus rapidement dans la parcelle après des pluies.

Connaître les nombreux autres leviers mobilisables

À côté de ces leviers les plus connus, de nombreuses autres techniques ont des effets sur les bioagresseurs et peuvent être mobilisées pour réduire l'usage de pesticides. L'efficacité de leurs effets nécessite un raisonnement basé sur les caractéristiques biologiques des bioagresseurs visés (tableau 3.2 ; Meynard *et al.*, 2003 ; Chauvel *et al.*, 2001). Ces techniques ne sont pas toujours disponibles et faciles d'accès pour les praticiens.

Jouer sur la date de semis pour éviter certains bioagresseurs est, par exemple, une technique efficace sur plusieurs cultures annuelles. Sur les cultures de blé, le retard

de la date de semis permet, en interaction avec l'humidité du sol, de réduire considérablement les levées de vulpin (Colbach *et al.*, 2005), l'une des adventices les plus fréquentes et les plus préjudiciables aujourd'hui sur cette culture. Ce retard permet également d'échapper aux vols de pucerons d'automne, souvent vecteurs de virus, et de réduire les contaminations du blé par des maladies dès l'automne, limitant l'épidémie au printemps suivant (Colbach *et al.*, 1997). L'avancement des semis du blé dans les années 1970-1980, visant un accroissement de l'énergie lumineuse interceptée et donc du rendement, n'a été permis, rappelons-le, que par la disponibilité des pesticides (Meynard et Girardin, 1991). Avancer le semis du colza (Dejoux *et al.*, 2003), dans des situations de disponibilité élevée en azote, (i) favorise la compétition de la culture vis-à-vis des adventices, grâce à une croissance et une absorption d'azote fortes à l'automne, (ii) réduit les attaques de phoma, en décalant les périodes de sensibilité de la culture et de diffusion des spores du pathogène, et (iii) réduit les dégâts de limaces, du fait du climat souvent plus sec en été, défavorable à l'activité des limaces, et du plus fort indice foliaire développé par les plantes en septembre-octobre, lorsque les conditions d'humidité deviennent favorables aux limaces.

Réduire la nutrition azotée des cultures est souvent un moyen efficace pour limiter les bioagresseurs. Ainsi, limiter la disponibilité d'azote dans le sol défavorise la croissance des adventices nitrophiles (Singh *et al.*, 2017), mais décroît la capacité de la culture à être compétitive vis-à-vis des adventices (Kristensen *et al.*, 2008). Une culture plus riche en azote favorise la multiplication des pucerons, qui y trouvent une alimentation plus équilibrée. L'augmentation de la fertilisation azotée du colza favorise également le développement du phoma (Aubertot *et al.*, 2004), sauf si la culture est semée précocement, réduisant sa sensibilité aux attaques lors des périodes de flux de spores (Dejoux *et al.*, 2003). Le lien entre nutrition azotée, vigueur et attaques fongiques est bien connu dans les systèmes viticoles : plus la vigne est vigoureuse, plus elle produit de feuilles, plus elle est sensible aux attaques fongiques (Valdes-Gomez *et al.*, 2011).

L'effeuillage raisonné de la vigne modifie le microclimat au sein du couvert, réduisant ainsi la durée d'humectation des organes aériens, et donc la germination des spores de champignons parasites tels que le botrytis (Fernaund *et al.*, 2001). De même, la conduite centrifuge des pommiers, par rapport à une conduite plus classique en axe, réduit les infestations de pucerons cendrés et du tétranyque rouge du pommier (un acarien), les effets sur pucerons verts étant plus variables (Simon *et al.*, 2009).

Enfin, les effets allélopathiques de certaines espèces (crucifères, avoine, sorgho par exemple) ont jusqu'à présent été peu étudiés, malgré leurs effets attendus sur des pathogènes du sol et des adventices (Couëdel *et al.*, 2017). La toxicité de molécules issues des résidus de ces cultures (par exemple certaines *Brassicaceae* sont à l'origine de la production d'isothiocyanates à effet fongicide) pourrait être mobilisée pour maîtriser certains bioagresseurs : il en est ainsi de l'insertion d'une culture intermédiaire de moutarde brune pendant la période d'interculture, pour lutter contre le rhizoctone de la betterave. Cependant, dans ce cas précis, les effets observés sont très variables, plus élevés si les résidus sont enfouis, la durée de la culture de moutarde plus longue et la biomasse produite plus élevée (Motisi *et al.*, 2009).

Tableau 3.2. Exemples de raisonnement des techniques agronomiques pour le contrôle de certains bioagresseurs (d'après Chauvel *et al.*, 2001 ; Valdes-Gomez *et al.*, 2011)

Bioagresseur	Caractéristiques biologiques du bioagresseur	Pratiques culturales proposées	Effets attendus de la pratique sur le bioagresseur
Vulpin (<i>Alopecurus myosuroides</i> Huds.)	Persistance courte des grains dans le sol Germination limitée aux premiers centimètres du sol et faible dormance Période d'émergence préférentielle en automne Espèce nitrophile, en compétition avec la culture pour l'azote	Labour profond avec inversion du sol après culture à forte production de graines de vulpin Travail du sol profond ; faux-semis Date de semis retardée ; introduction de cultures de printemps dans la rotation Faible apport d'engrais azotés	Augmentation de la mortalité des graines dans le sol Élimination, avant semis, des cohortes successives de plantules Décaler la période de germination préférentielle des graines Réduction de la production de graines
Mildiou de la vigne	Se développe avec un microclimat humide Se développe lorsque les grappes sont tassées Se développe sur feuilles jeunes et ceps vigoureux Se transmet par <i>splashing</i> du sol au cep	Pratique de l'écimage, rognage et effeuillage Aération des grappes par la taille, ébourgeonnage et égourmandage Pratique de l'écimage Pratique de l'enherbement	Baisse de l'humidité dans la zone des grappes, meilleure pénétration des produits de traitement Baisse de l'humidité dans la zone des grappes, meilleure pénétration des produits de traitement Réduction de la sensibilité de la plante Réduction des contaminations

Jouer sur les complémentarités entre cultures et élevages pour maîtriser les bioagresseurs

L'association culture-élevage est également un excellent levier pour réduire l'usage de pesticides. Ainsi, dans le réseau DEPHY, la présence d'élevage sur l'exploitation est une variable très discriminante du niveau d'usage de pesticides sur les parcelles cultivées (Lechenet *et al.*, 2016). Dans ces exploitations, c'est généralement la présence de prairies et de rotations plus longues qui expliquent ce résultat. L'introduction de prairies de moyenne durée dans les rotations est également utilisée en AB comme moyen de lutte contre les adventices. Cependant, l'efficacité de la prairie pour contrôler les mauvaises herbes suppose qu'elle soit fauchée régulièrement, pour éviter la grenaison des espèces qui la composent, ce qui pourrait, au contraire, favoriser les infestations. Dans ces fermes, le compostage du fumier

est également un moyen efficace pour inactiver les semences contenues dedans, et éviter d'ensemencer des parcelles avec des graines contenues dans le fumier.

La réintroduction d'animaux en grande culture, en verger ou viticulture, est également mobilisée par des agriculteurs innovants pour contrôler différents bioagresseurs, mauvaises herbes ou pathogènes du sol (Paut *et al.*, 2021b) : moutons pâturant les inter-rangs en vigne pour limiter la concurrence entre vigne et couvert semés et/ou adventices ; poules se nourrissant de larves potentiellement pathogènes en vigne ou vergers (Clark et Gage, 1996), broutage des jeunes chardons par des moutons, canards dans les rizières, porcs dans les vergers (Buehrer et Grieshop, 2014). Cependant, la maîtrise de ces techniques est encore balbutiante et devrait bénéficier de travaux de recherche. L'utilisation de canards dans les rizières pour le contrôle des adventices s'est largement répandue en Asie, avec des effets significatifs (Li *et al.*, 2012), mais des questions restent ouvertes : à quel stade de développement le riz doit-il être ? quel doit être l'âge des canards ? comment favorise-t-on l'apprentissage des canards ?

Apprendre à raisonner les combinaisons de pratiques pour maîtriser les bioagresseurs

L'existence d'une diversité de pratiques susceptibles de réduire les bioagresseurs, et donc l'usage de pesticides, ne suffit pas à atteindre l'objectif zéro pesticide. En effet, le choix des techniques qui seront combinées doit être raisonné au cas par cas, en fonction des caractéristiques des bioagresseurs visés et des autres composantes de la situation culturale. En particulier, il est indispensable de raisonner les synergies et les antagonismes entre leviers, ce qui n'est pas aisé dans un contexte de manque cruel de connaissances sur des processus biologiques et écologiques déterminants, longtemps délaissés par la recherche.

Pour contrôler le chardon sans herbicide, par exemple, plusieurs stratégies ont été étudiées : (1) limiter la dispersion, (2) affaiblir les réserves racinaires, (3) extraire les racines du sol, (4) accroître la compétition avec d'autres espèces cultivées, (5) détruire physiquement les plantes de chardon. Cependant, aucune des techniques, prises isolément, n'est suffisamment efficace pour assurer un contrôle du chardon satisfaisant sur le long terme. Ainsi que le soulignent Favrelière *et al.* (2020), des travaux sur les combinaisons de pratiques sont donc nécessaires, comme pour de nombreux autres bioagresseurs. Au contraire, sur le vulpin, les processus sont mieux connus et la combinaison d'un labour profond, après une culture ayant produit des graines de vulpin, d'un retard du semis de la céréale, de l'alternance de cultures de printemps et d'hiver dans la rotation et d'une réduction de sa fertilisation azotée permettent une très bonne maîtrise de cette adventice (tableau 3.2 ; Chauvel *et al.*, 2001).

De plus, l'effet des pratiques varie selon les bioagresseurs visés, et selon l'état de la culture ou du milieu. L'agriculteur doit gérer de nombreux bioagresseurs, sur les court et long termes, et il est souvent amené à faire des compromis, pour gérer les effets antagonistes. Ainsi, après un colza, il est conseillé de labourer pour contrôler le phoma, et enfouir les graines d'adventices, mais le labour réduit le contrôle biologique des méligèthes, en détruisant les auxiliaires nichant dans le sol.

Pour concevoir les systèmes bas pesticides, voire zéro pesticide, adaptés à la diversité des cortèges de bioagresseurs et des situations culturales, une intensification de l'effort de recherche en agronomie est indispensable, pour comprendre et modéliser les interactions entre les différentes pratiques de lutte et de prophylaxie. Tant que les connaissances sur ce sujet ne seront pas suffisamment développées pour permettre aux agriculteurs et à leurs conseillers de concevoir des systèmes de culture sans pesticides et des paysages suppressifs sans risque d'erreur ni accroissement de l'incertitude, ces acteurs auront du mal à renoncer aux pesticides, dont l'efficacité reste spectaculaire dans la majorité des cas. Pour atteindre ce graal, un renforcement des travaux des agronomes, et un renouvellement profond de leurs méthodes de travail sont nécessaires.

Encadré 3.3. Le projet de recherche VITAE, cultiver la vigne sans pesticides : vers des socio-écosystèmes viticoles agroécologiques (PPR CPA – 2020/2026)

Sortir des pesticides nécessite d'intégrer des combinaisons de leviers, souvent à effet partiel, et de passer d'une démarche curative à une démarche agroécologique basée sur la prévention et la résistance des agrosystèmes. La recherche se doit d'apporter des connaissances sur le fonctionnement des agrosystèmes pour identifier de nouvelles pistes crédibles et améliorer l'efficacité des innovations techniques aujourd'hui disponibles. Il s'agit également d'identifier les combinaisons de leviers les plus performantes à partir de situations déjà existantes dans la pratique.

Par une approche interdisciplinaire intégrant les acquis de la biologie, de l'agronomie, de l'écologie, de l'œnologie et des sciences économiques et sociales, VITAE aborde des fronts de recherche insuffisamment explorés jusqu'ici, tout en questionnant l'ampleur des changements sociaux nécessaires pour favoriser cette rupture agroécologique. Pour atteindre le zéro pesticide en viticulture, VITAE s'intéresse au développement du biocontrôle, à l'utilisation de la résistance génétique de la vigne, aux pratiques prophylactiques, à l'enherbement par des couverts choisis pour les fonctions qu'ils offrent à l'agrosystème, aux pratiques permettant de moduler le microclimat et la physiologie de la vigne, de manière à la rendre moins sensible aux bioagresseurs. VITAE aborde également le changement d'échelle et la prise en compte des déterminants de la transition. Enfin, un travail de prospective interdisciplinaire et participative générera des scénarios pour la sortie des pesticides à l'échelle des filières et des territoires (INRAE, 2021c).

À retenir

La diversification des rotations, des peuplements (associations variétales et spécifiques), et des paysages, la gestion de plantes de services et d'infrastructures agroécologiques, le recours raisonné à différentes modalités de travail et de non-travail du sol, le couplage entre productions végétales et animales, l'adaptation des dates de semis, des stratégies de fertilisation azotée, des modalités de taille ou d'effeuillage, sont autant de leviers mobilisables pour gérer, sans pesticides, les bioagresseurs. Mais leur effet sur la maîtrise des bioagresseurs ne réussira que (i) si ces techniques sont raisonnées de manière cohérente entre elles, de manière à jouer sur les fonctions qui affectent les bioagresseurs, (ii) si elles sont mises en œuvre en

cohérence avec les caractéristiques de la situation. La production de connaissances sur les effets de ces pratiques et de leurs combinaisons est donc indispensable pour alimenter les choix techniques des agriculteurs.

► Se passer de pesticides nécessite un renouvellement des méthodes de travail des agronomes et des connaissances à produire

Que cherche-t-on ?

Supprimer les pesticides dans les systèmes agricoles conventionnels suppose de changer en profondeur les pratiques agricoles. Dans ce but, il est nécessaire, d'une part, de se donner de nouveaux objectifs de résultats (dépassant le seul rendement maximum, qui a été longtemps privilégié) et de nouveaux critères d'évaluation, et, d'autre part, de mobiliser de nouvelles connaissances sur les processus de régulation naturelle, encore souvent méconnus (Caron *et al.*, 2014). De plus, les caractéristiques des systèmes à concevoir pour cultiver sans pesticides ne sont pas connues et sont extrêmement variables d'une situation à l'autre. Alors que les solutions de lutte chimique contre les bioagresseurs sont génériques et applicables à toutes les situations, les solutions fondées sur la nature doivent être adaptées aux caractéristiques spécifiques de la situation agricole (par exemple, les conditions pédologiques et climatiques, la chaîne de valeur, la charge de travail) (Médiène *et al.*, 2011 ; Meynard *et al.*, 2003 ; Rusch *et al.*, 2012). À ce jour, cependant, les effets des pratiques alternatives ont rarement été étudiés dans un large éventail d'environnements ou de systèmes de culture, car la R&D était organisée pour produire des recommandations génériques à partir de quelques expériences. Les adaptations nécessaires peuvent reposer sur l'expérience d'agriculteurs pionniers dans le cadre d'un processus d'innovation ouverte (Chesbrough et Bogers, 2014).

Jusqu'à présent, les nouveaux objectifs de production, en particulier l'amélioration de l'efficacité d'utilisation des intrants pour réduire les impacts environnementaux, étaient atteints avec une amélioration progressive des techniques culturales. Aujourd'hui, pour relever le nouveau défi que constitue la conduite sans pesticides, il ne suffit plus d'améliorer l'efficacité de l'utilisation des ressources, ni de substituer certains intrants par d'autres, mais de changer en profondeur les bases du raisonnement agronomique des systèmes, conduisant à leur reconception en profondeur (Hill et McRae, 1996). Ce nouveau défi conduit les agronomes à renouveler leurs méthodes de travail et à mobiliser les avancées scientifiques de la conception innovante (Hatchuel et Weil, 2009 ; Prost *et al.*, 2016). Celle-ci désigne un processus d'exploration durant lequel on imagine de nouvelles solutions visant à satisfaire des attentes tout à fait nouvelles. La conception innovante requiert de la créativité, mais aussi la capacité à faire évoluer, au cours du processus, les objectifs visés, les connaissances à mobiliser ou à produire, les critères d'évaluation à privilégier et les collaborations à favoriser. De ce fait, elle s'inscrit dans un processus temporel pluriannuel dont le pas de temps est propre à chaque exploitation. Le travail des agronomes évolue ainsi considérablement, d'une posture de production de connaissances et

de prescriptions techniques, mobilisables par les praticiens, à une posture de mise au point de démarches et d'outils favorisant la conception, par les praticiens eux-mêmes, des systèmes adaptés à leurs objectifs et contextes (Salembier *et al.*, 2018).

Pendant longtemps, les agronomes ont basé la conception de nouvelles manières de conduire les cultures sur l'utilisation de modèles. Ceux-ci, en effet, rendent compte des processus biophysiques influencés par le climat et les modes de gestion, dans de larges gammes de conditions agricoles. Ils simulent également les interactions entre techniques, et entre techniques, états du milieu et du peuplement. Cependant, les processus pris en compte dans les modèles sont souvent restreints à l'eau, au carbone et à l'azote, et incluent rarement les bioagresseurs. De plus, de nombreux travaux ont fait le constat d'une faible mobilisation des modèles en dehors de la recherche. Ces constats ont abouti à la construction de modèles nouveaux, manipulables par les acteurs eux-mêmes, pour favoriser leur autonomie dans la conception de changements de pratiques. Ainsi, le modèle quantitatif PerSyst (Ballot *et al.*, 2018) simule l'ensemble des techniques culturales et successions en grande culture, sur la base d'un paramétrage à dire d'experts ; le modèle qualitatif hiérarchisé IPSIM simule les infestations liées aux bioagresseurs en fonction des techniques, et des conditions biotiques et abiotiques de l'environnement pour la diversité des conditions agricoles (Aubertot et Robin, 2013). Cependant, bien que construits avec leurs utilisateurs, ces outils ne sont pas encore très utilisés, parce qu'ils nécessitent un paramétrage spécifique, mais aussi parce qu'ils constituent des outils de raisonnement stratégique, les praticiens étant davantage habitués à utiliser des OAD pour le raisonnement tactique des pratiques.

À côté des modèles, dans les années récentes, les agronomes ont accentué les travaux sur les méthodes de soutien aux processus de conception (Dogliotti *et al.*, 2014 ; Meynard *et al.*, 2012 ; Prost *et al.*, 2018), notamment en impliquant davantage les acteurs dans leur situation réelle de travail, conduisant ainsi à des investigations de plus en plus poussées vers l'innovation ouverte, dans laquelle la conception est distribuée entre une diversité d'acteurs qui y contribuent chacun partiellement (Chesbrough et Bogers, 2014). Les exemples sont aujourd'hui de plus en plus fréquents, montrant la mobilisation réussie de ce type de démarche participative pour transformer les systèmes agricoles (Bakker *et al.*, 2021 ; Moraine *et al.*, 2016 ; Pelzer *et al.*, 2020 ; Périnelle *et al.*, 2021), même si ces transformations sont souvent entravées par les verrouillages des systèmes sociotechniques, qui impliquent de nombreux acteurs de l'agriculture et des filières, bien au-delà des seuls agriculteurs (Meynard *et al.*, 2018).

Les expérimentations-systèmes

Pendant longtemps, l'expérimentation a été la méthode privilégiée de l'agronome, pour mettre en évidence des lois de fonctionnement, tester l'effet d'un facteur sur le fonctionnement de la culture, comparer différentes options techniques, etc. Ces essais factoriels étaient la pratique dominante pour produire des connaissances concernant une technique nouvelle ou plusieurs modalités en interaction, dans le but d'identifier les options optimales, en s'appuyant sur des analyses statistiques, bases de l'administration de la preuve. Or, dès lors que la question porte sur des

itinéraires techniques ou des systèmes de culture, combinaisons cohérentes de techniques, les essais factoriels, dans lesquels on étudie l'effet d'un facteur, ne sont plus adaptés. De nouvelles manières d'expérimenter, les expérimentations-systèmes, ont été proposées dès les années 1980 et 1990, d'abord pour évaluer la capacité d'itinéraires techniques (Meynard, 1985) ou de systèmes de culture innovants (Debaeke *et al.*, 2009) à atteindre les objectifs pour lesquels ils avaient été mis au point, mais aussi pour contribuer à leur conception proprement dite, par un processus itératif s'appuyant sur une évaluation et une adaptation progressive des techniques expérimentées (Havard *et al.*, 2017 ; Meynard *et al.*, 2012).

La production de connaissances à partir de ces expérimentations-systèmes a considérablement évolué. Dans les années 1990, Reau *et al.* (1996) ont proposé de conduire ces expérimentations sur la base de règles de décision, associant une fonction reliée aux objectifs et contraintes (pour quoi faire ?), une solution (comment faire ?), et un critère d'évaluation permettant de vérifier que la fonction a bien été remplie. Ces règles de décision ont permis de concilier une flexibilité d'adaptation des techniques à la diversité des situations agricoles, et une formalisation permettant à tous les expérimentateurs d'un réseau (ou au même expérimentateur plusieurs années successives) de prendre des décisions cohérentes, ce qui favorise la comparaison des systèmes testés et la diffusion des options techniques et de leurs résultats (Reau *et al.*, 1996). Le schéma décisionnel, description visuelle chronologique des actions techniques mises en œuvre, des fonctions qu'elles visaient, et de l'objectif global visé pour le système, a été proposé, dans les années 2000, pour partager les concepts, les stratégies et les options techniques testées et réussies (Petit *et al.*, 2012a). Dès les années 2010, un réseau d'une centaine d'expérimentations-systèmes a été mis en place par la R&D, à l'initiative du RMT SdCi, certains systèmes visant notamment à réduire de manière forte les pesticides (Petit *et al.*, 2012b). Les agronomes de la R&D se sont alors attachés à produire de nouvelles ressources pour décrire les systèmes testés, en vue de diffuser les principes et les choix techniques adoptés par leurs pilotes. Au début des années 2010, un réseau de huit expérimentations-systèmes visant à tester la suppression totale des pesticides (res0Pest⁴), a été mis en place en France. Ce réseau a permis (i) de concevoir et expérimenter des systèmes de culture zéro pesticide dans différentes situations de production, (ii) d'évaluer leurs performances agronomiques, économiques, environnementales et sociales, (iii) de produire des connaissances sur le fonctionnement de ces agroécosystèmes particuliers, notamment les dynamiques des populations et les régulations biologiques au sein des écosystèmes. Les résultats de ces expérimentations, consolidés par le long terme (première année d'expérimentation en 2012-2013, excepté l'essai de Grignon démarré en 2008) commencent à être publiés, fournissant des références rares dans la littérature scientifique, sur le zéro pesticide (Colnenne-David *et al.*, 2017).

Les expérimentations-systèmes conduites en stations expérimentales ont également constitué des lieux d'échanges avec une diversité d'acteurs du monde agricole, renouvelant ainsi les interactions avec les praticiens dans les processus de production de savoirs (Cardona *et al.*, 2018). Lorsqu'elles sont mises en œuvre dans des réseaux multilocaux en parcelles d'agriculteurs, ces expérimentations-systèmes permettent

4. <https://www6.inrae.fr/reseau-pic/Projets/Res0Pest>

non seulement d'évaluer de nouvelles manières de conduire les cultures, mais également de tester la faisabilité des conduites imaginées, et de déterminer les conditions de réussite de systèmes en rupture (conditions dans lesquelles le ou les système(s) testé(s) donne(nt) des résultats satisfaisants), dans le but de préparer l'extrapolation et la diffusion de leurs résultats.

Les ateliers de conception

Alors que, pendant longtemps, les innovations agronomiques émanaient des scientifiques et étaient diffusées vers les agriculteurs, le besoin d'innovations en rupture, adaptées aux situations dans lesquelles elles doivent être implémentées, exige que les agriculteurs eux-mêmes, ainsi que d'autres acteurs directement concernés par les changements de pratiques, contribuent pleinement et activement au processus de conception. Ils sont en particulier à même de faire entrer dans le processus de conception toutes les connaissances sur les contraintes de la production. Ainsi, les méthodes participatives de conception ont largement été développées depuis les années 1990, ainsi que la production de ressources cognitives pour alimenter le processus (Le Gal *et al.*, 2011 ; Salembier *et al.*, 2018). Les ateliers de conception font partie de ces méthodes : ils consistent à mobiliser un collectif d'acteurs pour explorer un problème complexe et construire *in abstracto* de nouvelles solutions, souvent en rupture par rapport aux pratiques existantes. Cette méthode a été largement déployée, notamment via le RMT SdCi, auprès des acteurs de la R&D, conduisant ainsi à la conception de systèmes de culture innovants, en rupture, mais réalistes (testés en expérimentation), et relevant des enjeux inédits, en particulier la réduction forte des pesticides (Reau *et al.*, 2010). C'est en effet en mobilisant la créativité collective et en élargissant la base des connaissances à mobiliser que des systèmes sans pesticides ont ainsi été conçus, puis expérimentés (Colnenne-David *et al.*, 2015 ; Penvern *et al.*, 2018). Sur la base des convergences et divergences issues d'une douzaine d'expériences, des éléments méthodologiques pour favoriser l'atteinte des objectifs des ateliers de conception sont proposés et ils concernent : (i) le choix des acteurs à impliquer dans les ateliers, (ii) les éléments clés pour définir une cible de conception à la fois ambitieuse et réaliste, (iii) des moyens pour organiser efficacement la conception d'innovations agronomiques, et notamment leur caractère systémique, (iv) les manières de séquencer et d'animer les séances successives d'un atelier, en fonction de la situation, et (v) de nouveaux critères, cohérents avec la diversité des objectifs visés dans les ateliers, pour évaluer le succès d'un atelier de conception.

Jusqu'à présent, ces ateliers ont été majoritairement centrés sur la conception de systèmes de culture à la parcelle, en vue de produire soit des systèmes à tester en expérimentation (en vue de les évaluer et de les améliorer ; Colnenne-David *et al.*, 2015), soit des pratiques à implémenter chez un agriculteur spécifique (Guillier *et al.*, 2020), soit des systèmes plus génériques, adaptés à une région donnée (Pelzer *et al.*, 2017). Cependant, en lien avec les spécificités des bioagresseurs, les ateliers de conception voient se diversifier leurs objets. En effet, la large diffusion spatiale de certains bioagresseurs (insectes notamment), ainsi que les effets de la composition des paysages, rendent de plus en plus nécessaire la conception de mosaïques de systèmes de culture, en vue de réduire l'usage des pesticides. Ainsi, par exemple, le

phoma du colza est influencé par la gestion spatiale et temporelle de variétés résistantes, par le labour derrière colza (qui, en enfouissant les résidus de culture infestés, permet de réduire la diffusion des spores vers les nouvelles parcelles), par la date de semis (qui décale les stades sensibles de la culture par rapport aux périodes de diffusion des spores, Aubertot *et al.*, 2004), et par la fertilisation azotée (une nutrition azotée riche favorise le développement automnal de la maladie, Aubertot *et al.*, 2004). Ainsi donc, la construction de scénarios d'organisation spatiale des systèmes de culture peut permettre de limiter les infestations à l'échelle d'une région, à condition de prendre en compte la diversité des objectifs et des activités des acteurs concernés, en les impliquant dans le processus (Hossard *et al.*, 2013). Cependant, comme on le voit sur ces exemples, la conception de systèmes de culture et de modalités d'organisation spatiale requiert une large gamme de connaissances, qui ne sont que partiellement disponibles, à la fois sur les processus biologiques, et sur les effets des techniques et de leurs interactions sur ces processus, en tenant compte des effets de l'environnement (Caron *et al.*, 2014).

Le verrouillage sociotechnique des systèmes agricoles dominants actuels, dont la dépendance aux pesticides est le pivot (Vanloqueren et Baret, 2008 ; Guichard *et al.*, 2017), implique l'ensemble des acteurs de l'agriculture et des filières. Il est donc utile et même nécessaire d'impliquer tous ces acteurs dans la construction des solutions permettant de sortir des pesticides (Meynard *et al.*, 2018). Ainsi, par exemple, certaines pratiques agronomiques ne sont possibles que (i) si l'on dispose de matériels adéquats, et de compétences pour les gérer, amenant certains acteurs à co-construire des équipements spécifiques et adaptés (Salembier *et al.*, 2020) ; (ii) si l'on a construit les débouchés permettant une valorisation économique suffisante des produits récoltés (Magrini *et al.*, 2018, Meynard *et al.*, 2018) ; (iii) si les transformateurs acceptent de modifier leurs pratiques pour prendre en compte les avantages environnementaux de certaines pratiques agricoles (par exemple, la culture de variétés résistantes au mildiou de pommes de terre, jusqu'à présent refusées par les transformateurs car mal adaptées aux procédés industriels actuels) ; (iv) si les cadres réglementaires valident l'introduction de ces solutions, comme par exemple les règlements d'AOC viticoles, qui n'acceptent pas encore les cépages résistants, ou qui ne permettent pas des densités de plantation faibles. L'implication des acteurs dans les ateliers de conception a pour intérêt majeur d'ouvrir l'exploration de solutions, à partir des savoirs experts et de la mise en œuvre concrète, sans s'enfermer sur les solutions basées sur l'état (généralement lacunaire) des connaissances scientifiques.

Plus globalement, il apparaît essentiel de mettre en œuvre des dispositifs participatifs de conception permettant le couplage d'innovations classiquement conçues indépendamment par des acteurs différents (par exemple : pratiques agricoles et agroéquipement, variétés et pratiques agricoles, procédés de transformation et pratiques agricoles), et incluant la conception d'innovations organisationnelles facilitant la coordination des acteurs (Meynard *et al.*, 2017). L'implication d'une diversité d'acteurs dans la conception participative d'innovations agronomiques de rupture est au cœur de nombreux projets (projets CASDAR et ANR en France, projets soutenus par l'Europe), amenant ainsi les chercheurs à travailler sur des avancées méthodologiques ancrées sur des exemples concrets.

La traque aux innovations et le partage des connaissances au sein d'un système distribué d'innovations et de connaissances en agriculture

Les systèmes agricoles sans pesticides, comme les systèmes agroécologiques d'une manière générale, sont très variés, selon le contexte pédoclimatique et socio-économique local. Certains agriculteurs innovants inventent et mettent en œuvre des modes de production très originaux, atypiques, adaptés à leur situation, mais dont le principe peut potentiellement enrichir la réflexion d'autres agriculteurs ou d'acteurs de la R&D agricole (Salembier *et al.*, 2016 ; Verret *et al.*, 2020). S'appuyer sur ces innovations pour stimuler et nourrir la conception de systèmes par d'autres agriculteurs, dans d'autres situations, suppose une analyse agronomique systémique de ces innovations, permettant ainsi des contributions variées à la conception (Salembier *et al.*, 2021) : identifier et partager des anomalies créatives ; mettre en lumière des processus biologiques et agronomiques systémiques peu connus, mobilisables dans des processus de conception dans d'autres fermes ; stimuler la conception sur des questions ou dans des domaines d'innovation orphelins ; partager et mettre en circulation des concepts d'innovation et des connaissances facilitant la créativité ; mettre en relation des concepteurs entre eux. Ces contributions reposent également sur des efforts de formalisation des connaissances produites, qui, tout en gardant leur logique systémique, doivent permettre de rendre génériques des connaissances locales empiriques, notamment en hybridant connaissances expertes et connaissances scientifiques (Girard et Magda, 2020). De nombreuses traques aux innovations d'agriculteurs ont déjà été réalisées sur des questions touchant la réduction de l'usage de pesticides (gérer la santé des plantes en production maraîchère sous abri en minimisant l'utilisation de pesticides, gérer le chardon en grande culture sans pesticides, gérer les bruches de lentille et féverole sans pesticides, gérer des systèmes viticoles sans pesticides, etc), et sont amenées à se déployer plus largement pour valoriser et partager les innovations techniques des agriculteurs. Leur déploiement pose la question du partage des connaissances produites, auprès du plus grand nombre, pour alimenter la conception de systèmes agricoles. Dans ce sens, des outils numériques se développent, comme par exemple GECO⁵. Cet outil fait suite au prototype AgroPeps, conçu par un collectif d'acteurs du RMT SdCi (Guichard *et al.*, 2015), à la fois producteurs de connaissances et d'innovations techniques et utilisateurs de ces connaissances pour accompagner la conception chez d'autres agriculteurs. Les recherches sur la formalisation et le partage ouvert de ressources cognitives et opérationnelles, valorisant les atouts du numérique, n'en sont qu'à leur début (Prost *et al.*, 2018) et sont essentielles pour accompagner la conception et le développement de systèmes agricoles sans pesticides.

L'évaluation multicritère de systèmes complexes

La suppression des pesticides n'est pas le seul défi que l'agriculture doit relever : réduire les émissions de GES, favoriser la biodiversité, réduire la pression sur les ressources non renouvelables (par exemple l'énergie fossile), tout en maintenant

5. <https://geco.ecophytopic.fr>

leur rentabilité économique, font également partie des enjeux essentiels pour la transformation des systèmes agricoles. C'est en tenant compte de cette diversité des critères que des travaux sur le développement d'outils d'évaluation multicritère ont été développés (Sadok *et al.*, 2008). Ils permettent d'évaluer les innovations complexes, non seulement vis-à-vis de la cible qu'elles visent, mais également vis-à-vis d'autres composantes de la durabilité des systèmes agricoles (Colnenne-David *et al.*, 2017). Pour élargir l'évaluation, et éviter de reporter les externalités négatives en amont ou en aval de la production, des outils d'analyse de cycle de vie (ACV) ont été mobilisés pour l'évaluation de systèmes de culture moins dépendants des pesticides (Deytieux *et al.*, 2012 ; Renaud-Gentié *et al.*, 2020 ; Alaphilippe *et al.*, 2013), ou favorisant la diversification des cultures (Nemecek *et al.*, 2008). Notons cependant que l'ACV intègre mal les effets des pratiques agricoles sur la biodiversité.

Les travaux sur les outils d'évaluation multicritère ont cherché à homogénéiser (pour faciliter les comparaisons) les critères d'évaluation et les bases de paramètres mobilisés pour les calculer (Sadok *et al.*, 2009 ; programme AGRIBALYSE®). Cette normalisation de l'évaluation a facilité la comparaison de systèmes innovants prototypes, *ex ante* ou *ex post*. Or, au cours des processus de conception innovante visant le développement de systèmes en rupture, il est fréquent qu'émergent de nouveaux critères d'évaluation des systèmes, de manière non prévisible par les concepteurs. De fait, les critères des agriculteurs, souvent différents de ceux des agronomes, ont rarement leur place dans les outils standardisés développés par la recherche (Salembier *et al.*, 2013, 2016 ; Verret *et al.*, 2020). Dans ce contexte, les outils d'évaluation multicritère standardisés peuvent s'avérer mal adaptés, car trop lourds à mettre en œuvre, ou prenant insuffisamment en compte certains aspects jugés essentiels par leurs utilisateurs. À titre d'exemple, alors que la question des relations entre pratiques agricoles et santé sont de plus en plus fréquemment à l'ordre du jour, en particulier pour les systèmes visant la suppression des pesticides, les outils prenant en compte ces aspects sont encore frustes. Des progrès sont donc attendus dans les prochaines années pour fournir de tels critères d'évaluation, indispensables pour travailler à l'échelle de systèmes alimentaires (Duru et Le Bras, 2020).

La conduite du changement pas-à-pas : stimulation des apprentissages

Passer de systèmes dont les pesticides sont le pivot à des systèmes sans pesticides ne se fera pas du jour au lendemain. Les connaissances sur les processus biologiques à valoriser sont insuffisantes, les systèmes à concevoir sont complexes (nombreuses interactions entre techniques, et entre celles-ci et les conditions du milieu, dépendance aux moyens disponibles, etc.) et les effets attendus de certaines alternatives sont incertains ! De ce fait, alors que les chercheurs se sont, jusqu'à présent, surtout intéressés à montrer qu'il était possible de concevoir *ex nihilo*, puis à tester en expérimentation, des systèmes complets atteignant les performances attendues (Vereijken, 1997 ; Debaeke *et al.*, 2009 ; Chikowo *et al.*, 2009 ; Colnenne-David *et al.*, 2015, 2017 ; Simon *et al.*, 2017 ; Lefèvre *et al.*, 2020), la transformation des systèmes de culture ou de production, par les agriculteurs eux-mêmes, est en général beaucoup plus progressive. On parle alors de conception pas-à-pas (Mischler *et al.*, 2009 ;

Meynard *et al.*, 2012 ; Coquil *et al.*, 2014). En fonction des observations réalisées sur le système en cours d'évolution, des changements techniques sont proposés et implémentés pour améliorer les résultats observés, engageant de véritables boucles de conception (diagnostic - exploration - mise en action - évaluation, et nouveau diagnostic, etc.). La mise en action des évolutions du système est source d'apprentissages, dont les agriculteurs partagent souvent le contenu avec d'autres agriculteurs en changement (Bakker *et al.*, 2021) : les travaux de recherche sur la conception pas-à-pas et la gestion adaptative des modes de production devraient être renforcés. Parfois, pour réduire la prise de risque, les agriculteurs expérimentent d'abord par eux-mêmes les solutions techniques qu'ils imaginent, sur une petite partie de leur exploitation, avant d'extrapoler les solutions jugées satisfaisantes à plus grande échelle (Catalogna *et al.*, 2018). Encourager ce type d'expérimentation et accompagner leur analyse par des outils adaptés constitue un défi majeur pour la transition à large échelle vers des systèmes sans pesticides. En particulier, les capacités des acteurs et les outils permettant de réaliser des diagnostics pertinents sur les systèmes en cours de construction devraient être largement développés, pour permettre d'identifier de manière précise et pertinente les éléments du système à améliorer dans les boucles de conception suivantes. Des travaux sont nécessaires pour stimuler le développement d'indicateurs de pilotage de systèmes complexes dans l'incertain. Les apprentissages peuvent également porter sur la formalisation de la cible visée pour le système, dont les contours s'affinent au fur et à mesure du processus, et sur les conditions de mise en œuvre, aboutissant à de nouveaux savoir-faire partageables (Meynard *et al.*, 2019).

À retenir

En vue de maîtriser les bioagresseurs sans pesticides, les systèmes agricoles et les organisations spatiales doivent être à la fois fortement innovants et ajustés à la diversité des spécificités locales. Cela exige, de la part des agriculteurs et autres acteurs concernés, un effort de reconception et de gestion adaptative. Pour accompagner les acteurs dans cette voie, les agronomes ont considérablement fait évoluer leurs méthodes de travail. Ceci a conduit, dans la dernière décennie, à un fort renouvellement des travaux de recherche, qui devrait s'amplifier dans les années à venir. La transformation des métiers pour accompagner les acteurs dans ces transformations profondes touche également les conseillers, qui ne pourront plus diffuser les techniques génériques à appliquer, mais devront accompagner la transformation progressive des systèmes, en les adaptant aux objectifs individuels et collectifs, et aux moyens disponibles.

» Conclusion

Pour espérer contribuer à l'émergence et au déploiement de systèmes sans pesticides, il est nécessaire de revoir non seulement les connaissances produites, mais aussi les activités et l'organisation des acteurs de la R&D. Identifier et hiérarchiser à partir du processus de conception, les nouvelles connaissances à produire constitue un vrai

défi dans un monde de recherche habitué à autodéterminer ses priorités par le biais des « états de l'art scientifiques » (Toffolini *et al.*, 2020). C'est une organisation radicalement différente des entreprises et organismes (Midler, 1998) qui doit se mettre en place. Déployer des dispositifs de conception innovante mobilisant la diversité des acteurs de l'amont et de l'aval suppose à la fois d'accroître les travaux de recherche formalisant les méthodes et les outils nécessaires, et de faire évoluer en profondeur les activités et les compétences des acteurs en charge de l'accompagnement des processus de conception (Cardona *et al.*, 2021). Déployer à grande échelle des modes de production innovants, mis au point par les chercheurs (souvent en recherche participative), ou identifiés chez des agriculteurs pionniers, constitue une condition indispensable pour une réduction drastique des pesticides chez les agriculteurs. Pour la R&D, il s'agira de développer des activités en conditions réelles et avec les agriculteurs (traque, co-conception, évaluation participative, etc.) dans des approches systémiques prenant en compte la diversité des objectifs et des moyens des agriculteurs. Mais le déploiement de telles activités pour construire des systèmes diversifiés fait face à une structuration historique, encore très descendante, de la R&D, ainsi qu'à une habitude de centrer le travail sur les solutions analytiques. Ainsi, l'agronomie système n'a pas été mise en avant dans les politiques publiques visant une réduction forte des pesticides (Aulagnier *et al.*, 2017 ; Aulagnier, 2021). La culture de l'innovation ouverte reste encore largement à transmettre, à développer et à mettre en œuvre ! Au sein des filières comme dans la recherche, la séparation des métiers, liée à leur spécialisation, est aujourd'hui une réelle entrave à la coordination des innovations, indispensable pour la transition vers des systèmes alimentaires plus durables (Meynard *et al.*, 2017). De même, la segmentation de la R&D agricole par filière contraint fortement les travaux et la transition vers des systèmes et des fermes agro-écologiques très bas intrants, très diversifiés et par nature multi-filières. Pour développer des systèmes sans pesticides, il apparaît urgent de revisiter ces organisations, de faire reconnaître les innovations et les connaissances produites par les praticiens (groupes d'agriculteurs, acteurs pionniers innovants), sources d'une innovation radicale et systémique, et de concevoir des outils numériques pour stimuler le partage de connaissances et d'innovations, en mobilisant leurs futurs utilisateurs.

► Références bibliographiques

- Alaphilippe A., Simon S., Brun L., Hayer F., Gaillard G., 2013. Life cycle analysis reveals higher agroecological benefits of organic and low-input apple production. *Agronomy Sust. Develop.*, 33, 581-592. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0124-7>
- Amassé C., Celette F., Jeuffroy M.H., David C., 2013. Association relais blé / légumineuse fourragère en système céréalier biologique : une réponse pour le contrôle des adventices et la nutrition azotée des cultures. *Innovations Agronomiques*, 32, 21-33.
- Arvalis, 2021. Lettre d'information ARVALIS sur la répartition des variétés de céréales à paille, 5 p.
- Attoumani-Ronceux A., Aubertot J-N., Guichard L., Jouy L., Mischler P., Omon B., *et al.* 2011. *Guide pratique pour la conception de systèmes de culture plus économes en produits phytosanitaires. Application aux systèmes de polyculture.* Ministères chargés de l'agriculture et de l'environnement, RMT Systèmes de culture innovants, 116 p.

- Aubertot J.-N., Pinochet X., Doré T., 2004. The effects of sowing date and nitrogen availability during vegetative stages on *Leptosphaeria maculans* development on winter oilseed rape. *Crop Protection*, 23 (635–645). <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2003.11.015>
- Aubertot J.-N., Robin M.-H., 2013. Injury Profile SIMulator, a Qualitative Aggregative Modelling Framework to Predict Crop Injury Profile as a Function of Cropping Practices, and the Abiotic and Biotic Environment. I. Conceptual Bases. *PLoS ONE*, 8 (9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0073202>
- Aubertot J.N., West J.S., Bousset-Vaslin L., Salam M.U., Barbetti M.J., Diggle A.J., 2006. Improved resistance management for durable disease control: A case study of phoma stem canker of oilseed rape (*Brassica napus*). *European Journal of Plant Pathology*, 114:91-106. <https://doi.org/10.1007/s10658-005-3628-z>
- Aulagnier A., Goulet F., 2017. Des technologies controversées et de leurs alternatives. Le cas des pesticides agricoles en France. *Sociologie du travail*, 59 (3). <https://doi.org/10.4000/sdt.840>
- Aulagnier A., 2021. Y a-t-il une alternative aux pesticides ? *La vie des idées*, (consulté le 13/10/21)
- Ballot R., Loyce C., Jeuffroy M.H., Ronceux A., Gombert J., Lesur-Dumoulin C., Guichard L., 2018. First cropping system model based on expert-knowledge parameterization. *Agronomy Sust. Dev.*, 38 (33). <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0512-8>
- Bakker T., Dugué P., de Tourdonnet S. 2021. Assessing the effects of Farmer Field Schools on farmers' trajectories of change in practices. *Agron. Sustain. Dev.*, 41 (18). <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00667-2>
- Barbier J.M., Constant N., Davidou L., Delière L., Guisset M., Jacquet O., *et al.*, 2011. CEPVITI Co-conception de systèmes viticoles économes en produits phytosanitaires, Guide méthodologique. 27 p.
- Borg J., Kiær L.P., Lecarpentier C., Goldringer I., Gauffreteau A., Saint-Jean S., *et al.*, 2018. Unfolding the potential of wheat cultivar mixtures: A meta-analysis perspective and identification of knowledge gaps. *Field Crops Research*, 221:298-313. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.09.006>
- Breitenmoser S., Steinger T., Hiltbold I., Grosjean Y., Nussbaum V., Bussereau F., *et al.*, 2020. Effet des plantes associées au colza d'hiver sur les dégâts d'altises. *Recherche Agronomique Suisse*, 11 :16-25. <https://doi.org/10.34776/afs11-16>
- Bruchon L., Le Bellec F., Vannière H., Ehret P., Vincenot D., De Bon H., *et al.*, 2015. *Guide Tropical – Guide pratique de conception de systèmes de culture tropicaux économes en produits phytosanitaires*, Paris, Le Bellec F. (Ed.), CIRAD, 210 p.
- Buehrer K.A., Grieshop M.J., 2014. Postharvest grazing of hogs in organic fruit orchards for weed, fruit, and insect pest management. *Org. Agric.*, 4:223-232. <https://doi.org/10.1007/s13165-014-0076-0>
- Cardona A., Cerf M., Barbier M., 2021. Mettre en œuvre l'action publique pour réduire l'usage des pesticides : reconnaître les activités d'intermédiation. *Cahiers Agricultures*, 30 (33). <https://doi.org/10.1051/cagri/2021020>
- Cardona A., Lefèvre A., Simon S., 2018 Les stations expérimentales comme lieux de production des savoirs agronomiques semi-confinés : Enquête dans deux stations INRA engagées dans l'agro-écologie. *Revue d'anthropologie des connaissances*, 12 :139-170. <https://doi.org/10.3917/rac.039.0139>
- Caron P., Biénabe E., Hainzelin E., 2014. Making transition towards ecological intensification of agriculture a reality: the gaps in and the role of scientific knowledge. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 8:44-52. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.08.004>
- Carrouée B., Schneider A., Flénet F., Jeuffroy M.H., Nemecek T., 2012. Introduction du pois protéagineux dans des rotations à base de céréales à paille et colza : impacts sur les performances économiques et environnementales. *Innovations Agronomiques*, 25 :125-142. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01001330>
- Casagrande M., David C., Valantin-Morison M., Makowski D., Jeuffroy M.H., 2009. Factors limiting the grain protein content of organic winter wheat in south-eastern France: a mixed-model approach. *Agron. Sustain. Dev.*, 29:565-574. <https://doi.org/10.1051/agro/2009015>

- Castella J.C., Jourdain D., Trébuil G., Napompeth B., 1999. A systems approach to understanding obstacles to effective implementation of IPM in Thailand: key issues for the cotton industry. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 72:17-34. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(98\)00159-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(98)00159-5)
- Catalogna M., Dubois M., Navarrete M., 2018. Diversity of experimentation by farmers engaged in agroecology. *Agron. Sustain. Dev.*, 38 (50). <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0526-2>
- Chauvel B., Guillemin J.P., Colbach N., Gasquez J., 2001. Evaluation of cropping systems for management of herbicide-resistant populations of blackgrass (*Alopecurus myosuroides* Huds.). *Crop Protection*, 20:127-137. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(00\)00065-X](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(00)00065-X)
- Chesbrough H., Bogers M., 2014. Explicating open innovation. Clarifying an emerging paradigm for understanding innovation, in Chesbrough H, Vanhaverbeke W, West J (eds), *New Frontiers in Open Innovation*. Oxford, Oxford University Press, 3-28
- Chikowo R., Faloya V., Petit S., Munier-Jolain N.M., 2009. Integrated Weed Management systems allow reduced reliance on herbicides and long-term weed control. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 132:237-242. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.04.009>
- Clark M.S., Gage S.H., 1996. Effects of free-range chickens and geese on insect pests and weeds in an agroecosystem. *Am. J. Altern. Agric.*, 11:39-47. <https://doi.org/10.1017/S0889189300006718>
- Colbach N., Dürr C., Roger-Estrade J., Caneill J., 2005. How to model the effects of farming practices on weed emergence. *Weed Research*, 45:2-17. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2004.00428.x>
- Colbach N., Lucas P., Meynard J.M., 1997. Influence of wheat crop management on take-all development and infection cycles. *Phytopathology*, 87:26-32. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.1997.87.1.26>
- Colbach N., Meynard J.M., 1995. Soil tillage and eyespot: influence of crop residue distribution on disease development and infection cycles. *European Journal of Plant Pathology*, 101:601-611. <https://doi.org/10.1007/BF01874864>
- Colbach N., Roger-Estrade J., Chauvel B., Caneill J., 2000. Modelling vertical and lateral seed bank movements during mouldboard ploughing. *European Journal of Agronomy*, 13:111-124. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00069-1](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00069-1)
- Colnenne-David, C., Doré, T., 2015. Designing innovative productive cropping systems with quantified and ambitious environmental goals. *Renew. Agric. Food Syst.*, 30:487-502. <https://doi.org/10.1017/S1742170514000313>
- Colnenne-David C., Grandeau G., Jeuffroy M.H., Doré T., 2017. Ambitious environmental and economic goals for the future of agriculture are unequally achieved by innovative cropping systems. *Field Crops Research*, 210:114-128. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.009>
- Coquil X., Fiorelli J.L., Blouet A., Mignolet C. 2014. Experiencing Organic Mixed Crop Dairy Systems: A Step-by-Step Design Centred on a Long-term Experiment, in Bellon & Penvern (eds), *Organic Farming, Prototype for Sustainable Agricultures*, Dordrecht, Springer, 201-217. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7927-3_11
- Couëdel A., Kirkegaard J., Alletto L., Justes E., 2017. Crucifer-legume cover crop mixtures for biocontrol: Toward a new multi-service paradigm. *Advances in Agronomy*, 157:55-139. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.05.003>
- Debaeke P., Munier-Jolain N., Bertrand M., Guichard L., Nolot J.M., Faloya V., et al., 2009. Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: methodology and case studies. *Agron. Sustain. Dev.*, 29:73-86. <https://doi.org/10.1051/agro:2008050>
- Deguine J.P., Aubertot J.N., Joy Flor R., Lescourret F., Wyckhuys K.A.G., Ratnadass A., 2021. Integrated pest management: good intentions, hard realities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41 (38). <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00689-w>
- Dejoux J.F., Meynard J.M., Reau R., Roche R., Saulas P., 2003. Evaluation of environmentally-friendly crop management systems based on very early sowing dates for winter oilseed rape in France. *Agronomie*, 23 :725-736. <https://doi.org/10.1051/agro:2003050>
- Delière L., Schneider C., Audeguin L., Le Cunff L., Cailliatte R., Prado E., et al., 2017. Cépages résistants : la vigne contre-attaque ! *Phytoma*, 708 :34-37.

- de Vallavieille-Pope C., Belhaj Fraj M., Mille B., Meynard J.M., 2006. Les associations de variétés : accroître la biodiversité pour mieux maîtriser les maladies. Dossier de l'Environnement, 30, 101-109. <https://hal.inrae.fr/hal-02661356>
- Deytieux V., Nemecek T., Freiermuth Knuchel R., Gaillard G., Munier-Jolain N.M., 2012. Is Integrated Weed Management efficient for reducing environmental impacts of cropping systems? A case study based on life cycle assessment. *Europ. J. Agronomy*, 36:55-65. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.08.004>
- Dogliotti S., García M.C., Peluffo S., Dieste J.P., Pedemonte A.J., Bacigalupe G.F., *et al.*, 2014. Co-innovation of family farm systems: A systems approach to sustainable agriculture. *Agricultural Systems*, 126:76-86. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.02.009>
- Duru M., Le Bras C., 2020. Crises environnementales et sanitaires : des maladies de l'anthropocène qui appellent à refonder notre système alimentaire. *Cahiers Agricultures*, 29 (34). <https://doi.org/10.1051/cagri/2020033>
- Ennaifar S., Lucas P., Meynard J.M., Makowski D., 2005. Effects of summer fallow management on take-all of winter wheat caused by *Gaeumannomyces graminis var. tritici*. *European Journal of Plant Pathology*, 112:167-181. <https://doi.org/10.1007/s10658-005-3121-8>
- Favrelière E., Ronceux A., Pernel J., Meynard J.M., 2020. Nonchemical control of a perennial weed, *Cirsium arvense*, in arable cropping systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 40 (31). <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00635-2>
- FranceAgriMer, 2020. LES ÉTUDES Céréales / Variétés des céréales à paille - Récolte 2020, 12 p.
- Gardarin A., Plantegenest M., Bischoff A., Valantin-Morison M., 2018. Understanding plant–arthropod interactions in multitrophic communities to improve conservation biological control: useful traits and metrics. *Journal of Pest Science*, 91:943-955. <https://doi.org/10.1007/s10340-018-0958-0>
- Girard N., Magda D., 2020. The interplays between singularity and genericity of agroecological knowledge in a network of livestock farmers. *Journal of Rural Studies*, 73:214-224. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.11.003>
- Guichard L., Ballot, R., Halska, J., Lambert, E., Meynard, J.M., Minette, S., *et al.*, 2015. AgroPEPS, a collaborative web tool of knowledge management to Share, Practice, Inform on sustainable cropping systems. *Innovations Agronomiques*, 43:83-94. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01299090>
- Guichard L., Dedieu F., Jeuffroy M-H, Meynard J-M, Reau R, Savini I. 2017. Le plan Écophyto de réduction d'usage des pesticides en France : décryptage d'un échec et raisons d'espérer. *Cahiers Agricultures*, 26 (1). <https://doi.org/10.1051/cagri/2017004>
- Guillier M., Cros C., Reau R., 2020. AUTO'N - Améliorer l'autonomie azotée des systèmes de culture en Champagne crayeuse. *Innovations Agronomiques*, 79:193-212.
- Hatchuel A., Weil B., 2009. C-K design theory: an advanced formulation. *Res. Eng. Des.*, 19 :181-192. <https://doi.org/10.1007/s00163-008-0043-4>
- Havard M., Alaphilippe A., Deytieux V., Estorgues V., Labeyrie B., Lafond D., *et al.*, 2017. *Guide de l'expérimentateur système : concevoir, conduire et valoriser une expérimentation système pour les cultures assolées et pérennes*, 172 p. <https://hal.inrae.fr/hal-02791737/document>
- Hill S.B., McRae R.J., 1996. Conceptual framework for the transition from conventional to sustainable agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture*, 7:81-87. https://doi.org/10.1300/J064v07n01_07
- Hossard L., Jeuffroy M.H., Pelzer E., Pinochet X., Souchère V., 2013. A participatory approach to design spatial scenarios of cropping systems and assess their effects on phoma stem canker management at a regional scale. *Environmental Modelling and Software*, 48:17-26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.05.014>
- Hossard L., Souchère V. Jeuffroy M.H. 2018. Effectiveness of field isolation distance, tillage practice, cultivar type and crop rotations in controlling phoma stem canker on oilseed rape. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 252:30-41. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.10.001>

- Husson O., Sarthou J.P., Bousset L., Ratnadass A., Schmidt H.P., Kempf J., *et al.*, 2021. Soil and plant health in relation to dynamic sustainment of Eh and pH homeostasis: A review. *Plant Soil*, 466:391–447. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05047-z>
- IGN, 2021. Registre parcellaire graphique (RPG) 2018-2019.
- INRAE, 2021a. SPECIFICS, <https://www6.inrae.fr/cultiver-protéger-autrement/Les-Projets/SPECIFICS>
- INRAE, 2021b. BE-CREATIVE, <https://www6.inrae.fr/cultiver-protéger-autrement/Les-Projets/BE-CREATIVE>
- INRAE, 2021c. VITAE, <https://www6.inrae.fr/cultiver-protéger-autrement/Les-Projets/VITAE>
- Jacquet F., Butault J.-P., Guichard L., 2011. An economic analysis of the possibility of reducing pesticides in French field crops. *Ecological Economics*, 70:1638-1648. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.04.003>
- Jeuffroy M.H., Meynard J.M., de Vallavieille-Pope C., Belhaj Fraj M., Saulas P., 2010. Les associations de variétés de blé : performances et maîtrise des maladies. *Le Sélectionneur Français*, 61 :75-84.
- Kristensen L, Olsen J, Weiner J. 2008. Crop density, sowing pattern, and nitrogen fertilization effects on weed suppression and yield in spring wheat. *Weed Science*, 56:97-102. <https://doi.org/10.1614/WS-07-065.1>
- Laget E., Guadagnini M., Plénet D., Simon S., Assié G., Billote B., *et al.* 2015. *Guide pour la conception de systèmes de production fruitière économes en produits phytopharmaceutiques*. GIS Fruits et Ministère de l'Agriculture, Paris, 264 p.
- Lamé A., Jeuffroy M.H., Pelzer E., Meynard J.M., 2015. Les agriculteurs sources d'innovations : exemple des associations pluri-spécifiques dans le grand Ouest de la France. *Agriculture, Environnement & Sociétés*, 5 :47-54. <https://hal.inrae.fr/hal-02631362>
- Landis D.A., Wratten S.D., Gurr G.M., 2000. Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Ann. Rev. Entomol.*, 45:175-201. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.45.1.175>
- Launais M., Bzdrenga L., Estorgues V., Faloya V., Jeannequin B., Lheureux S., *et al.*, 2014, *Guide pratique pour la conception de systèmes de culture légumiers économes en produits phytopharmaceutiques*, Ministère chargé de l'Agriculture, Onema, GIS PIClég, 178 p.
- Lechenet M., Makowski D., Py G., Munier-Jolain N., 2016. Profiling farming management strategies with contrasting pesticide use in France. *Agricultural Systems*, 149:40-53. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.08.005>
- Lefèvre A., Perrin B., Lesur-Dumoulin C., Salembier C., Navarrete M., 2020. Challenges of complying with both food value chain specifications and agroecology principles in vegetable crop protection. *Agricultural Systems*, 185:102953. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102953>
- Le Gal, P.-Y., Dugué, P., Faure, G., Novak, S., 2011. How does research address the design of innovative agricultural production systems at the farm level? A review. *Agricultural Systems*, 104:714-728. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2011.07.007>
- Li S.S., Wei S.H., Zuo R.L., Wei J.G., Qiang S., 2012. Changes in the weed seed bank over 9 consecutive years of rice-duck farming. *Crop Protection*, 37:42-50. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.03.001>
- Lorin M., Butier A., Jeuffroy M.H., Valantin-Morison M., 2017. Choisir et gérer des légumineuses gélives associées au colza d'hiver pour le contrôle des adventices et la fourniture d'azote. *Innovations Agronomiques*, 60:77-89. <https://doi.org/10.15454/1.5138519019473975e12>
- Lorin M., Jeuffroy M.H., Butier A., Valantin-Morison M., 2015. Undersowing winter oilseed rape with frost-sensitive legume living mulches to improve weed control. *European Journal of Agronomy*, 71:96-105. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.09.001>
- Loyce C., Meynard J.M., Bouchard C., Rolland B., Lonnet P., Bataillon P., *et al.*, 2008. Interaction between cultivar and crop management effects on winter wheat diseases, lodging, and yield. *Crop Prot.*, 27:1131-1142. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2008.02.001>

- Lucas P., Meynard J.-M., 2000. *La protection intégrée des cultures à l'INRA*. Rapport, INRA, 28 p.
- Magrini M.B., Anton M., Chardigny J.M., Duc G., Jeuffroy M.H., Meynard J.M., *et al.*, 2018. Pulses for sustainability: breaking agriculture and food sectors out of lock-in. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2 (64). <https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00064>
- Mercier V., Bussi C., Plénet D., Lescourret F., 2008. Effects of limiting irrigation and of manual pruning on brown rot incidence in peach. *Crop protection*, 27:678-688. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2007.09.013>
- Merot A., Wéry J., 2017. Converting to organic viticulture increases cropping system structure and management complexity. *Agronomy for Sustainable Development*, 37 (3). <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0427-9>
- Meynard J.M., 1985. *Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver*, thèse de doctorat, spécialité Sciences agronomiques, INAPG, 258 p.
- Meynard J.M., Girardin P., 1991. Produire autrement. *Courrier de la cellule Environnement de l'INRA*, 15 :1-19. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01207904>
- Meynard J.M., Doré T., Lucas P., 2003. Agronomic approach: cropping systems and plant diseases. *CR Acad Sci. Biologies*, 326:37-46. [https://doi.org/10.1016/S1631-0691\(03\)00006-4](https://doi.org/10.1016/S1631-0691(03)00006-4)
- Meynard, J.M., Dedieu, B., Bos, A.P., 2012. Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices, in Darnhofer, I., Gibbon, D., Dedieu, Benoît (Eds.), *Farming Systems Research into the 21st Century: The New Dynamic*. Dordrecht, Springer, 405-429. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4503-2_18
- Meynard J.M., Jeuffroy M.H., Le Bail M., Lefèvre A., Magrini M.B., Michon C., 2017. Designing coupled innovations for the sustainability transition of agrifood systems? *Agricultural Systems*, 157:330-339. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.08.002>
- Meynard J.M., Charrier F., Fares M., Le bail M., Magrini M.B., Charlier A., *et al.*, 2018. Socio-technical lock-in hinders crop diversification in France. *Agronomy for Sustainable Development*, 38 (54). <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0535-1>
- Meynard, J.M., Cerf, M., Fiorelli, J.L., Jeuffroy, M.H., Le Bail, M., Lefèvre, A., *et al.*, 2019. The step-by-step approach for farming systems design and transition. *6th International Symposium for Farming Systems Design*, 18-21 August 2019, Montevideo, Uruguay, Farming Systems Design community, Universidad de la República (Uruguay).
- Midler C., 1998. *L'auto qui n'existait pas. Management de projets et transformation de l'entreprise*. Paris, Dunod, 215 p.
- Mignolet C., Schott C., Benoit M., 2004. Spatial dynamics of agricultural practices on a basin territory: a retrospective study to implement models simulating nitrate flow. The case of the Seine basin. *Agronomie*, 24:219-236. <https://doi.org/10.1051/agro:2004015>
- Mischler, P., Lheureux, S., Dumoulin, F., Menu, P., Sene, O., Hopquin, J.-P., *et al.*, 2009. Huit fermes de grande culture engagées en production intégrée réduisent les pesticides sans baisse de marge. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, 57 :73-91. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01197254>
- Moraine M., Grimaldi J., Murgue C., Duru M., Therond O., 2016. Co-design and assessment of cropping systems for developing crop-livestock integration at the territory level. *Agricultural Systems*, 147:87-97. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.06.002>
- Motisi N., Montfort F., Faloya V., Lucas P., Doré T., 2009. Growing *Brassica juncea* as a cover crop, then incorporating its residues provide complementary control of Rhizoctonia root rot of sugar beet. *Field Crops Research*, 113:238-245. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.05.011>
- Nemecek T., von Richthofen J.S., Dubois G., Casta P., Charles R., Pahl H., 2008. Environmental impacts of introducing grain legumes into European crop rotations. *Europ. J. Agronomy*, 28:380-393. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.11.004>
- Papaix J., David O., Lannou C., Monod H., 2013. Dynamics of Adaptation in Spatially heterogeneous Metapopulations. *PLoS ONE*, 8 (2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0054697>

- Paredes D., Rosenheim J.A., Chaplin-Kramer S., Karp D.S., 2021. Landscape simplification increases vineyard pest outbreaks and insecticide use. *Ecology Letters*, 24:73-83. <https://doi.org/10.1111/ele.13622>
- Parisi L., Didelot F., Brun L., 2004. Raisonner la lutte contre la tavelure du pommier, un enjeu majeur pour une arboriculture durable. *Phytoma, La défense des végétaux*, 567 :49-52. <https://hal-univ-tlse3.archives-ouvertes.fr/INRA/hal-02672752v1>
- Paut R., Sabatier R., Dufils A., Tchamitchian M., 2021a. How to reconcile short-term and long-term objectives in mixed farms? A dynamic model application to mixed fruit tree - vegetable systems. *Agricultural Systems*, 187. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103011>
- Paut R., Dufils A., Derbez F., Dossin A.-L., Penvern S., 2021b. Orchard Grazing in France: Multiple Forms of Fruit Tree–Livestock Integration in Line with Farmers’ Objectives and Constraints. *Forests*, 12. <https://doi.org/10.3390/f12101339>
- Peigné J., Casagrande M., Payet V., David C., Sans F.X., Blanco-Moreno J.M., *et al.*, 2015. How organic farmers practice conservation agriculture in Europe. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 31(1):72-85. <https://doi.org/10.1017/S1742170514000477>
- Pelzer E., Bourlet C., Carlsson G., Lopez-Bellido R.J., Jensen E.S., Jeuffroy M.H., 2017. Design, assessment and feasibility of legume-based cropping systems in three European areas. *Crop & Pasture Science*, 68:902-914. <https://doi.org/10.1071/CP17064>
- Pelzer E., Bonifazi M., Soulié M., Guichard L., Quinio M., Ballot R., Jeuffroy M.H., 2020. Participatory Design of Agronomic Scenarios for the Reintroduction of Legumes Into a French Territory. *Agric. Systems*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102893>
- Penvern S., Chieze B., Simon S., 2018. Trade-offs between dreams and reality: Agroecological orchard co-design. *13th European IFSA Symposium*, 1-5 July 2018, Chania, Greece, IFSA.
- Périnelle A., Meynard J.-M., Scopel E., 2021. Combining on-farm innovation tracking and participatory prototyping trials to develop legume-based cropping systems in West Africa. *Agricultural Systems*, 187:102978. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102978>
- Pertot I., Caffi T., Rossi V., Mugnai L., Hoffmann C., Grando M.S., *et al.*, 2017. A Critical Review of Plant Protection Tools for Reducing Pesticide Use on Grapevine and New Perspectives for the Implementation of IPM in Viticulture. *Crop Protection*, 97:70-84. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.11.025>
- Petit M.S., Reau R., Dumas M., Moraine M., Omon B., Josse S., 2012a. Mise au point de systèmes de culture innovants par un réseau d’agriculteurs et production de ressources pour le conseil. *Innovations Agronomiques*, 20 :79-100 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01019451>
- Petit M.S., Reau R., Deytieux V., Schaub A., Cerf M., Omon B., *et al.*, 2012b. Systèmes de culture innovants : une nouvelle génération de réseau expérimental et de réseau de compétences *Innovations Agronomiques*, 25 :99-123. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01186801>
- Pilet F., 2003. *Epidémiologie et biologie adaptative des populations de Phytophthora infestans dans des cultures pures et hétérogènes de variétés de pomme de terre*, thèse de doctorat, ENSAR, Rennes, 157 p.
- Prost L., Berthet E.T.A., Cerf M., Jeuffroy M.-H., Labatut J., Meynard J.-M., 2016. Innovative design for agriculture in the move towards sustainability: scientific challenges. *Research in Engineering Design*, 28:119-129. <https://doi.org/10.1007/s00163-016-0233-4>
- Prost L., Reau R., Paravano L., Cerf M., Jeuffroy M.H., 2018. Designing agricultural systems from invention to implementation: the contribution of agronomy. Lessons from a case study. *Agric Systems*, 164:122-132. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.04.009>
- Puech C., Brulaire A., Paraiso J., Faloya V., 2021. Collective design of innovative agroecological cropping systems for the industrial vegetable sector. *Agricultural Systems*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103153>
- Ratnadass, A., Fernandes, P., Avelino, J., Habib, R., 2012. Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32:273-303. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0022-4>

- Reau R., Meynard J.M., Robert D., Gitton C., 1996. *Des essais factoriels aux essais « conduites de cultures »*, in Expérimenter sur les conduites de cultures : un nouveau savoir-faire au service d'une agriculture en mutation, colloque DERF, ACTA, ministère Agriculture, 130p
- Reau R. Mischler P., Petit M.S., 2010. Evaluation au champ des performances de systèmes innovants en cultures arables et apprentissage de la protection intégrée en fermes pilotes. *Innovations Agronomiques*, 8 :83-103. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01173248>
- Renaud-Gentié C., Dieu V., Thiollet-Scholtus M., Merot A., 2020. Addressing organic viticulture environmental burdens by better understanding interannual impact, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25:1307-1322. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01694-8>
- Ricci B. Franck P., Toubon J.F., Bouvier J.C., Sauphanor B., Lavigne C., 2009. The influence of landscape on insect pest dynamics: a case study in southeastern France. *Landscape Ecology*, 24:337-349. <https://doi.org/10.1007/s10980-008-9308-6>
- Rusch A., Valantin-Morison M., Roger-Estrade J., Sarthou JP, 2012. Using landscape indicators to predict high pest infestations and successful natural pest control at the regional scale. *Landscape and urban planning*, 105:62-73. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.11.021>
- Sadok W., Angevin F., Bergez J.E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., *et al.*, 2008. Ex ante assessment of the sustainability of alternative cropping systems: implications for using multi-criteria decision-aid methods. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 28:163-174. <https://doi.org/10.1051/agro:2007043>
- Sadok W., Angevin F., Bergez J.E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., *et al.*, 2009. MASC: a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 29:447-461. <https://doi.org/10.1051/agro/2009006>
- Salembier C., Meynard J.-M., 2013. Evaluation de systèmes de culture innovants conçus par des agriculteurs : un exemple dans la Pampa Argentine. *Innovations Agronomiques*, 31 :27-44. <https://hal.inrae.fr/hal-02648781>
- Salembier C., Grosso S., Meynard J.M. 2014. Les variétés de soja tolérantes aux herbicides, moteur de la spécialisation agricole de la Pampa argentine. *Agronomie, Environnement et Sociétés*, 4 :135-142. <https://hal.inrae.fr/hal-02636485>
- Salembier C., Elverdin J.H., Meynard J.M., 2016. Tracking on-farm innovations to unearth alternatives to the dominant soybean-based system in the Argentinean Pampa. *Agron. Sustain. Dev.*, 36 (1). <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0343-9>
- Salembier C., Segrestin B., Berthet E., Weil B., Meynard J.-M., 2018. Genealogy of design reasoning in agronomy: Lessons for supporting the design of agricultural systems. *Agricultural Systems*, 164:277-290. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.05.005>
- Salembier C., Segrestin B., Sinoir N., Templier J., Weil B., Meynard J.-M., 2020. Design of equipment for agroecology: Coupled innovation processes led by farmer-designers. *Agricultural Systems*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102856>
- Salembier C., Segrestin B., Weil B., Jeuffroy M.H., Cadoux S., Cros C., *et al.*, 2021. A theoretical framework for tracking farmers' innovations to support farming system design. *ASD*, 41 (61). <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00713-z>
- Schneider O., Roger-Estrade J., Aubertot J.N., Doré T., 2006. Effect of seeders and tillage equipment on vertical distribution of oilseed rape stubble. *Soil & Tillage Research*, 85:115-122. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.12.007>
- Schott C., Mignolet C., Meynard J.M., 2010. Les oléoprotéagineux dans les systèmes de culture : évolution des assolements et des successions culturales depuis les années 1970 dans le bassin de la Seine. *OCL*, 17 :276-291. <https://doi.org/10.1051/ocl.2010.0334>
- Scopel E., Triomphe B., Affholder F., Da Silva, F.A.M., Corbeels M., Xavier, J.H.V., *et al.*, 2013. Conservation agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 33:113-130. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0106-9>

- Simon S., Lesueur-Jannoyer M., Plénet D., Lauri P.E., Le Bellec F., 2017. Methodology to design agroecological orchards: Learnings from on-station and on-farm experiences. *Eur. J. Agr.*, 82:320-330. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.004>
- Simon C., Sauphanor B., Defrance H., Lauri P.-E., 2009. Manipulations des habitats du verger biologique et de son environnement pour le contrôle des bio-agresseurs. Des éléments pour la modulation des relations arbre-ravageurs-auxiliaires. *Innovations Agronomiques*, 4:125-134.
- Singh V., Singh H., Raghubanshi A.S., 2017. Effect of N application on emergence and growth of weeds associated with rice. *Tropical Ecology*, 58:807-822.
- Sirami C., Gross N., Bosem Baillod A., Bertrand C., Carrié R., Hassg A., *et al.*, 2019. Increasing crop heterogeneity enhances multitrophic diversity across agricultural regions. *PNAS*, 116:16442-16447. <https://doi.org/10.1073/pnas.1906419116>
- SSP – Agreste, 2017. Enquête pratiques culturelles en grandes cultures et prairies.
- Stomph T., Dordas C., Baranger A., de Rijk J., Dong B., Evers J., *et al.*, 2020. Designing intercrops for high yield, yield stability and efficient use of resources: Are there principles? *Advances in Agronomy*, 160. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.10.002>
- Terres Inovia, 2019, mars 25. Etat des résistances selon la région et le ravageur, Terres Inovia – Colza.
- Toffolini Q., Jeuffroy M.H., Meynard J.M., Borg J., Enjalbert J., Gauffreteau A., *et al.*, 2020. Design as a source of renewal in the production of scientific knowledge in crop science. *Agric. Systems*, 185. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102939>.
- Tscharntke T., Grass I., Wanger T.C., Westphal C., Batary P., 2021. Beyond organic farming - harnessing biodiversity-friendly landscapes. *Trends in Ecology and Evolution*, 36:919-930. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.06.010>
- Valdes-Gomez H., Gary C., Vartolaro P., Lolas-Caneo M., Calonnec A., 2011. Powdery mildew development is positively influenced by grapevine vegetative growth induced by different soil management strategies. *Crop Protection*, 30:1168-1177. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.05.014>
- Vanloqueren, G., Baret, P., 2008. Why are ecological, low-input, multi-resistant wheat cultivars slow to develop commercially? A Belgian agricultural 'lock-in' case study. *Ecol. Econ.*, 66:436-446. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.10.007>
- Vasseur C., Joannon A., Aviron S., Burel F., Meynard J.M., Baudry J., 2013. The cropping systems mosaic: How does the hidden heterogeneity of agricultural landscapes drive arthropod populations? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 166:3-14. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.08.013>
- Vereijken P., 1997. A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. *European Journal of Agronomy*, 16. [https://doi.org/10.1016/S0378-519X\(97\)80029-3](https://doi.org/10.1016/S0378-519X(97)80029-3)
- Verret V., Pelzer E., Bedoussac L., Jeuffroy M.H., 2020. Tracking on-farm innovative practices to support crop mixture design: the case of annual mixtures including a legume crop. *Eur J Agr*, 115. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126018>
- Vincent-Caboud, L., Peigné, J., Casagrande, M., Silva, E.M., 2017. Overview of Organic Cover Crop-Based No-Tillage Technique in Europe: Farmers' Practices and Research Challenges. *Agriculture*, 7 (42). <https://doi.org/10.3390/agriculture7050042>
- Vincent-Caboud, L., Casagrande, M., David, C., Ryan, M.R., Silva, E.M., Peigne, J., 2019. Using mulch from cover crops to facilitate organic no-till soybean and maize production. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 39 (45). <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0590-2>
- Zhu Y., Chen H., Fan J., Wang Y., Li Y., Chen J., *et al.*, 2000. Genetic diversity and disease control in rice. *Nature*, 406:718-722. <https://doi.org/10.1038/35021046>
- Zuber S.M., Villamil M.B., 2016. Meta-analysis approach to assess effect of tillage on microbial biomass and enzyme activities. *Soil Biology & Biochemistry*, 97:176-187. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.03.011>

Liste des acronymes

AB	agriculture biologique
ACS	agriculture de conservation des sols
ACV	analyse de cycle de vie
Anses	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
ANR	Agence nationale de la recherche
AOC	appellation d'origine contrôlée
AOP	appellation d'origine protégée
BSV	bulletin de santé des végétaux
CASDAR	compte d'affectation spécial « Développement agricole et rural »
CCAN	Commission des comptes de l'agriculture française
CEPP	certificats d'économie de produits phytopharmaceutiques
CETA	Centre d'études techniques agricoles
CIPAN	cultures intermédiaires piège à nitrates
CMR	cancérogènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction
COV	certificat d'obtention végétale
CRISPR/Cas9	<i>Clustered Regularly Interspaced Palindromic Repeats/CRISPR associated protein 9</i>
Cuma	coopérative d'utilisation de matériel agricole
DAAF	Direction de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt
DGCCRF	Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes
DHS	distinction, homogénéité, stabilité
EBE	excédent brut d'exploitation
EFSA	<i>European Food Safety Authority</i>
E-S-R	<i>Efficiency-Substitution-Reconception</i>

FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i> (en français, <i>Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture</i>)
FEADER	Fonds européen agricole pour le développement rural
FNAB	Fédération nationale d'agriculture biologique des régions de France
FNSEA	Fédération nationale des syndicats d'exploitants agricoles
FREDON	Fédérations départementales de lutte contre les organismes nuisibles
GATT	<i>General Agreement on Tariffs and Trade</i>
GDA	groupement de développement agricole
GIE	groupement d'intérêt économique
GPS	<i>Global Positioning System</i> (en français : Géo-positionnement par satellite)
HDR	<i>Homology-Directed Repair</i>
HRI1	indicateur de risques harmonisés
HVE	haute valeur environnementale
IFT	indicateurs de fréquence de traitements
INAO	Institut national de l'origine et de la qualité
INRA	Institut national de la recherche agronomique
INRAE	Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
INSEE	Institut national de la statistique et des études économiques
Inserm	Institut national de la santé et de la recherche médicale
IPBES	<i>Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem</i>
IPM	<i>Integrated Pest Management</i> (en français : protection intégrée des cultures, PIC)
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LMR	limites maximales de résidus
MAE	mesures agro-environnementales
MAEC	mesures agro-environnementales et climatiques
NHEJ	<i>Non-Homologous End Joining</i>
NODU	nombre de doses utiles
N(P)BT	<i>New (Plant) Breeding Techniques</i>

OAD	outils d'aide à la décision
OECD	Organisation de coopération et de développements économiques (OCDE)
OGM	organisme génétiquement modifié
OMS	Organisation mondiale de la santé
ONG	Organisation non gouvernementale
PAC	Politique agricole commune
PAEC	projets agro-environnementaux et climatiques
PAT	projets alimentaires territoriaux
PPR	Programme Prioritaire de Recherche (PPR-CPA : Programme Prioritaire de Recherche « Cultiver et Protéger Autrement »)
PSE	paiements pour services environnementaux
QSA	quantité de substances actives
QTL	<i>Quantitative Trait Loci</i> (en français : loci à effet quantitatif)
R&D	recherche et développement
RICA	Réseau d'information comptable agricole
RMT	Réseau mixte technologique
RMT SdCi	Réseau mixte technologique « Systèmes de culture innovants »
RPD	redevance pour pollution diffuse
RPG	registre parcellaire graphique
SAU	surface agricole utile
SDHI	inhibiteurs de la succinate déshydrogénase
SDP	stimulateurs de défense des plantes
SDN	<i>Site-Directed Nuclease</i>
SNP	<i>Single-Nucleotide Polymorphism</i>
SSP	Service de la statistique et de la prospective
TALEN	<i>Transcription Activator-Like Effector Nuclease</i>
TGAP	taxe générale sur les activités polluantes
TIS	technique de l'insecte stérile
UE	Union européenne
VATE	valeur agronomique, technologique et environnementale
ZFN	<i>Zinc Finger Nuclease</i>
ZNT	zones non traitées

Liste des auteurs

Ballot Rémy

UMR Agronomie/AgroParisTech, Thiverval-Grignon

remy.ballot@inrae.fr

Bazoche Pascale

UMR SMART, Rennes

pascale.bazoche@inrae.fr

Bedoussac Laurent

ENSFEA, Castanet-Tolosan

laurent.bedoussac@inrae.fr

Boutet Manuel

UMR GREDEG CNRS/UCA, Sophia-Antipolis

manuel.boutet@univ-cotedazur.fr

Brisset Marie-Noëlle

Univ Angers, Institut Agro, INRAE, IRHS, SFR QUASAV, Angers

marie-noelle.brisset@inrae.fr

Carof Matthieu

Institut Agro, Rennes

matthieu.carof@agrocampus-ouest.fr

Carpentier Alain

UMR SMART, Rennes

alain.carpentier@inrae.fr

Cellier Vincent

Unité expérimentale du domaine d'Epoisses, Bretinière

vincent.cellier@inrae.fr

Cordeau Stéphane

UMR Agroécologie, Centre INRAE de Dijon, Dijon

stephane.cordeau@inrae.fr

Zéro pesticide

Delzon Sylvain
UMR Biogéco, Bordeaux
sylvain.delzon@u-bordeaux.fr

Fadhuile Adelaïde
GAEL, Grenoble
adelaïde.fadhuile@univ-grenoble-alpes.fr

Femenia Fabienne
UMR SMART, Rennes
fabienne.femenia@inrae.fr

Gendre Cédric
INRAE, US-ODR, Castanet-Tolosan
cedric.gendre@inrae.fr

Grimonprez Benoit
Université de Poitiers, Faculté de droit et des sciences sociales, Poitiers
benoit.grimonprez@univ-poitiers.fr

Hannachi Mourad
UMR SADAPT INRAE/AgroParisTech, Thiverval-Grignon
mourad.hannachi@inrae.fr

Huyghe Christian
INRAE, Direction scientifique agriculture, Paris
christian.huyghe@inrae.fr

Jacquet Florence
INRAE, UMR Moisa, Montpellier
florence.jacquet@inrae.fr

Jeuffroy Marie-Hélène
UMR Agronomie, INRAE, Thiverval-Grignon
marie-helene.jeuffroy@inrae.fr

Jouan Julia
INRAE, UMR Moisa, Montpellier
julia.jouan@inrae.fr

Jubault Mélanie
Institut Agro, Rennes
melanie.jubault@agrocampus-ouest.fr

Laperche Anne
Institut Agro, Rennes
anne.laperche@agrocampus-ouest.fr

Le Cadre Edith
Institut Agro, Rennes
edith.lecadre@agrocampus-ouest.fr

Leclerc Melen
UMR IGEPP, Le Rheu
melen.leclerc@inrae.fr

Malausa Thibaut
Institut Sophia Agrobiotech, Sophia-Antipolis
thibaut.malausa@inrae.fr

Manzanares-Dauleux Maria
Institut Agro, Rennes
maria.manzanares@agrocampus-ouest.fr

Merot Anne
UMR ABSys, Montpellier
anne.merot@inrae.fr

Meynard Jean-Marc
UMR SADAPT INRAE/AgroParisTech, Thiverval-Grignon
jean-marc.meynard@inrae.fr

Parmentier-Cajaiba Aura
UMR GREDEG CNRS/UCA, Sophia-Antipolis
aura.parmentier@univ-cotedazur.fr

Reboud Xavier
UMR Agroécologie, Centre INRAE de Dijon, Dijon
xavier.reboud@inrae.fr

Sauquet Alexandre
INRAE-CEE-M, Montpellier
alexandre.sauquet@inrae.fr

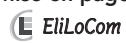
Simon Sylvaine
INRAE-UERI, Domaine de Gotheron, Saint-Marcel-lès-Valence
sylvaine.simon@inrae.fr

Subervie Julie
Montpellier Supagro – INRAE, Montpellier
julie.subervie@inrae.fr

Thoyer Sophie
Montpellier Supagro – INRAE, Montpellier
sophie.thoyer@inrae.fr

Édition
Clément Plantureux / EliLoCom

Mise en page



L'usage des pesticides chimiques est une préoccupation sociétale majeure en raison de leurs impacts négatifs sur l'environnement et la santé. Le Programme prioritaire de recherche (PPR) « Cultiver et Protéger Autrement », piloté par INRAE, joue un rôle structurant dans l'évolution des communautés scientifiques et dans l'émergence de fronts de science permettant une protection des cultures sans pesticides. L'objectif de l'ouvrage est d'expliquer les bases de cette stratégie et les principes d'actions. En se fixant un cap zéro pesticide, la recherche tente de dépasser les verrous actuels et de produire des innovations de rupture dans les champs biotechniques et socio-économiques.

Au-delà de la recherche, de l'enseignement et du secteur agricole, cet ouvrage vise également les acteurs de l'innovation, du développement et du conseil.

Florence Jacquet est économiste, directrice de recherche à INRAE. Elle assure la coordination scientifique du PPR « Cultiver et Protéger Autrement ».

Marie-Hélène Jeuffroy est agronome, directrice de recherche à INRAE, cheffe adjointe du département AgroEcoSystem. Elle conduit et coordonne des recherches sur la conception de systèmes de culture.

Julia Jouan est agroéconomiste, ingénieure de recherche à INRAE. Elle participe à la valorisation des travaux issus du PPR « Cultiver et Protéger Autrement ».

Edith Le Cadre est professeure d'agronomie à l'institut Agro. Elle conduit des recherches sur les boucles de rétroactions sol-plante et la rhizosphère pour la conception de systèmes de culture agroécologiques.

Thibaut Malausa est directeur de recherche à INRAE. Il travaille sur la biologie des populations des auxiliaires des cultures et sur le déploiement du biocontrôle.

Xavier Reboud est chercheur en agroécologie, directeur de recherche à INRAE et chargé de mission sur la place du numérique et des agroéquipements dans les évolutions de l'agriculture.

Christian Huyghe est directeur scientifique agriculture à INRAE. Il contribue à la réduction de l'usage et de l'impact des pesticides par la programmation scientifique des départements, l'innovation en partenariat avec les instituts techniques agricoles et les entreprises, et l'appui aux politiques publiques.

39 €

ISBN : 978-2-7592-3310-6



éditions
Quæ

Éditions Cirad, Ifremer, INRAE
www.quae.com

INRAE

ISSN : 1777-4624
Réf. : 02817