

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.



Zéro pesticide

Un nouveau paradigme de recherche
pour une agriculture durable

Zéro pesticide

Un nouveau paradigme de recherche
pour une agriculture durable

Florence Jacquet, Marie-Hélène Jeuffroy, Julia Jouan,
Edith Le Cadre, Thibaut Malausa, Xavier Reboud,
Christian Huyghe, coord.

Éditions Quæ
RD 10, 78026 Versailles Cedex

Collection Synthèses

Blé dur : synthèse des connaissances pour une filière durable
Joël Abécassis, Jack Massé, Abdelkamel Allaoua, coord.
2021, 320 p.

One health, une seule santé : théorie et pratique des approches intégrées de la santé
Jakob Zinsstag, Esther Schelling, David Waltner-Toews, Maxine A. Whittaker, Marcel Tanner, coord.
2021, 584 p.

Alerter la population face aux crues rapides : compréhension et évaluation d'un processus en mutation
Johnny Douvinet
2021, 256 p.

L'eau en milieu agricole : outils et méthodes pour une gestion intégrée et territoriale
Delphine Leenhardt, Marc Voltz, Olivier Barreteau, coord.
2020, 288 p.

Biomasse : une histoire de richesse et de puissance
Benoit Daviron
2020, 392 p.

Gestion durable de la flore adventice des cultures
Bruno Chauvel, Henri Darmency, Nicolas Munier-Jolain, Alain Rodriguez, coord.
2018, 354 p.

Pour citer cet ouvrage :

Jacquet F, Jeuffroy M-H, Jouan J, Le Cadre E, Malausa T, Reboud X, Huyghe C (coord.), 2022. *Zéro pesticide. Un nouveau paradigme de recherche pour une agriculture durable*. Versailles, éditions Quæ, 244 p. DOI : 10.35690/978-2-7592-3311-3

Éditions Quæ
RD 10
78026 Versailles Cedex

www.quae.com
www.quae-open.com

© Éditions Quæ, 2022

ISBN papier : 978-2-7592-3310-6
ISBN PDF : 978-2-7592-3311-3
ISBN ePub : 978-2-7592-3312-0

ISSN : 1777-4624

Cet ouvrage est diffusé sous licence CC-by-NC-ND 4.0.
Pour toutes questions, remarques ou suggestions : quae-numerique@quae.fr

Table des matières

Préface.....	9
Introduction.....	11
La recherche pour une agriculture sans pesticides : un cadre disruptif aujourd’hui pour construire les solutions de demain	11
Favoriser la prophylaxie	14
Développer l’agroécologie.....	15
Mobiliser tous les acteurs des filières	16
Références bibliographiques	18
Chapitre 1. État des lieux de l’utilisation des pesticides	21
La protection des cultures : un levier historique pour augmenter la production agricole	21
L’usage des pesticides est devenu une préoccupation sociétale majeure	37
Des années 1990 à aujourd’hui : des initiatives nombreuses mais peu efficaces pour réduire l’utilisation des pesticides	45
Conclusion	53
Références bibliographiques	53
Chapitre 2. Pourquoi faut-il changer de stratégie dans la protection des cultures ?	59
La dépendance aux pesticides des systèmes agricoles : quels sont les freins au changement ?.....	59
Deux stratégies dominantes pour se passer des pesticides mais qui atteignent leurs limites : l’IPM et l’AB	65
Conclusion	76
Références bibliographiques	76
Chapitre 3. Des systèmes de culture agroécologiques pour diminuer l’usage des pesticides	81
Se passer de pesticides nécessite un changement radical du mode de raisonnement des pratiques.....	81
Les solutions agronomiques existantes pour réduire et supprimer l’usage des pesticides.....	87
Se passer de pesticides nécessite un renouvellement des méthodes de travail des agronomes et des connaissances à produire.....	100
Conclusion.....	107
Références bibliographiques	108

Chapitre 4. Le(s) biocontrôle(s) dans une perspective d'agriculture sans pesticides	117
Biocontrôle : un seul terme pour une diversité de méthodes de protection des cultures.....	117
Les modèles agricoles dominants influencent les pratiques et recherches dans le domaine du biocontrôle	122
Quelles priorités de recherche et innovation favorisées par un cap zéro pesticide ?.....	127
De l'importance d'une diversification des modèles d'affaires dans le secteur du biocontrôle.....	135
Les services de diagnostic, de prévision et d'aide à la décision au centre des futures stratégies et modèles d'affaires de biocontrôle ?.....	140
Conclusion.....	144
Références bibliographiques	145
Chapitre 5. Développer des espèces et des variétés permettant la reconception des systèmes de culture	149
Introduction	149
Quels défis pour l'amélioration des plantes dans une agriculture sans pesticides ?	153
Pistes pour conduire les nouveaux programmes de sélection	160
Intégration des nouvelles variétés dans les systèmes de culture	169
Conclusion.....	172
Références bibliographiques	172
Chapitre 6. Mobiliser les agroéquipements et le numérique pour des systèmes de culture sans pesticides	177
Précision, autonomie et adaptabilité : les clés pour des agroéquipements au service de systèmes de culture sans pesticides.....	177
Le numérique au service d'une épidémiosurveillance élargie	183
Le numérique au service du partage, de la traçabilité et de la valorisation des productions agricoles.....	189
Conclusion.....	191
Références bibliographiques	191
Chapitre 7. Les leviers politiques et organisationnels	195
Les politiques de développement agricole et de formation : comment donner les clés aux agriculteurs pour cultiver autrement ?	196
Les instruments réglementaires : quel rôle dans la régulation des pesticides ?.....	201
Subventionner les pratiques alternatives aux pesticides : comment améliorer l'efficacité des mesures agroenvironnementales ?	206
Les dispositifs de taxation : comment les rendre acceptables ?	212
La différenciation des produits alimentaires : comment accroître l'intérêt pour les produits zéro pesticide	215

Dynamiques collectives territoriales : comment émerge la coordination des acteurs ?	218
Conclusion.....	221
Références bibliographiques	222
Conclusion générale.....	229
Le zéro pesticide comme nouveau paradigme pour la recherche.....	230
Le zéro pesticide : une problématique internationale qui touche l'ensemble des acteurs des filières agricoles et agroalimentaires.....	231
Penser le zéro pesticide avec les autres enjeux d'une agriculture durable.....	232
Références bibliographiques	235
Liste des acronymes.....	237
Liste des auteurs	241

Préface

L'intensification de notre agriculture a permis une augmentation considérable de la production agricole et alimentaire, en quantité et en qualité, mais elle a également généré des impacts négatifs qui sont aujourd'hui documentés. La sortie progressive de l'utilisation des pesticides chimiques est devenue un enjeu majeur compte tenu de leurs impacts sur la biodiversité et sur la santé. Fort de ce constat, depuis le Grenelle de l'Environnement en 2007, le gouvernement français a engagé les acteurs agricoles dans une mutation profonde afin d'évoluer vers une agriculture productive, plus agroécologique, plus respectueuse de l'environnement et de la santé humaine. En cohérence avec la directive européenne sur l'utilisation des produits phytopharmaceutiques compatible avec le développement durable, cet engagement s'est traduit au niveau français par l'élaboration du plan Écophyto.

La transition de l'agriculture vers une agriculture durable et rémunératrice pour les producteurs concerne l'ensemble des citoyens et doit mobiliser tous les acteurs socioéconomiques. Elle nécessite également un effort particulier de recherche et d'innovation, car la transformation des manières de produire doit pouvoir s'appuyer sur des connaissances scientifiques permettant d'offrir aux agriculteurs des solutions pour toutes les situations.

Dans ce contexte, le gouvernement a décidé dès 2018 d'accompagner les initiatives du plan Écophyto en lançant un Programme Prioritaire de Recherche (PPR) pour accélérer la recherche et l'acquisition de connaissances fondamentales, explorant tous les horizons mobilisables pour une sortie rapide des pesticides. Doté de 30 millions d'euros et d'une durée de six ans, ce PPR a été créé pour mobiliser les chercheurs de toutes les disciplines concernées. Un cadre approprié à l'exploration des fronts de science a été défini : il s'agit, à terme, de pouvoir totalement se passer de pesticides chimiques. Comme cet ouvrage le démontre, le choix d'un horizon ambitieux « zéro pesticide » permet que soient explorés des fronts de science porteurs d'innovations de rupture, mobilisant des approches systémiques et des leviers multiples, à savoir biotechniques, mais aussi organisationnels et sociétaux. La perspective d'une agriculture à faible recours aux pesticides, réaffirmée par le Président de la République Française lors du Sommet Mondial de la Biodiversité à Marseille en octobre 2021, rejoint l'ambition européenne du *Green Deal* d'atteindre - 50 % de pesticides à l'horizon 2030, c'est-à-dire dans un délai très court. Le besoin de recherche et d'innovation est donc considérable.

Le pilotage scientifique de ce PPR intitulé « Cultiver et Protéger Autrement » a été confié à INRAE, et un appel à projets a été lancé par l'ANR : il permet aujourd'hui de financer 10 projets ambitieux et structurants pour les communautés scientifiques. Ces projets rassemblent de nombreuses unités de recherche de nos universités et de nos organismes nationaux de recherche. Leurs approches sont principalement interdisciplinaires et leurs contenus articulent des recherches fondamentales à des études de mise en pratique de méthodes innovantes. Les approches fondamentales concernent, par exemple, la compréhension des mécanismes biologiques en jeu dans la santé des cultures et les conduites prophylactiques pour atteindre cet objectif ; les approches applicatives, d'autre part, conduites en partenariat avec les acteurs agricoles, concernent le déploiement de nouvelles méthodes de protection des cultures ainsi que les innovations

techniques et organisationnelles nécessaires. La taille de ces projets et leur durée favoriseront une structuration durable des communautés scientifiques sur des thématiques très prometteuses, telles que la compréhension du microbiote des plantes et son influence sur leur santé, les modalités d'épidémiosurveillance permettant la prophylaxie, la co-conception de systèmes de cultures, la création de variétés résistantes, les mélanges d'espèces et de variétés, la diversification des couverts, l'organisation spatiale des cultures dans le paysage, ou encore de nouvelles méthodes de biocontrôle, mais aussi les politiques publiques et l'organisation collective.

En complément des projets de recherche, l'animation globale du programme prend des initiatives pour que l'impact de ces recherches soit assuré. Des démarches originales d'analyse des impacts tout le long du programme et des différents projets sont développées. Pour augmenter ces impacts et assurer la promotion du programme et de ses résultats, des travaux de prospective sont réalisés pour imaginer ce qui serait une agriculture européenne sans pesticides en 2050. En parallèle, des colloques et événements impliquant à la fois les communautés scientifiques nationales comme internationales et les acteurs du monde agricole sont organisés. Ces événements permettront de partager l'évolution de ces projets ainsi que leurs acquis pour faciliter le transfert des connaissances et des solutions vers les agriculteurs et la société.

Cet ouvrage au titre ambitieux a été coordonné par les chercheurs à l'origine de la définition du cadre scientifique du programme et de son pilotage. Il propose d'illustrer la démarche de conception du programme au travers d'un premier état des lieux des enjeux de la sortie des pesticides, des connaissances d'ores et déjà disponibles et des pistes de recherche prometteuses qui permettraient de « Cultiver et de Protéger Autrement » sans l'utilisation de pesticides chimiques.

Bien entendu, ce livre n'illustre que l'étape initiale de conception du programme « Cultiver et Protéger Autrement », montrant l'originalité de la dynamique scientifique mise en œuvre. La progression de nos connaissances produira les savoir-faire nécessaires pour se soustraire au besoin de pesticides. Cette démarche est d'emblée conçue à l'échelle internationale, européenne particulièrement, comme l'illustre l'Alliance Européenne de Recherche « Vers une agriculture sans pesticides de synthèse », portée par la France, l'Allemagne et des organismes de recherche de 18 autres pays européens. Ainsi, ce programme a l'ambition de se répandre largement pour contribuer aux stratégies européennes concernant la transition agroécologique, la sécurité alimentaire et la réduction des impacts environnementaux de l'agriculture. Le programme va structurer la communauté de recherche française pour contribuer à cette ambition européenne et pour permettre à la recherche française et à ses équipes de jouer un rôle moteur au niveau international.

Je suis convaincue que les acteurs de la recherche et de l'enseignement, ainsi que l'ensemble des professions concernées par l'évolution de l'agriculture, trouveront dans cet ouvrage des ressources pour alimenter leurs réflexions, leurs décisions et leurs actions. Je souhaite que cet effort collectif apporte à notre société l'ambitieuse et indispensable transition des modes de production agricole assurant pour les générations futures une alimentation saine et durable.

Frédérique Vidal
ministre de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation

Introduction

La recherche pour une agriculture sans pesticides : un cadre disruptif aujourd'hui pour construire les solutions de demain

Christian Huyghe, Florence Jacquet, Julia Jouan

L'agriculture est un des secteurs économiques qui a connu le plus de bouleversements au cours du xx^e siècle, avec une intensification de la production agricole sans précédent. Cette intensification a permis d'augmenter les volumes de la production alimentaire, d'en sécuriser la qualité sanitaire et de diminuer le coût de l'alimentation, un enjeu majeur pour l'agriculture française et européenne de l'après-guerre. Pour y parvenir, des systèmes de culture très simplifiés, avec un nombre limité de cultures et des pratiques standardisées, se sont généralisés dans la plupart des exploitations agricoles dont la taille moyenne et la surface par travailleur se sont progressivement accrues. Dans cet objectif d'augmenter la quantité et la qualité des productions végétales, on a progressivement construit des systèmes de plus en plus sensibles aux bioagresseurs et on a créé les conditions favorables à leur développement : protéger les cultures est donc devenu un enjeu majeur. Les systèmes intensifs qui se sont développés sont, par définition, dépendants des intrants : des engrais pour la fertilisation et, ce qui sera le sujet de cet ouvrage, des pesticides pour la protection des cultures. Tout au long de cet ouvrage, le terme « pesticide » désignera les pesticides de synthèse et les pesticides naturels ayant un impact significatif sur l'environnement et la santé humaine.

Mobilisant les avancées technologiques importantes des entreprises de l'agrochimie, de nombreux pesticides ont ainsi été élaborés au cours des dernières décennies pour répondre à ce besoin croissant. Si l'objectif de protection efficace de la santé des cultures a bien été atteint, ce recours massif aux pesticides a eu des conséquences

sur l'environnement et la santé humaine, et cela malgré les règles sur la toxicité et l'écotoxicité qui gouvernent les procédures d'autorisations de mise en marché. Les conséquences négatives sur la biodiversité sont importantes, à la fois directement, par l'effet biocide des substances utilisées, et indirectement, par la profonde évolution des systèmes de culture et des paysages agricoles qui ont été façonnés au cours du temps (Sánchez-Bayo et Wyckhuys, 2019). De nombreuses études scientifiques attestent également des multiples répercussions sur la santé humaine, aussi bien pour les utilisateurs de pesticides que pour les consommateurs de produits agricoles et les citoyens proches des parcelles traitées. L'ensemble de ces impacts, parfois qualifiés de « coûts cachés des pesticides » (Bourguet et Guillemaud, 2016), ont été quantifiés, qu'il s'agisse des pertes liées à la disparition des pollinisateurs (Costanza *et al.*, 1997) ou des impacts sur la santé, notamment des agriculteurs (Goeb *et al.*, 2020).

Dans ce contexte, la réduction de l'utilisation des pesticides constitue un enjeu sociétal majeur ; elle est inscrite à l'agenda politique français et européen depuis plus d'une décennie. La directive 2009/128/CE demande ainsi à chaque pays européen de réduire l'usage des pesticides et leur impact sur l'environnement. Cette directive s'est traduite en France dans le plan Écophyto qui, dès 2008, s'est donné comme objectif de réduire, en 10 ans, l'usage des pesticides de 50 %, « si possible ». Témoignant d'une prudence politique, la présence de ces deux mots « si possible » traduit en réalité l'extrême difficulté technique, économique et organisationnelle d'un tel changement. Les courbes de vente de pesticides en France, longuement commentées chaque année au moment de leurs publications, viennent confirmer la difficulté de la transition, alors que, dans le même temps, l'analyse des états du milieu, et notamment l'effondrement de la biodiversité, confirme l'urgence de la transition. En 2020, le *Green Deal* européen, notamment au travers de la stratégie *Farm to Fork*, franchit un pas supplémentaire en fixant un nouvel objectif : - 50 % d'utilisation de pesticides d'ici 2030. Un rapport récent souligne que cet objectif ne pourra être atteint qu'au prix de changements profonds, aussi bien au sein des filières agricoles que dans la recherche agronomique (Guyomard *et al.*, 2020).

Depuis de nombreuses années, différents projets de recherche et de développement ont été menés dans le but de contribuer à réduire l'utilisation des pesticides. Ils ont été soutenus par les politiques publiques européennes et nationales, notamment le Plan Écophyto. Ils montrent que des réductions de 20 % à 30 % de l'utilisation des pesticides sont possibles, le plus souvent sans pénaliser le revenu des agriculteurs. C'est également ce que démontrent les réseaux de fermes DEPHY sur les différentes filières agricoles où les agriculteurs ont pu déployer de manière volontaire de nombreux leviers techniques disponibles en profitant d'un accompagnement important par les ingénieurs des réseaux. L'absence d'incidence économique négative a été confirmée par Lechenet *et al.* (2017) pour une large majorité d'exploitations agricoles de grande culture. Seuls les systèmes de culture avec une forte présence de cultures industrielles (pomme de terre, betterave sucrière) affichent un risque de perte de revenus. Cependant, les changements de pratiques nécessaires pour réduire les pesticides ne se sont pas généralisés à l'échelle nationale et l'utilisation des pesticides a augmenté jusqu'en 2017 (+ 15 % entre 2010 et 2017).

Ce phénomène peut s'expliquer en partie par des impasses techniques, mais surtout par des facteurs socio-économiques : l'ensemble du secteur agricole est « verrouillé » autour de l'utilisation des pesticides. En effet, les agriculteurs, mais également les acteurs de l'amont (équipementiers, fournisseurs d'intrants) et de l'aval (transformateurs, distributeurs), ont adapté leurs stratégies, et leurs relations aux autres acteurs, à la possibilité d'utiliser des pesticides. Ce « verrouillage » est renforcé par l'importance des investissements spécifiques (Schreyögg et Sydow, 2011 ; Valiorgue, 2020) liés aux systèmes intensifs spécialisés et aux productions qui en sont issues, tant au niveau des agriculteurs que des entreprises de stockage et de transformation, en aval. Cette situation de blocage concerne également la diversité génétique puisque l'accès à de nouvelles variétés ou de nouvelles espèces se trouve limité à la fois par l'offre assurée par les entreprises de la sélection, dont les programmes ont été longtemps orientés par la poursuite de l'intensification, et par l'inscription dans un catalogue national ou européen de variétés dont les règles d'inscription correspondent au système dominant (Bollier *et al.*, 2014).

La recherche agronomique elle-même est concernée par ce verrouillage : en développant des programmes de recherche qui se situent dans un cadre où les pesticides sont encore présents, des innovations de rupture ont moins de chance d'émerger. De ce point de vue, l'analyse des projets de recherche soutenus cette dernière décennie, au niveau français et européen, est éclairante. S'il existe aujourd'hui quelques essais visant, en agriculture conventionnelle, à une suppression totale des pesticides, la quasi-totalité des projets de recherche et développement réalisés jusqu'à présent privilégie un objectif de réduction, plus ou moins important. Seule une très petite minorité de projets se situe dans une optique de gestion des bioagresseurs sans pesticides de synthèse. Dès lors, les conditions sociales, économiques et technologiques qui favorisent une forte réduction de l'utilisation des pesticides peuvent être questionnées : avons-nous les connaissances et les moyens de réduire l'utilisation des pesticides sur l'ensemble des cultures ? De quelles ressources avons-nous besoin pour éviter d'utiliser des pesticides ? Comment les agriculteurs et l'ensemble de la filière agricole doivent-ils adapter leurs activités ? Quel est le rôle de la recherche pour rendre possible ce changement ?

Le Programme Prioritaire de Recherche (PPR) « Cultiver et Protéger Autrement » se situe dans une perspective originale, en posant le scénario extrême d'une agriculture « sans pesticides », non prescriptif, mais qui oblige à explorer de nouvelles voies de recherche. Scénario non prescriptif, car le PPR ne donne pas, *a priori*, le chemin à suivre aux agriculteurs, chemin qui devrait être mis en débat avec les agriculteurs et la société au regard des connaissances disponibles aujourd'hui. L'objectif est d'entreprendre des recherches dans ce cadre « sans pesticides » afin d'explorer de nouveaux fronts de science et de développer des connaissances et des solutions disponibles à la fois pour une réduction significative de l'usage des pesticides à court terme et pour des innovations futures. À plus long terme, et grâce à ces innovations, l'objectif est bien de développer une agriculture sans pesticides, pour toutes les productions et sur tous les territoires. Se fixer un tel cap permet ainsi à la fois d'ouvrir des fronts nouveaux de recherche et de produire dès aujourd'hui des connaissances pour construire demain l'ensemble des solutions permettant de répondre à la demande sociétale d'une agriculture sans pesticides. L'ambition de ce PPR va

au-delà des enjeux sous-jacents à la plupart des projets de recherche conduits à ce jour. Elle oblige à un changement de regard pour promouvoir une avancée sur des fronts de science porteurs mais inédits, ou insuffisamment explorés. Elle concerne de nombreux domaines des sciences biotechniques et des sciences sociales et implique une évolution des disciplines scientifiques intégrant les nouveaux enjeux et travaillant de façon coordonnée.

Trois grands principes d'action permettent de structurer notre projet et en dessinent les orientations scientifiques : favoriser la prophylaxie, développer l'agroécologie et mobiliser tous les acteurs des filières.

► Favoriser la prophylaxie

La prophylaxie recouvre l'ensemble des moyens mis en œuvre, en dehors des pesticides, pour empêcher l'apparition ou le développement des bioagresseurs. Elle est l'un des principaux leviers possibles pour se passer des pesticides puisqu'elle vise justement à réduire la pression qu'exercent les bioagresseurs sur les cultures. Le terme « bioagresseurs » que nous utiliserons tout au long de cet ouvrage correspond à ce qu'on appelle couramment « ennemis des cultures » ou « pest » en anglais. Ce sont les organismes susceptibles d'engendrer des pertes de récolte directes ou indirectes à travers une diminution du rendement, une altération de la qualité nutritionnelle, organoleptique ou visuelle, mais aussi des coûts supplémentaires de récolte ou de tri (Aubertot *et al.*, 2006). Ils comprennent principalement les adventices (« les mauvaises herbes »), les champignons pathogènes et les insectes ravageurs. Or, actuellement, la protection contre les bioagresseurs telle que pratiquée en France repose massivement sur des méthodes d'application systématique à vocation curative (dont le mode d'action est principalement biocide) à travers l'application de pesticides quand le bioagresseur est visible, voire souvent quand il n'est pas visible. Meynard *et al.* (2009) ont illustré comment les pratiques de protection des cultures ont évolué au fil des décennies avec le développement de la chimie, de l'amélioration génétique et une disparition de la prophylaxie. Il est donc à présent indispensable d'inverser l'approche en promouvant d'abord les approches prophylactiques. Plusieurs pratiques prophylactiques sont d'ores et déjà connues et font partie de ce qu'on appelle l'*Integrated Pest Management* (IPM). Cependant, elles n'ont été étudiées que de façon segmentée et n'ont concerné qu'un petit nombre d'espèces ou de systèmes de production. Des recherches sont ainsi nécessaires pour élargir le socle de connaissances sur les pratiques permettant de réduire la pression des bioagresseurs, de favoriser la prophylaxie et d'en permettre le pilotage. La question de la distinction entre ces pratiques et les pratiques actuelles de l'agriculture biologique (AB) doit également être précisée ici. L'AB bannit l'usage des pesticides de synthèse, mais autorise certaines substances d'origine naturelle dont les effets sur l'environnement peuvent être négatifs, comme par exemple le sulfate de cuivre (Andrivon *et al.*, 2018). Par ailleurs elle exclut l'utilisation des engrais minéraux de synthèse, ce qui n'est pas le cas de notre approche. Cependant l'AB, au travers de son cahier des charges, a exploré des pratiques et des systèmes qui peuvent constituer des sources

d'inspiration pour les travaux menés dans le cadre du PPR, et inversement, les pistes de recherche explorées dans le PPR devraient être bénéfiques à l'AB.

► Développer l'agroécologie

L'agroécologie est un cadre particulièrement riche pour développer une agriculture plus durable. Ce terme est polysémique puisqu'il désigne, à la fois, une discipline scientifique, un ensemble de pratiques et un mouvement social (Wezel *et al.*, 2009). L'agroécologie est aujourd'hui largement mobilisée par de nombreux acteurs, sa mise en œuvre concrète étant prévue dans la loi pour l'avenir de l'agriculture française votée par le Parlement français en 2014. Un des principes de base de l'agroécologie est l'augmentation de la diversité fonctionnelle afin d'augmenter les régulations biologiques et les services écosystémiques. Hector (1999) a publié un travail fondateur sur les prairies en démontrant que l'augmentation du nombre d'espèces végétales et du nombre de groupes fonctionnels permettait d'augmenter la production de biomasse. Cette diversification concerne bien sûr les cultures de rente, avec une diversification des successions, mais aussi une diversification intra-parcellaire, avec des mélanges d'espèces, telles les associations céréales – protéagineux, dont les effets prophylactiques ont été démontrés (Stomph *et al.*, 2020). Mais l'agroécologie nous amène aussi à penser autrement les cycles cultureux, en intégrant d'autres cultures que les cultures de rente. Il s'agit tout d'abord de raisonner l'utilisation de plantes de service, non plus seulement pour leurs effets sur le piégeage de l'azote en excès, le stockage du carbone dans le sol (Bolinder *et al.*, 2020) et l'activité des pollinisateurs (Gallot *et al.*, 2016), mais également sur le contrôle des bioagresseurs. Il s'agit ensuite de travailler sur la durée des cycles cultureux et sur leur organisation dans le temps. Ainsi la gestion des cultures en *relay-cropping*, où la culture n+1 est semée dans la culture n quelques mois avant la récolte de celle-ci, ouvre une voie originale, avec des augmentations significatives de production, une forte réduction des besoins de protection phytosanitaire, mais qui nécessite aussi une évolution des besoins en agroéquipement et en variétés adaptées (Tanveer *et al.*, 2017).

L'augmentation de la diversité fonctionnelle promue par l'agroécologie doit être considérée à différentes échelles spatiales, depuis la plante et la parcelle agricole, jusqu'au paysage, et à différentes échelles de temps. Ainsi, la diversification des cultures à l'échelle de la rotation, ou encore les espaces enherbés autour des champs, contribuent à l'augmentation de la diversité fonctionnelle. Celle-ci concerne non seulement les plantes, mais plus largement les herbivores ou encore les communautés microbiennes hébergées. En effet, les communautés, regroupées sous le terme de « microbiote » (Rout, 2014), qui sont présentes dans les plantes et à la surface des feuilles et des racines, représentent un aspect de la biodiversité souvent méconnu mais prometteur (Dini-Andreote, 2020 ; Patle *et al.*, 2018). Dans cette vision de l'agroécologie, il faut également prendre en compte le sol et son fonctionnement qui influencent largement les régulations biologiques, la nutrition des plantes et donc la gestion des bioagresseurs. L'agroécologie concerne enfin les échelles paysagères où s'organise aussi la diversité fonctionnelle. Sur la base de l'étude de plus de 500 sites dans le monde, Sirami *et al.* (2019) ont montré

que l'augmentation de l'hétérogénéité des paysages augmentait la diversité multi-trophique dans ces milieux, et donc les capacités de régulation des bioagresseurs. Cette hétérogénéité des paysages est directement liée à la diversité des cultures, à la proportion d'espaces semi-naturels et à la taille moyenne des parcelles cultivées. Une taille moyenne des parcelles réduite étant plus susceptible de favoriser l'hétérogénéité spatiale des cultures et la diversité multi-trophique, des questions se posent évidemment au regard de l'évolution des structures agricoles.

À partir de la compréhension des mécanismes biologiques à l'œuvre, l'agroécologie permet de considérer d'un œil nouveau les leviers du biocontrôle, non pas dans une approche de substitution aux pesticides, mais comme un levier d'augmentation de la diversité fonctionnelle, pour favoriser les régulations biologiques et ainsi limiter les impacts des bioagresseurs. Par ses différents leviers, le développement de l'agroécologie conduit nécessairement à l'augmentation de la complexité dans les systèmes cultivés. Ceci est diamétralement opposé à l'évolution connue au cours des cinquante dernières années, où la recherche de performances économiques dans les exploitations agricoles s'est traduite par la simplification des systèmes agricoles, la spécialisation des territoires et, en corollaire, la réduction de la diversité des cultures et des paysages, la disparition des espaces semi-naturels et des infrastructures agro-écologiques, et l'augmentation de la taille des parcelles. Des recherches sont donc nécessaires pour permettre la complexification des systèmes, d'autant plus qu'elle devra être adaptée aux différents contextes pédoclimatiques. Cependant, la simplification des systèmes de production a eu par le passé l'avantage de réduire la charge de travail et la charge mentale de l'agriculteur. Il ne faut donc pas sous-estimer le fait que la complexité même de l'agroécologie puisse être un frein à son développement. Comment éviter qu'un système complexe ne soit compliqué à gérer ? Les services de développement agricole, en particulier la formation et le conseil, devront prendre en charge cette problématique, tandis que les solutions issues du numérique et de l'agroéquipement devront permettre d'accompagner et de faciliter le développement de l'agroécologie.

► Mobiliser tous les acteurs des filières

L'évolution vers des productions plus diverses nécessite une mobilisation et une transformation de l'ensemble des acteurs des filières agricoles, aussi bien en amont (équipementiers, fournisseurs d'intrants, sélectionneurs) qu'en aval (transformateurs, distributeurs, consommateurs). En effet, la diversification des cultures et la mise en place de nouvelles pratiques basées sur l'agroécologie et la prophylaxie vont induire de nouveaux besoins : amélioration génétique des cultures de diversification et des plantes de service, adaptation des équipements pour réaliser des semis en *relay-cropping*, pour récolter des associations ou encore pour faciliter le désherbage mécanique. Des innovations sont également attendues pour faciliter l'application de produits de biocontrôle et suivre de manière automatique l'état de santé des cultures afin de piloter la prophylaxie. Outre les innovations techniques pour accompagner l'évolution des pratiques des agriculteurs, différents acteurs des filières agroalimentaires devront également adapter leurs outils et leurs stratégies.

De nouvelles matières premières agricoles vont être produites et induire des évolutions dans l'aval : produits récoltés moins standardisés pour les espèces déjà cultivées, espèces récoltées en mélange, nouvelles cultures et produits récoltés. Ainsi, il sera sans doute nécessaire de développer des innovations couplées entre le secteur agricole et le secteur agroalimentaire afin que les nouvelles productions répondent aux stratégies des entreprises et à la demande des consommateurs, tout en assurant un prix rémunérateur pour les agriculteurs (Meynard *et al.*, 2017). Il sera sans doute incontournable de mettre en place une différenciation des produits afin de valoriser la production sans pesticides à travers une identification et une reconnaissance par le consommateur des caractéristiques du produit. Ainsi, c'est bien à une reconception de l'ensemble du système alimentaire qu'appelle cette agriculture sans pesticides. Les outils du numérique peuvent jouer un rôle important pour faciliter la traçabilité de la production et la capacité à documenter en temps réel les qualités de la matière première. Les politiques publiques, y compris les signes officiels de qualité, mais aussi les cahiers des charges privés constitueront des leviers essentiels pour permettre une telle transition. Pour réussir cette reconception de l'ensemble du système, les consommateurs devront également faire évoluer leurs habitudes. La demande de produits à bas prix et d'apparence extérieure irréprochable n'est en effet guère compatible avec l'exigence du zéro pesticide. L'augmentation de la production de légumineuses, qui apparaît essentielle à la diversification des cultures et qui répond aussi à l'objectif de réduction de l'utilisation d'engrais azoté et d'émission de gaz à effet de serre, peut aller de pair avec une évolution des modes de consommation et des régimes alimentaires intégrant plus de légumineuses alimentaires (Magrini *et al.*, 2018). Derrière cette nécessaire mobilisation de l'ensemble des acteurs autour d'une agriculture sans pesticides, se cache finalement la question de considérer comme un bien commun la protection de l'environnement et la santé, mais aussi la protection de la capacité à produire des générations futures.

Enfin, il est nécessaire de souligner l'importance d'intégrer les différents acteurs des filières agricoles dans les recherches à mener. En particulier, les innovations pour atteindre le zéro pesticide devront être conçues et gérées en étroite collaboration avec les acteurs concernés. Cette approche est d'autant plus importante que bon nombre des solutions qui seront développées ne seront pas généralisables partout et nécessiteront une adaptation à chaque situation, qu'il s'agisse du milieu pédo-climatique ou biologique, ou des conditions de marché. Ainsi, nous pensons qu'en engageant des innovations qui prennent en considération les ressources, les objectifs mais aussi les contraintes des acteurs concernés, il sera possible d'engager des filières entières dans des transformations radicales.

Cet ouvrage présente la situation actuelle concernant l'utilisation des pesticides en France et développe cinq leviers d'action complémentaires à mettre en œuvre et à combiner pour cultiver et protéger les cultures autrement, en se passant des pesticides. Les deux premiers chapitres permettent d'introduire la problématique de l'ouvrage. Le chapitre 1 présente les facteurs historiques qui expliquent l'utilisation massive des pesticides telle qu'on la connaît aujourd'hui et les problèmes environnementaux et sanitaires auxquels cette utilisation a conduit, ainsi que les différentes initiatives qui ont été prises pour réduire l'utilisation des pesticides. Le chapitre 2 expose les raisons de la dépendance aux pesticides des systèmes actuels,

et pourquoi les deux stratégies mises en place pour se passer des pesticides, l'IPM et l'AB, ne sont actuellement pas suffisantes. Les chapitres suivants développent les différents leviers d'action pour se passer des pesticides. Le chapitre 3 s'intéresse à la conception des systèmes de culture, qui est au cœur de toute démarche permettant de modifier en profondeur la protection des cultures. Le chapitre 4 détaille les innovations attendues en matière de biocontrôle, en illustrant les différents fronts de science qui ont été ouverts récemment et offrent des perspectives nouvelles tout en analysant aussi les freins actuels au développement du biocontrôle. Le chapitre 5 expose les recherches à mener autour de l'amélioration des plantes et de la génétique végétale. Le chapitre 6 présente les évolutions attendues en matière d'agroéquipements et de numérique permettant en particulier de limiter le recours aux herbicides, d'adapter les équipements à différents contextes et de modifier la prise de décision. Le chapitre 7 détaille les différents leviers politiques et organisationnels à mettre en place pour favoriser la transition vers le zéro pesticide. Enfin, la conclusion nous permet de mettre en perspective la problématique du zéro pesticide au regard des autres enjeux du développement d'une agriculture durable.

► Références bibliographiques

- Andrivon D., Bardin M., Bertrand C., Brun L., Daire X., Fabre F., *et al.*, 2018. *Peut-on se passer du cuivre en protection des cultures biologiques ? Synthèse du rapport d'expertise scientifique collective*, report, Paris, France, Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), 66 p. <https://hal.inrae.fr/hal-02790342>
- Aubertot J.-N., Colbach N., Félix I., Munier-Jolain N., Roger-Estrade J., 2006. La composante biologique, in Doré T., Martin P., Le Bail M., Ney B., Roger-Estrade J. (éd.), *L'agronomie aujourd'hui*, Editions Quae, p. 199-223.
- Bolinder M.A., Crotty F., Elsen A., Frac M., Kismányoky T., Lipiec J., *et al.*, 2020. The effect of crop residues, cover crops, manures and nitrogen fertilization on soil organic carbon changes in agroecosystems: a synthesis of reviews, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25(6) :929-952. <https://doi.org/10.1007/s11027-020-09916-3>
- Bollier D., Crosnier H.L., Petitjean O., 2014. *La renaissance des communs : Pour une société de coopération et de partage*, Paris, Charles Leopold Mayer, 240 p.
- Bourguet D., Guillemaud T., 2016. The hidden and external costs of pesticide use, in Lichtfouse E. (éd.), *Sustainable Agriculture Reviews*, vol. 19. Springer, Cham, p. 35-120. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26777-7_2
- Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., *et al.*, 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, 387(6630):253-260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Dini-Andreote F., 2020. Endophytes: the second layer of plant defense, *Trends in Plant Science*, 25(4):319-322. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.01.007>
- Gallot M., Buchwalder G., Beuret B., Cecilio J.-M., Guinemer M., Marigo P., *et al.*, 2016. Autumn intermediate crops and development of honey-bee colonies, *Agrarforschung Schweiz*, 7(3):120-127.
- Goeb J., Dillon A., Lupi F., Tschirley D., 2020. Pesticides: what you don't know can hurt you, *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 7(5):801-836. <https://doi.org/10.1086/709782>
- Guyomard H., Bureau J.-C., Chatellier V., Detang-Dessendre C., Dupraz P., Jacquet F., *et al.*, 2020. *The Green Deal and the CAP: policy implications to adapt farming practices and to preserve the*