Les leviers politiques et organisationnels

Pascale Bazoche, A. Carpentier, Adélaïde Fadhuile, Fabienne Femenia, Cedric Gendre, Benoît Grimonprez, Mourad Hannachi, Florence Jacquet, Julia Jouan, Alexandre Sauquet, et al.

▶ **To cite this version:**

Pascale Bazoche, A. Carpentier, Adélaïde Fadhuile, Fabienne Femenia, Cedric Gendre, et al.. Les leviers politiques et organisationnels. Florence Jacquet; Marie-Hélène Jeuffroy; Julia Jouan; Édith Le Cadre; Thibaut Malausa; Xavier Reboud; Christian Huyghe. Zéro pesticide : un nouveau paradigme de recherche pour une agriculture durable, Éditions Quae, pp.195-227, 2022, Synthèses, 978-2-7592-3310-6. hal-03612024

HAL Id: hal-03612024
https://hal.inrae.fr/hal-03612024

Submitted on 17 Mar 2022

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

Synthèses

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.

éditions Quæ

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 futurs 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 bibliograhiques 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 culturaux, 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 culturaux 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 agroécologiques, 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 pédoclimatique 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*

EU's natural resources, Brussels, Belgium, European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, 162 p.

Hector A., 1999. Plant diversity and productivity experiments in European grasslands, *Science*, 286(5442):1123-1127. https://doi.org/10.1126/science.286.5442.1123

Lechenet M., Dessaint F., Py G., Makowski D., Munier-Jolain N., 2017. Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability on arable farms, *Nature Plants*, 3:17008. https://doi.org/10.1038/nplants.2017.8

Magrini M.-B., Anton M., Chardigny J.-M., Duc G., Duru M., Jeuffroy M.-H., *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

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., Rolland B., Loyce C., Félix I., Lonnet P., 2009. Quelles combinaisons variétés/conduites pour améliorer les performances économiques et environnementales de la culture de blé tendre ?, *Innovations Agronomiques*, 729-47. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01173147

Patle P., Navnage N., Ramteke P., 2018. Endophytes in plant system: roles in growth promotion, mechanism and their potentiality in achieving agriculture sustainability, *International Journal of Chemical Studies*, 6(1):270-274.

Rout M.E., 2014. The plant microbiome, *in* Paterson A.H. (ed), *Advances in Botanical Research*, Academic press, 69:279-309. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417163-3.00011-1

Sánchez-Bayo F., Wyckhuys K.A.G., 2019. Worldwide decline of the entomofauna: a review of its drivers, *Biological Conservation*, 232:8-27. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.01.020

Schreyögg G., Sydow J., 2011. Organizational path dependence: a process view, *Organization Studies*, 32(3):321-335. https://doi.org/10.1177/0170840610397481

Sirami C., Gross N., Baillod A.B., Bertrand C., Carrié R., Hass A., *et al*., 2019. Increasing crop heterogeneity enhances multitrophic diversity across agricultural regions, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(33):16442-16447. https://doi.org/10.1073/pnas.1906419116

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?, *in* Sparks D.L. (ed) *Advances in Agronomy*, Academic Press, 160:1-50. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.10.002

Tanveer M., Anjum S.A., Hussain S., Cerdà A., Ashraf U., 2017. Relay cropping as a sustainable approach: problems and opportunities for sustainable crop production, *Environmental Science and Pollution Research*, 24(8):6973-6988. https://doi.org/10.1007/s11356-017-8371-4

Valiorgue B., 2020. *Refonder l'agriculture à l'heure de l'anthropocène*, Lormont, France, Le Bord De L'eau, 240 p. (coll. En Anthropocene).

Wezel A., Bellon S., Doré T., Francis C., Vallod D., David C., 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 29(4):503-515. https://doi.org/10.1051/agro/2009004

Chapitre 1

État des lieux de l'utilisation des pesticides

Florence Jacquet, Julia Jouan

La protection des cultures : un levier historique pour augmenter la production agricole

La protection des cultures telle que nous la connaissons aujourd'hui a commencé à se mettre en place au XX^{e} siècle avec le développement des pesticides de synthèse. Ces intrants, ainsi que les autres innovations technologiques en matière d'amélioration génétique et de fertilisants, ont permis d'augmenter significativement la production agricole française et mondiale. Cependant, leurs impacts sur l'environnement et la santé font qu'ils sont à présent devenu une préoccupation sociétale majeure. Une volonté de réduire les effets négatifs de l'intensification de la production agricole a donc émergé à partir des années 1990, à travers différentes réformes de la politique agricole commune (PAC) et une évolution de la réglementation concernant l'usage des pesticides.

La protection des cultures existe depuis l'avènement de l'agriculture

Depuis l'avènement de l'agriculture, les biogresseurs ont représenté un danger pour les productions végétales, et les agriculteurs ont toujours cherché des moyens de protéger les plantes cultivées. Pour cela, les premières techniques employées étaient le désherbage manuel pour lutter contre les adventices et la cueillette manuelle des larves d'insectes. Concernant les maladies causées par les microorganismes, il n'y avait pas de moyen de lutte hormis la sélection de variétés résistantes. Des preuves de lutte datant de 2500-1500 avant notre ère ont toutefois été retrouvées : elles

consistaient en l'utilisation d'insecticides et de fongicides, en particulier à base de soufre, par les Sumériens et les Chinois (Oerke, 2006). En Occident, tout au long de l'Antiquité et du Moyen-Âge, le développement des bioagresseurs sera assimilé à des punitions divines dont le seul moyen de lutte est la soumission à Dieu (Poulain, 2004). Même l'avènement du microscope au XVII^e siècle, donnant lieu aux premières observations de champignons pathogènes, ne permet pas de faire le lien entre maladie des plantes et microorganismes. Il faudra attendre 1807 pour que la responsabilité d'un champignon (*Tilletia caries*) soit établie dans la maladie du blé appelée carie : le cuivre est alors proposé comme méthode de lutte. Malgré cette découverte, la protection des cultures reste balbutiante. L'Irlande sera frappée peu après par une terrible famine (1845-1847) due au mildiou de la pomme de terre, une maladie causée par le champignon *Phytophthora infestans.* À partir de 1864, c'est au tour de la France de connaître une crise sanitaire majeure à cause d'un insecte : le phylloxéra de la vigne *Daktulosphaira vitifoliae* (encadré 1.1). Ce puceron importé des États-Unis détruit en quelques années une très grande partie du vignoble français. Il faut alors attendre plus de trente ans pour qu'une solution de lutte soit trouvée : le greffage des plants de vignes français sur des porte-greffes issus de plants américains, naturellement résistants au phylloxéra.

Encadré 1.1. La crise du phylloxéra : des millions d'hectares de vignobles ravagés

Au début des années 1860, certaines vignes du sud de la France sont atteintes d'une mystérieuse maladie : des galles (boursouflures) apparaissent sur les feuilles qui jaunissent petit à petit, les pieds de vignes finissant par mourir trois ans plus tard. La maladie s'étend rapidement à plusieurs régions viticoles en France et en Europe. De nombreux experts sont dépêchés sur place et le responsable finit par être identifié : un puceron suceur qui s'attaque aux racines jusqu'à épuisement total de la sève. Son mode de reproduction lui permet de coloniser massivement et rapidement de grands espaces. En effet, au printemps, une femelle sans aile éclot à partir d'un œuf appelé œuf d'hiver. Une fois adulte, elle se met à pondre entre 40 et 100 œufs, donnant tous, eux aussi, naissance à des femelles, sans qu'il y ait fécondation : c'est une parthénogenèse thélytoque. Ce cycle de vingt jours se reproduit à plusieurs reprises, donnant en tout cinq ou six générations. En été, ces femelles se transforment en phylloxéras ailés, qui se répandent sur d'autres vignobles au grè du vent, et pondent, en s'accouplant avec des mâles, de nouveaux œufs d'hiver.

Les années passent mais aucune solution n'est trouvée pour contrer le puceron, malgré les nombreux essais de diverses substances censées tuer l'insecte. Le ministre de l'Agriculture va même jusqu'à offrir un prix de 20 000 francs à celui qui trouvera un remède efficace contre le phylloxéra. On finit par se rendre compte que des plants de vignes américains, importés avant la crise, résistent à la maladie. Mais il faut encore attendre 30 ans pour trouver la solution : greffer des plants européens sur des porte-greffes de plants américains, qui eux, résistent au puceron. Un travail considérable de reconstruction du vignoble commence alors à partir de ces pieds greffés. Néanmoins les conséquences économiques de cette crise seront terribles. Le vignoble de cognac en est un exemple frappant : en 1865, il s'étendait sur 285 000 hectares, il n'en reste plus que 70 000 en 1928, entraînant la ruine de nombreux viticulteurs (Lachiver, 2002).

Un pas important en matière de protection des cultures est franchi à la fin du XIXe siècle avec l'essor de la chimie minérale : toujours à base de cuivre, les premiers pesticides sont développés et commercialisés en se basant sur les progrès scientifiques de l'époque et non plus sur une approche purement empirique (Bonnefoy, 2012). L'usage de fongicides à base de sulfates de cuivre (bouillie bordelaise) se répand pour lutter contre certaines maladies cryptogamiques de la vigne et contre le mildiou de la pomme de terre. Au début du XXe siècle, sont développées des variétés résistantes aux agents pathogènes du mildiou, ainsi qu'aux rouilles du lin et des céréales. La lutte chimique complète la lutte génétique avec le développement fulgurant des pesticides de synthèse à partir des années 1930, qui est étroitement lié aux progrès en matière de chimie organique. Le DDT (dichlorodiphényltrichloroéthane), premier pesticide organochloré, est commercialisé dès 1939 et va progressivement s'imposer dans le marché des insecticides jusqu'aux années 1970. La recherche sur les armes chimiques, et notamment les gaz de combat, menée durant les guerres mondiales, va aussi favoriser la découverte de nouveaux composés organiques. Les premiers herbicides organiques, les colorants nitrés, sont utilisés sur les céréales dès les années 1930 (figure 1.1). D'autres pesticides, également efficaces et peu coûteux, vont être mis au point après 1945, comme les premiers insecticides de synthèse (organophosphorés et organochlorés). Depuis, de nombreux autres types de pesticides ont été conçus (encadré 1.2). Les pesticides représentent un des piliers de l'agriculture conventionnelle et ont contribué à atteindre l'objectif de sécurité alimentaire de nombreux pays européens (Bonnefoy, 2012).

Encadré 1.2. Les différents types de pesticides

Dans cet ouvrage, nous utilisons le terme « pesticide » pour désigner les pesticides de synthèse et les pesticides naturels ayant un impact significatif sur l'environnement et la santé humaine. Les pesticides regroupent différentes familles de produits destinés à lutter contre les organismes indésirables. Dans cet ouvrage, nous nous intéressons seulement aux pesticides utilisés pour lutter contre les bioagresseurs des plantes, les produits phytopharmaceutiques, et nous excluons donc les biocides (comme les désinfectants) et les antiparasitaires à usage humain et vétérinaire (par exemple contre les poux et les puces). Trois grands types de pesticides existent selon leur cible :

– les fongicides, qui visent les champignons parasites ;
– les insecticides, qui visent les insectes nuisibles ;
– les herbicides, qui visent les adventices, c'est-à-dire les plantes considérées comme indésirables dans les cultures.

Il existe également des pesticides contre d'autres cibles : les bactéricides et les acaricides (souvent inclus, respectivement, dans les fongicides et les insecticides dans les statistiques officielles), les molluscicides, les rodenticides ou les nématicides, ainsi que diverses substances à effet répulsif pour gérer les déprédations par les oiseaux ou les grands mammifères. Par ailleurs, certains produits, qui sont souvent inclus dans les produits de protection des plantes, n'ont pas une action de lutte contre des organismes nuisibles, mais agissent sur la croissance des plantes. Par exemple, les régulateurs de croissance limitent la croissance en longueur du blé et permettent ainsi d'éviter la verse de la tige qui peut se produire lors de phénomènes climatiques particuliers (pluie orageuses, vents violents). Les

…

…

pesticides peuvent aussi être classés en fonction de leur famille chimique, de leur dangerosité pour l'environnement ou la santé, ou de leur modalité d'utilisation. Par exemple, les insecticides et les fongicides peuvent traiter les parties aériennes des végétaux, mais également les semences ou les sols. Les herbicides peuvent, quant à eux, être utilisés pour désherber entre les cultures d'intérêt (comme entre les pieds de vignes) ou alors être utilisés pour détruire les couverts végétaux entre deux cultures, en complément ou à la place d'un labour.

Avec l'essor de la chimie, les pesticides se sont progressivement complexifiés afin d'améliorer leur efficacité (Bonnefoy, 2012). À partir d'une substance active, plusieurs formules peuvent être développées, démultipliant le nombre de pesticides commercialisés. Au total, environ 500 substances actives sont commercialisées en France dans une ou plusieurs des 1 700 formulations de pesticides recensées dans la Banque nationale des ventes de distributeurs (ministère de la Transition écologique, 2019).

Un pesticide est généralement formulé à partir de plusieurs molécules comprenant :
– la substance active produisant l'effet toxique sur le bioagresseur ;
– un diluant incorporé au produit afin d'abaisser la concentration en substance active (par exemple, un solvant pour pesticide liquide) ;
– des adjuvants qui modifient les qualités du pesticide pour en faciliter l'utilisation ou en accroitre l'efficacité (par exemple, permettre une meilleure pénétration dans la plante dans le cas d'un herbicide).

Ainsi, en plus de la substance active, un pesticide commercialisé comporte une série de produits chimiques variés qui peuvent jouer un rôle non négligeable dans la toxicité du produit final.

Intensification de la production agricole grâce aux pesticides durant le XX^{e} siècle

À partir de 1945, la France, comme les autres pays européens, cherche à augmenter la production agricole pour nourrir sa population et atteindre une sécurité alimentaire en produits agricoles de base. Dans cette optique, la stratégie mise en place est l'intensification de l'agriculture, qui repose sur trois piliers : la sélection génétique, les intrants chimiques et la mécanisation. Les deux premiers, la sélection génétique et l'emploi d'intrants chimiques, vont permettre d'accroitre considérablement les rendements des cultures, tandis que la mécanisation va faciliter l'utilisation de ces intrants, et le travail des agriculteurs de manière générale. Même si des progrès substantiels sont réalisés en matière de résistance aux maladies, les variétés ont été, pendant longtemps, avant tout sélectionnées pour leur productivité. Des variétés à fort potentiel de rendement ont pu être développées grâce à l'utilisation des fongicides et insecticides qui a permis de maitriser les facteurs limitants biotiques, que sont les insectes et maladies. De plus, les variétés plus productives sont capables d'assimiler de grandes quantités d'azote, épandus grâce à la mécanisation. Or cet azote favorise également la croissance des adventices, et les herbicides sont alors massivement utilisés pour les éliminer.

À partir des années 1960, l'écart croissant entre la productivité du travail en productions végétales et animales conduit à la disparition de l'élevage des zones de grandes cultures. Les cultures fourragères ne font alors plus partie de l'assolement, ce qui

raccourcit les rotations et entraîne une augmentation des densités de populations d'adventices et de certains bioagresseurs (maladies telluriques notamment), liée au retour plus fréquent des mêmes cultures dans les parcelles (Meynard *et al.*, 2013). Les paysages agricoles subissent également un profond changement avec le remembrement des terres pour agrandir les parcelles et les adapter aux nouvelles machines agricoles (Jepsen *et al.*, 2015). La spécialisation et l'intensification des systèmes s'accompagnent de progrès en matière de génétique et de gestion de la fertilisation : en culture de blé, le développement de variétés résistantes à la verse, ainsi que le raisonnement de la fertilisation selon la méthode du bilan d'azote, permettent d'obtenir des rendements toujours plus élevés (Hébert, 1969) (figure 1.1). Outre les engrais chimiques, l'intensification de l'agriculture va aussi de pair avec une augmentation de l'utilisation des pesticides de synthèse. Ces intrants sont nécessaires pour protéger les cultures dont la sensibilité aux bioagresseurs (maladies, attaques d'insectes, concurrence de certaines adventices) s'est accrue : le développement de nouveaux pesticides permet alors de s'affranchir en partie des risques liés aux bioagresseurs (Lamine *et al.*, 2011). Cette évolution vers une plus grande dépendance aux pesticides n'est pas limitée aux grandes cultures mais touche l'ensemble des productions végétales. Par exemple, l'utilisation de fongicides de synthèse se développe en viticulture et en arboriculture en remplacement du cuivre et du soufre : ils sont plus biocides et rémanents, ce qui les rend plus simples d'usage. En arboriculture, le développement des insecticides permet l'essor de vergers spécialisés, et la production de fruits se concentre alors sur un petit nombre de variétés plus productives. Enfin, la pratique généralisée du drainage et de l'irrigation tend à renforcer l'homogénéisation des conditions environnementales propices à l'extension des bioagresseurs.

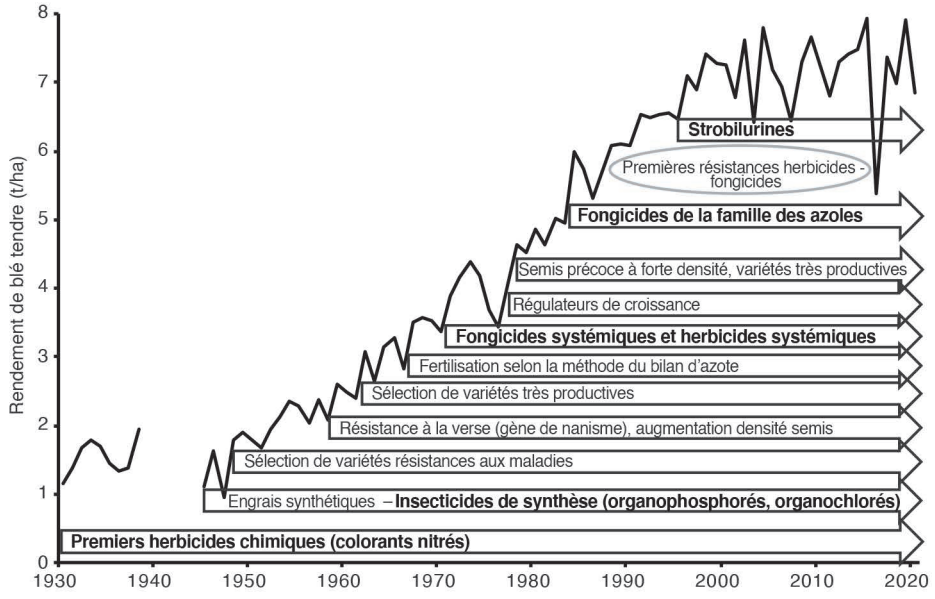

Figure 1.1. Évolution du rendement du blé tendre en France en lien avec diverses innovations techniques dont le développement des pesticides (en gras), inspiré de Oerke (2006), à partir de données du ministère de l'Agriculture et d'Eurostat

Dans les années 1980, l'intensification de la production agricole s'accélère grâce au développement de fongicides et d'herbicides systémiques, c'est-à-dire dont l'efficacité provient du fait qu'ils migrent depuis les feuilles ou les racines à travers les tiges et atteignent tous les organes de la plante (figure 1.1). Les pesticides, qui faisaient jusqu'alors office de solutions curatives, deviennent une composante centrale des itinéraires techniques, avec des applications systématiques en vue de réduire les risques, limiter les pertes de production et donc maximiser le rendement et/ou sécuriser la qualité des produits. En effet, en absence de protection des cultures, les pertes peuvent être très significatives et, pour une production donnée, très variables entre régions et entre années (encadré 1.3). Ces itinéraires techniques reposant sur un usage important des pesticides sont aussi caractérisés par une densité de semis accrue, et par l'avancée des dates de semis afin que les plantes captent le maximum d'énergie lumineuse, pour atteindre un rendement maximum plus élevé. Or ces nouvelles pratiques favorisent aussi le développement des bioagresseurs et rendent le recours aux pesticides encore plus indispensable. En parallèle, l'utilisation répétée de pesticides induit le développement de résistances chez les bioagresseurs qui s'adaptent au fil des générations. Pour contrer ce phénomène, les agriculteurs s'engagent dans une forme de course à l'armement en utilisant de nouveaux pesticides comme les fongicides de la famille des azoles et des strobilurines, que le secteur agrochimique met massivement sur le marché.

Cette intensification de la production agricole grâce aux pesticides se retrouve dans les statistiques nationales. Par exemple, les rendements du blé sont passés d'environ 1,5 tonne par hectare au début du XX^{e} siècle à plus de 7 tonnes par hectare en moyenne à l'aube des années 2000 (figure 1.1), et le volume français de la production végétale a été multiplié par 2,5 en 60 ans. En contrepartie, l'utilisation d'intrants a explosé. La Commission des comptes de l'agriculture française (CCAN) montre que le volume des engrais utilisés a été multiplié par 1,7 et celui des pesticides par 8,5 en soixante ans (figure 1.2).

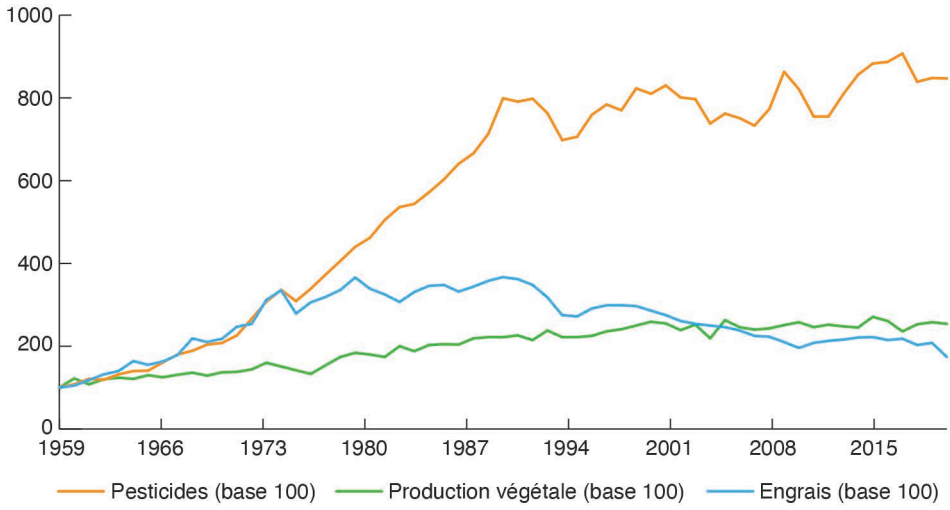

Figure 1.2. Évolution du volume de pesticides et d'engrais consommés ainsi que de la production végétale en France, de 1959 à 2019 (base 100 en 1959) (INSEE, 2020)

Encadré 1.3. Les pertes de production évitées par la protection des cultures

Les pesticides sont utilisés pour contribuer à la protection des plantes cultivées contre les bioagresseurs : sans protection, les rendements observés seraient beaucoup plus faibles et une proportion non négligeable de la production serait détruite avant la récolte. Le rendement potentiel d'une culture est déterminé par la variété utilisée et par les conditions de milieux que sont l'ensoleillement, la température et la teneur en CO_2. Ce potentiel peut être réduit par un manque d'eau que les agriculteurs peuvent compenser par l'irrigation, et par un manque d'éléments nutritifs compensé par une fertilisation adaptée. Ce rendement permis peut être réduit plus encore par des facteurs réducteurs que sont les bioagresseurs (van Ittersum *et al.*, 2013). La sensibilité à certains bioagresseurs dépend du niveau de résistance de la variété choisie ainsi que de la date et la densité de semis. La pression potentielle de bioagresseurs sera déterminée par l'histoire de la parcelle (par exemple à cause de la présence d'un inoculum fongique) et de son environnement. La protection des plantes influe sur les facteurs réducteurs du rendement que sont les bioagresseurs : l'ensemble des pratiques, aussi bien prophylactiques que curatives (dont les pesticides) permettent de rapprocher le rendement effectif du rendement potentiel de la parcelle.

Une étude a estimé les pourcentages de pertes monétaires en fonction du type de bioagresseur qui les cause, sur l'ensemble des cultures, et à l'échelle du monde (Oerke, 2006). Selon cette estimation, la protection des cultures permet d'éviter 32 % des pertes dues aux champignons (et bactéries), 39 % pour les insectes et autres ravageurs, et jusqu'à 74 % pour les adventices. En revanche, la protection contre les virus, principalement par la gestion des vecteurs, ne permet que 5 % de gain (Oerke, 2006). Les données équivalentes ne sont pas disponibles pour la France, mais il est vraisemblable que les rapports de grandeur entre les différents bioagresseurs soient les mêmes. En fonction des cultures et des types de pertes, les exemples sont nombreux. En France, entre 2010 et 2014, l'étude comparative menée sur le blé tendre par Urruty (2017) entre des parcelles protégées contre les maladies fongiques et des parcelles témoins montre des pertes variant en moyenne de 8 % en 2011 (année sèche à faible pression de maladies) à 30 % en 2012 (année très humide), avec de grandes différences entre régions (figure 1.3).

Cette illustration dans le cadre du blé tendre permet de retenir trois messages importants concernant l'impact des maladies fongiques et, par conséquent, les services rendus ici par la protection chimique :

– les pertes moyennes peuvent atteindre des niveaux très significatifs mais sont très variables d'une année à l'autre ;
– les pertes sont très variables d'une région à l'autre pour une année donnée ;
– il n'est pas possible de prévoir les pertes dans un lieu donné à partir du comportement des années précédentes.

Cette incapacité à prédire engendre une insécurité importante qui favorise l'utilisation des pesticides de manière préventive et qui explique le rôle important des outils d'aide à la décision (OAD) pour gérer au mieux les applications. Elle justifie aussi le poids qui est donné et doit être donné à l'utilisation de variétés plus tolérantes ou plus résistantes aux maladies. Si l'étude d'Urruty (2017) repose sur les variétés les plus courantes du marché, l'écart traité/non traité en culture de blé tendre est fortement réduit avec les variétés les plus résistantes. Ceci sera illustré dans le chapitre 5.

…

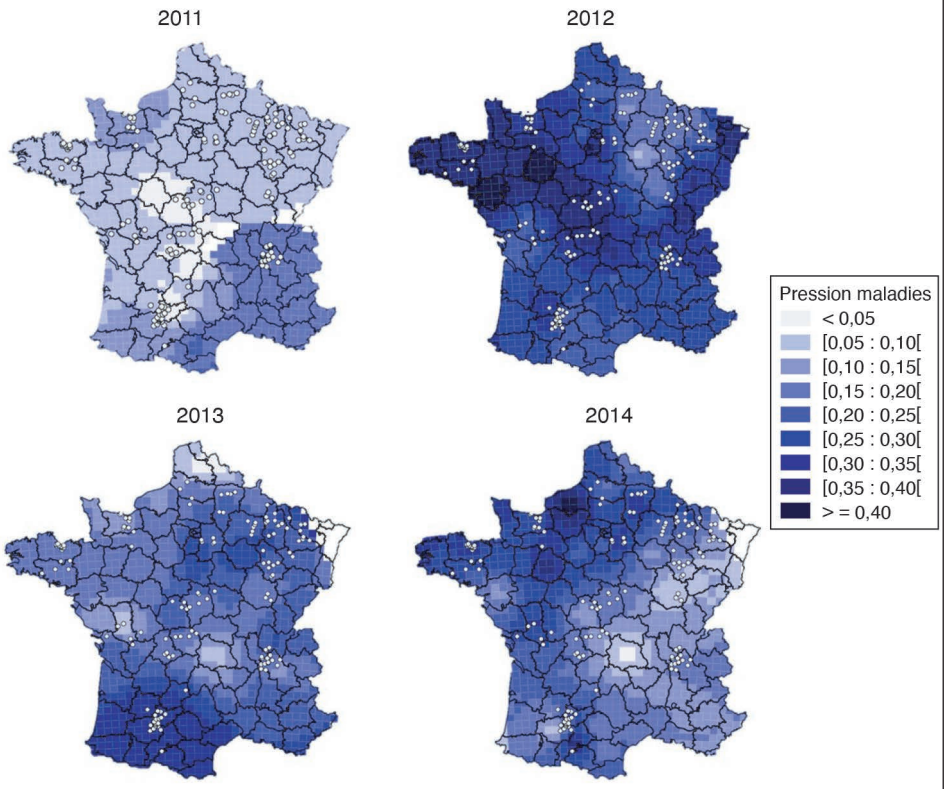

Figure 1.3. Cartes de la répartition des écarts de pertes entre parcelles protégées par des fongicides et des parcelles témoins pour les années 2011 à 2014 (Urruty, 2017)

Le développement de l'utilisation des pesticides a été largement soutenu par l'État au travers de différentes politiques publiques. Après la Seconde Guerre mondiale, les capitaux fournis par le plan Marshall et la politique agricole nationale française ont pour but de permettre l'augmentation de la production agricole pour subvenir aux besoins alimentaires des Français. La fixation à un niveau élevé des prix des produits agricoles payés aux producteurs permet d'inciter les agriculteurs à produire plus, en adoptant les nouvelles technologies disponibles, permettant des pratiques plus intensives. Cette politique agricole nationale s'avère très efficace et, dès 1957, la France devient excédentaire en céréales. La création de la PAC, en 1962, consolide cette politique de prix garantis et offre aux céréaliers français la possibilité d'exporter vers d'autres pays européens encore déficitaires, l'Allemagne en premier lieu. Dans les années 1960, le principal objectif de la PAC est toujours d'accroître la production agricole et d'assurer un approvisionnement et des prix raisonnables pour les consommateurs. Le soutien des prix et la garantie de débouchés permettent la poursuite de la modernisation et de l'intensification de la production. La politique des structures au niveau national puis européen accompagne ce processus par des mesures encadrant l'évolution des structures d'exploitations et permettant l'agrandissement des

exploitations vers une taille viable économiquement. En parallèle, la France soutient le développement de structures industrielles telles que les installations portuaires et les usines de transformation (sucrerie, malterie, amidonnerie), qui permettent de gérer des volumes importants d'intrants (engrais) et de produits agricoles.

Cette politique associée aux progrès techniques explicités précédemment porte ses fruits : la production augmente de 50 % (en volume) entre 1960 et 1980 (INSEE, 2020). L'utilisation de pesticides, pilier de l'intensification agricole, est ainsi favorisée par les politiques agricoles (Mahé et Rainelli, 1987). Ce phénomène se retrouve aussi bien dans les pays du Nord comme la France, que dans les pays du Sud (encadré 1.4).

Encadré 1.4. La révolution verte

La révolution verte fait référence au processus d'intensification de la production agricole des pays du Sud dans les années 1960-1980, grâce à l'amélioration génétique des cultures et à l'utilisation massive d'intrants, dont les pesticides. Elle a souvent eu lieu en parallèle de réformes agraires permettant une redistribution foncière et un accès à la terre plus égalitaire. En augmentant significativement la productivité agricole, elle a contribué à limiter les famines, et a permis de soutenir, depuis les années 1960, une croissance démographique sans précédent.

La révolution verte commence en Inde en 1966 avec le déploiement massif de variétés de blé et de riz à haut rendement, l'utilisation généralisée d'intrants chimiques (engrais, pesticides) et le développement de l'irrigation dans toutes les basses vallées de l'Inde. Ce développement est soutenu par une politique agricole incitative associant subvention des intrants (semences, engrais, pesticides), achat des récoltes par l'État à des prix garantis et aides aux investissements pour la mécanisation et l'irrigation. À la fin des années 1970, l'augmentation des rendements du riz permet à l'Inde de faire face à la croissance de sa population sans subir les famines récurrentes qu'elle a connues pendant la décennie précédente. Le modèle de la révolution verte est exporté avec succès en Chine et dans une grande partie de l'Asie du Sud-Est. Dans la majorité des cas, il se traduit par une augmentation importante des rendements grâce à l'utilisation d'intrants et de variétés sélectionnées, sauf en Thaïlande qui profite de sa disponibilité en terres pour augmenter ses surfaces cultivées grâce à la mécanisation. Au début des années 1980, ce pays se retrouve même le premier exportateur mondial de riz, et des pays comme l'Indonésie et les Philippines deviennent quasiment autosuffisants alors qu'ils étaient considérés comme structurellement déficitaires (Griffon, 2002).

En Amérique latine, la révolution verte a été appliquée à la culture du maïs et au développement de l'élevage grâce à l'amélioration génétique, les progrès vétérinaires et l'intensification du pâturage. Ce modèle a surtout bénéficié aux exploitations agricoles de taille moyenne, l'accès à la terre pour les petits producteurs étant toujours difficile. En Afrique, les retombées de la révolution verte ont été plus hétérogènes. Elle a été appliquée avec succès dans les plantations de café, cacao, palmier et hévéa de la zone tropicale humide. Mais les productions dans les zones de savane sèche ou dans les zones arides n'ont pas eu le succès escompté car l'utilisation de variétés à haut rendement et d'engrais n'était pas adaptée à la rigueur et à la forte variabilité du climat dans ces zones.

Dans les années 1990, la révolution verte commence à montrer ses limites en Inde, là où elle avait commencé : les rendements stagnent et la dégradation de

…

…

l'environnement est de plus en plus visible. En particulier, les nappes phréatiques commencent à s'assécher à cause de l'irrigation intensive et des niveaux élevés d'intrants chimiques sont découverts dans les eaux. En effet, les incitations économiques développées par les pouvoirs publics, comme la subvention des intrants, conduisent à leur utilisation excessive. Ces dérives sont parfois corrigées, comme en Indonésie dans les années 1990, où les subventions aux pesticides ont été supprimées, entraînant une baisse spectaculaire de l'utilisation d'insecticides. Toutefois, les impacts environnementaux liés à la révolution verte sont présents dans de nombreux pays du Sud, avec des problèmes d'exposition de la population aux pesticides ainsi qu'une perte de biodiversité importante. Par exemple, aux Philippines la riziculture intensive a conduit à la disparition, dans les rizières, de plantes sauvages et de poissons, qui servaient à l'alimentation des plus pauvres. Ainsi, outre ses impacts sur l'environnement, la révolution verte a accentué les disparités socio-économiques et l'exode rural dans de nombreux pays, profitant principalement aux agriculteurs disposant d'un accès au crédit et de grandes exploitations (Pingali, 2012).

Les pesticides aujourd'hui : quelles utilisations ?

Premier producteur agricole européen, la France est aussi le premier utilisateur de pesticides en Europe, avec environ 85 000 tonnes utilisées, ce qui la place en 6e position à l'échelle mondiale (chiffres 2018 dans FAOSTAT [2021], encadré 1.5). De nombreux secteurs d'activité utilisent actuellement des pesticides, comme les transports, pour entretenir les voies ferrées, ou le secteur de l'énergie où ils sont nécessaires au bon fonctionnement des réseaux électriques. Cependant, l'usage agricole représente à lui seul 90 % de la consommation des pesticides en France. Les pesticides sont utilisés dans toutes les productions agricoles conventionnelles, aussi bien dans les exploitations spécialisées en productions végétales que dans celles qui ont également une activité d'élevage.

Encadré 1.5 Ailleurs dans le monde

L'utilisation des pesticides s'est généralisée à l'échelle mondiale pour atteindre environ 4 millions de tonnes en 2018 (FAOSTAT, 2021), dont environ 900 000 tonnes pour le seul glyphosate (Székács et Darvas, 2018). Des variations régionales existent quant aux quantités et aux types de pesticides utilisés. La Chine utilise à elle seule plus de 40 % (en volume) des pesticides vendus dans le monde, les États-Unis et le Brésil arrivant en 2e et 3e position, mais avec seulement 10 % et 9 % (figure 1.4). Cependant, si ces volumes sont ramenés à l'hectare de surface agricole utile (SAU), les plus gros consommateurs de pesticides sont des pays des tropiques (Maurice, Équateur, Trinité-et-Tobago). En ce qui concerne le type de pesticides utilisés, les herbicides représentent 30 % des pesticides vendus dans le monde. En effet, ces pesticides sont très utilisés dans certaines régions du monde, comme les États-Unis, en lien avec le développement des cultures d'organismes génétiquement modifiés (OGM) tolérantes à certains herbicides. En Europe, les fongicides représentent la majorité des ventes, tandis que des pays situés près des tropiques utilisent essentiellement des insecticides.

…

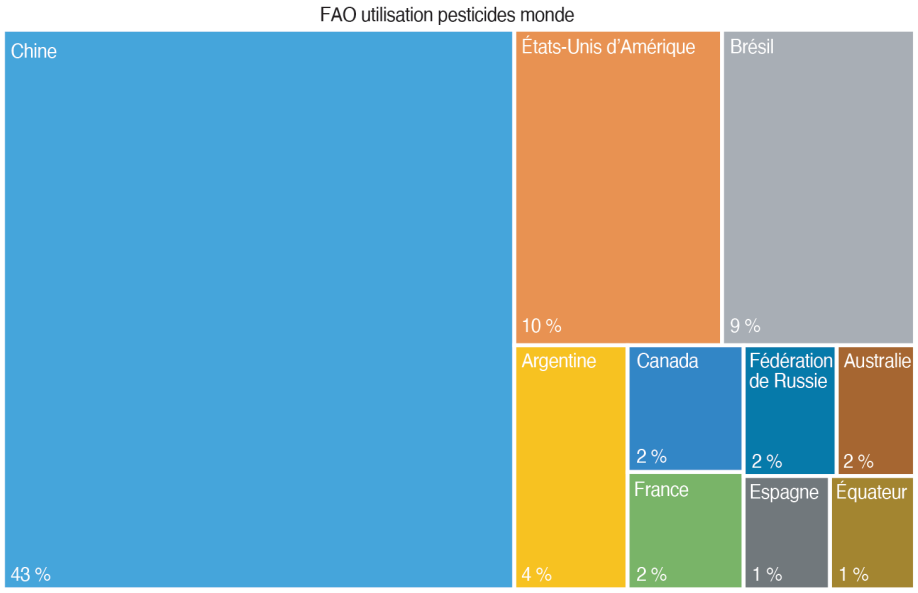

Figure 1.4. Répartition d'utilisation des pesticides en 2018 chez les 20 plus grands pays utilisateurs (FAOSTAT, 2021)

Deux types de productions concentrent à elles seules plus de 80 % des pesticides utilisés en France : les grandes cultures, du fait des surfaces qu'elles occupent, et la viticulture, du fait d'un usage par hectare très élevé (Butault *et al.*, 2010). L'arboriculture et l'horticulture (maraichage) constituent aussi des productions utilisant des quantités élevées de pesticides par hectare. Cette distribution se retrouve dans la répartition spatiale des achats de pesticides. Dans les régions d'élevage où les surfaces en prairies sont importantes, les achats de pesticides demeurent plus faibles. À l'inverse, ces achats sont particulièrement élevés dans les régions viticoles (Bordelais, Champagne), les régions où l'arboriculture et l'horticulture sont très développées (bassin méditerranéen) et certaines régions où les cultures industrielles, comme la pomme de terre, sont très présentes (nord de la France) (figure 1.5).

Au sein même des productions végétales, il y a une forte hétérogénéité dans l'utilisation des pesticides, observée dans les indicateurs de fréquence de traitements (IFT[1]) correspondants (figure 1.6).

En ce qui concerne le type de pesticides utilisés en France, les fongicides et herbicides dominent le marché avec 86 % des ventes de pesticides à eux deux (figure 1.7). En termes de quantités de substances vendues (encadré 1.6), un herbicide, le glyphosate, arrive de loin à la première place avec 12 % des ventes totales en 2018. Le glyphosate est majoritairement utilisé en grande culture, dans la période d'interculture, pour lutter contre les adventices et/ou les repousses des cultures précédentes (81 % des applications) ainsi que pour détruire des couverts végétaux ou des prairies avant l'implantation

1. IFT : nombre de doses homologuées appliquées sur une parcelle et sur une campagne.

de la culture suivante (19 % des applications) (Carpentier *et al.*, 2020). Il est également utilisé en viticulture et en arboriculture pour désherber entre les rangs et surtout sous les rangs. Le soufre, un fongicide naturel, est la deuxième substance la plus vendue avec 9 % des ventes. Il permet de lutter contre l'oïdium, en viticulture aussi bien conventionnelle que biologique, et s'utilise à présent aussi en cultures céréalières.

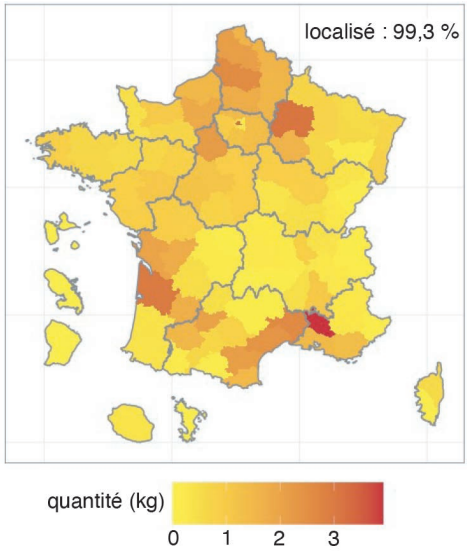

Figure 1.5. Quantité de pesticides (toutes substances actives) achetés en 2019, rapportée à l'hectare (ministère de la Transition écologique, 2021). Source : BNV-D, OFB, données au code postal acheteur, extraites le 27/11/20. Traitements SDES, 2021

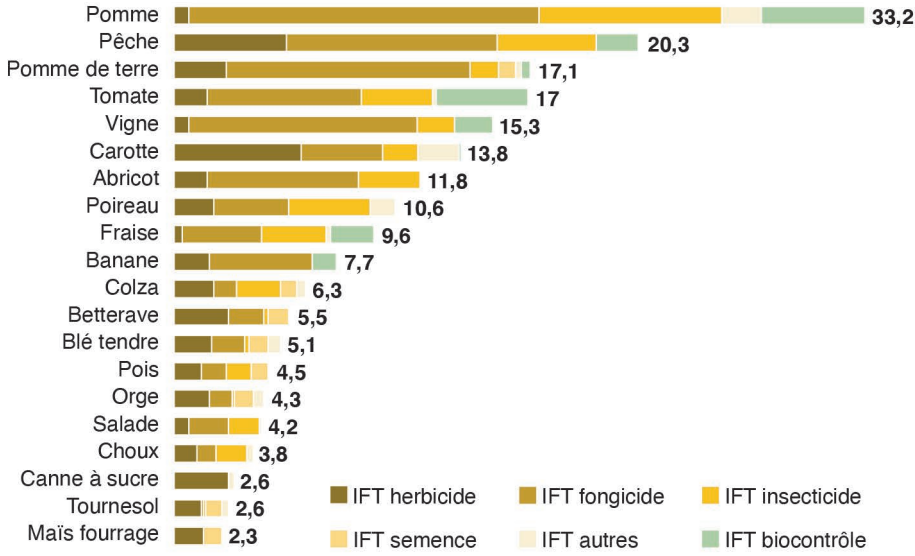

Figure 1.6. IFT sur les principales cultures (Agreste, 2018, 2019, 2020 ; Agreste Guadeloupe, 2018 ; Agreste Nouvelle-Aquitaine, 2019 ; Agreste Pays de la Loire, 2019)

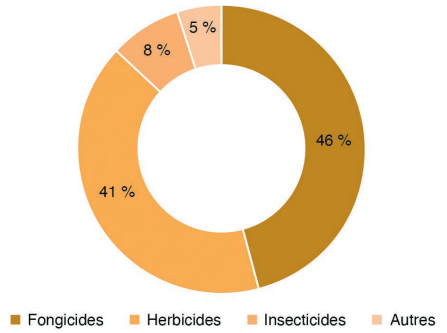

Figure 1.7. Répartition des ventes de substances actives (QSA) par type en 2019 en France (ministère de la Transition écologique, 2020a)

Encadré 1.6. Les indicateurs de suivi de l'utilisation de pesticides

Différents indicateurs, définis à l'échelle européenne ou française, sont disponibles pour quantifier l'utilisation des pesticides, et indirectement l'effet des instruments mis en œuvre pour réduire leur utilisation. Dans le cadre du plan Écophyto, trois indicateurs de suivi de l'utilisation des pesticides ont été mis en place.

L'IFT comptabilise le nombre de doses de pesticides, relatif à leur dose homologuée, utilisées par hectare au cours d'une année. Cet indicateur prend donc en compte l'intensité du traitement, celui-ci pouvant être partiel (comme une application à demi-dose, par exemple). L'IFT peut être calculé pour un ensemble de parcelles, une exploitation ou un territoire. Il peut également être décliné selon qu'il s'agit d'herbicides, fongicides, insecticides et autres pesticides. L'intérêt de l'IFT est de permettre d'agréger des substances très différentes et ainsi de mesurer l'utilisation de pesticides sur une culture de manière globale. Pour un agriculteur, l'IFT permet d'évaluer ses progrès en termes de réduction d'usage de pesticides par diminution du nombre de passages ou des doses appliquées, et de comparer ses pratiques à celles du territoire. En revanche, l'IFT ne prend pas en compte le degré de toxicité de chaque produit. C'est donc un indicateur limité pour évaluer les risques potentiels de l'utilisation des pesticides pour l'environnement et la santé.

Le calcul de l'IFT (sans unité) pour une parcelle sur une année donnée est le suivant :

$$IFT = \sum_{p,t} \frac{Dose\ appliquée_{p,t}}{Dose\ de\ référence_{p,t}} \times \frac{Surface\ traitée_{p,t}}{Surface\ parcelle}$$

p : pesticide

t : traitement réalisé pendant l'année

La quantité de substances actives (QSA) est calculée à partir des données de ventes de pesticides par les distributeurs. Il permet d'approcher finement à l'échelle des territoires (jusqu'à la commune) les quantités de pesticides vendues. Cependant, ces ventes ne correspondent pas toujours à l'utilisation réelle de pesticides sur l'année : il peut y avoir un décalage entre les ventes de pesticides et leur consommation du fait des stocks effectués par les agriculteurs ou d'un décalage spatial, car l'achat peut servir à traiter une parcelle éloignée, localisée dans

…

…

une commune différente de celle où est référencé l'achat. De plus, le calcul de la QSA ne reflète pas forcément l'évolution des pratiques en matière d'utilisation des pesticides car le développement de produits de plus en plus concentrés fait mécaniquement baisser les quantités vendues. Enfin, la QSA ne reflète pas le degré de toxicité des substances actives et donc les risques encourus. Le calcul de la QSA (en kg de substances actives) est le suivant :

$$QSA = \sum_{p,Sa} Quantité\ vendue_{p} \times Concentration\ en\ substance\ active_{p,Sa}$$

p : pesticide

Sa : substance active

Le nombre de doses utiles (NODU) est également calculé à partir des données sur les ventes de pesticides. Dans ce cas et pour chaque substance, la quantité appliquée est pondérée par une dose unité qui lui est propre et qui correspond à la dose homologuée pour un traitement particulier. C'est donc un indice proche de l'IFT qui peut aussi être décliné selon la nature des pesticides (herbicides, fongicides, insecticides). En revanche, il reste calculé globalement, à partir des ventes, ne tient pas compte du stockage et déstockage par les agriculteurs et reflète donc imparfaitement les utilisations. Son principal avantage est de s'affranchir des substitutions de substances actives par de nouvelles substances efficaces à plus faible dose. Sa complexité provient du fait que, pour un même produit épandu à volume constant, les variations des doses maximales homologuées jouent sur la valeur du NODU, rendant difficile la comparaison entre années sans une frise des changements règlementaires survenus sur la période considérée.

En se basant sur la QSA de chaque substance active, le calcul du NODU (sans unité) est le suivant :

$$NODU = \sum_{Sa} \frac{QSA_{Sa}}{Dose\ Unité\ de\ substance\ active_{Sa}}$$

Sa : substance active

Malgré les initiatives prises pour diminuer l'usage des pesticides, la consommation est stable ces dernières années (figure 1.8). Les années 2018 et 2019 sont marquées par des fluctuations importantes pour la QSA et le NODU (ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2021). En particulier, la QSA connaît une forte augmentation en 2018 (+ 20 %), puis une baisse encore plus importante en 2019 (– 44 %). En réalisant une analyse complémentaire à partir du Réseau d'information comptable agricole (RICA), il est possible d'en déduire la cause majeure. Le RICA est une opération européenne qui collecte, chaque année, des données comptables sur un échantillon d'exploitations des pays européens, dont environ 7 000 exploitations françaises (Agreste, 2021). Le RICA contient ainsi des informations sur les pesticides, incluant ici les produits de biocontrôle : il enregistre les stocks en début et fin d'exercice ainsi que les achats de chaque exploitation agricole, ce qui permet de connaître la charge nette (imputée des variations de stock) liée aux dépenses en pesticides. Les données du RICA montrent une augmentation des achats de pesticides en 2018 (+ 13 %) mais également une augmentation des stocks créés. À l'inverse, en 2019, les achats ont largement diminué (– 26 %), mais les stocks également : les agriculteurs ont acheté moins de pesticides car ils ont déstocké leurs

réserves réalisées l'année précédente. On peut ainsi en déduire que les charges de pesticides nettes de stocks, assimilables à l'utilisation réelle de pesticides (incluant les produits de biocontrôle), n'ont que très légèrement diminué, d'environ 2 % entre 2018 et 2019.

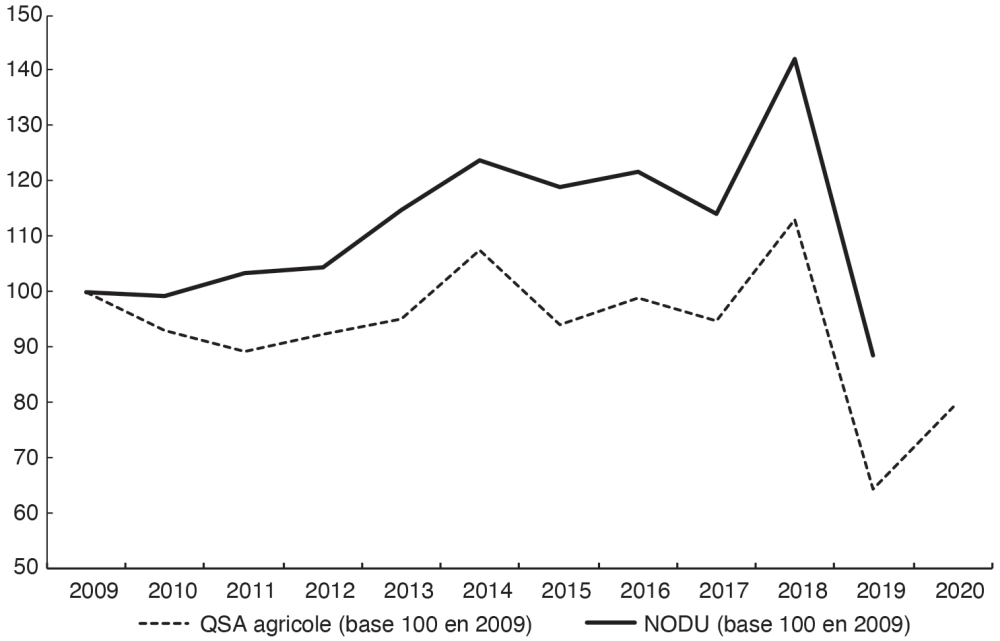

Figure 1.8. Évolution des QSA agricoles et du NODU utilisés pour suivre la consommation des pesticides en France dans le cadre d'Écophyto (ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2021). Pour l'année 2020, seules les données pour la QSA étaient disponibles lors de la rédaction de l'ouvrage.

D'autres indicateurs permettent de prendre en compte les risques liés à l'utilisation des pesticides. Les substances actives peuvent ainsi être identifiées comme « cancérogènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction » (CMR), avérées ou supposées (CMR1) ou suspectées (CMR2). Sur la période 2009-2018, les quantités de substances actives ont diminué de 15 % pour les CMR1 et de 9 % pour les CMR2 (ministère de la Transition écologique, 2020b). La part des substances actives classées CMR1 ou CMR2 est également en baisse par rapport à l'ensemble des substances vendues depuis 2009 (figure 1.9). À l'échelle européenne, l'indicateur de risques harmonisés (HRI1) de la Commission européenne permet d'estimer le risque lié aux pesticides en se basant sur les quantités de substances actives vendues, pondérées des coefficients qui représentent le risque associé à ces substances (voir section p. 40-43). L'HRI1 a diminué de 14 % en France entre 2011 et 2017 et d'environ 25 % à l'échelle de l'Union européenne (UE) (Eurostat, 2021). Ainsi, alors que les indicateurs d'utilisation ont tendance à augmenter (+ 7 % pour la QSA entre 2011 et 2017 et + 10 % pour le NODU), l'usage des substances les plus à risque diminue.

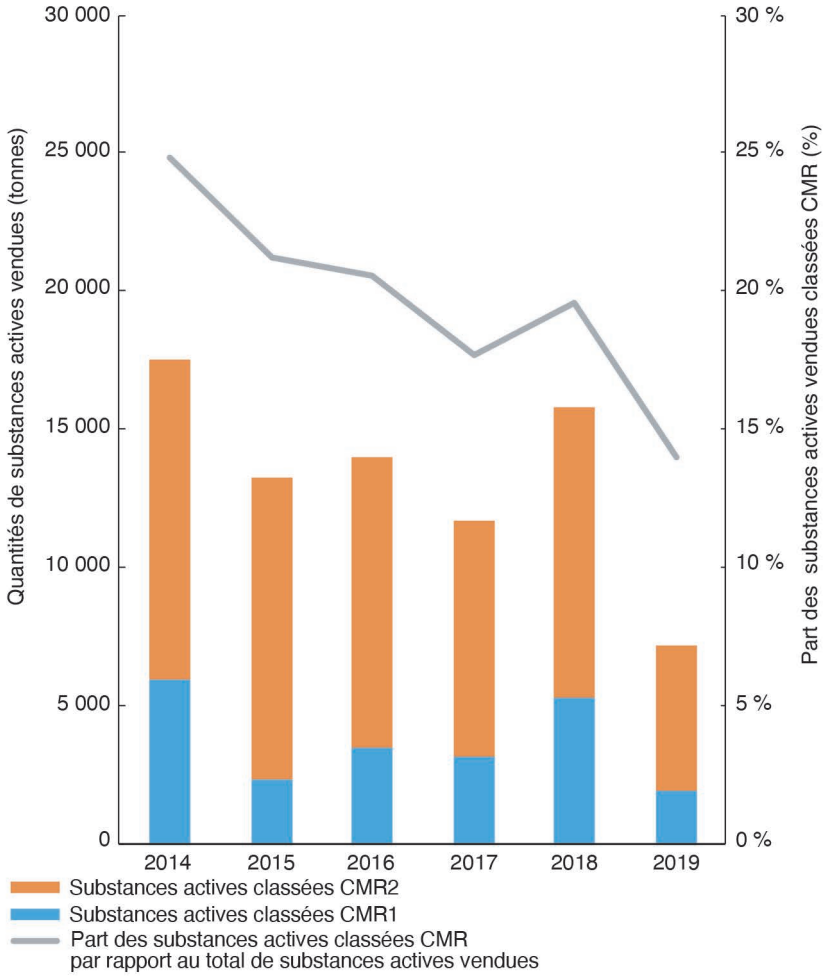

Figure 1.9. Quantités de substances actives vendues en France, selon leur catégorie CMR (ministère de la Transition écologique, 2020b)

À retenir

Les agriculteurs ont depuis toujours cherché des moyens de protéger les plantes cultivées des bioagresseurs. Cependant, le vrai boom de la protection des cultures n'a eu lieu qu'au XX^{e} siècle avec le développement des pesticides de synthèse. Trois phénomènes sont à la base de ce recours massif aux pesticides. Premièrement, l'essor de la chimie organique a permis de produire des molécules efficaces contre les bioagresseurs. Différentes générations de fongicides, herbicides et insecticides se sont succédées, devenant progressivement une composante centrale des itinéraires techniques. Deuxièmement, l'intensification de la production agricole, basée sur le recours à la fertilisation minérale, des variétés améliorées plus productives et une simplification des systèmes agricoles, a créé un besoin sans précédent de protection

des cultures. Troisièmement, le dispositif de soutien des prix de la PAC a offert aux agriculteurs un contexte économique favorable à l'utilisation d'intrants chimiques. En garantissant des prix des produits agricoles élevés, l'État a incité les agriculteurs à intensifier leur production pour obtenir des rendements élevés. La France est actuellement l'un des plus gros consommateurs de pesticides dans le monde, avec 85 000 tonnes de pesticides utilisés en 2018 sur le territoire national. Ces intrants sont principalement utilisés en grande culture, viticulture et arboriculture, ce qui se retrouve dans la répartition spatiale des ventes de pesticides dans l'Hexagone. Cependant cet usage massif n'est pas sans effet sur l'environnement et la santé, et une prise de conscience a eu lieu dès les années 1980.

⏩ L'usage des pesticides est devenu une préoccupation sociétale majeure

La prise de conscience des effets des pesticides sur l'environnement a débuté à partir des années 1960, notamment avec la publication du livre *Silent Spring*, qui révélait les impacts des pesticides sur l'environnement, en particulier sur les oiseaux (Carson, 1962). À la fin des années 1980, l'importante contamination des eaux naturelles en France, notamment par des herbicides comme l'atrazine, a renforcé les inquiétudes vis-à-vis des effets nocifs des pesticides, aussi bien sur l'environnement que sur la santé humaine (ministère des Solidarités et de la Santé, 2019). La multiplication des scandales sanitaires et environnementaux, associée à des publications scientifiques de plus en plus nombreuses, montre que l'utilisation de pesticides est devenue une préoccupation sociétale majeure.

Les impacts des pesticides sur l'environnement

Les impacts négatifs des pesticides sur l'environnement concernent essentiellement la perte de biodiversité terrestre et aquatique. En plus de remplir leur fonction d'origine qui est de détruire certains bioagresseurs, les pesticides peuvent également atteindre des organismes non ciblés. Ce phénomène est renforcé par le fait que certains pesticides s'accumulent dans les milieux naturels, l'eau, l'air et les sols.

Les premiers organismes touchés par les pesticides sont les insectes. De nombreux travaux scientifiques montrent des baisses très importantes et pérennes des populations d'insectes dans les écosystèmes (Jactel *et al.*, 2020), et ceci dès la fin du XIX^{e} siècle (Ollerton *et al.*, 2014). Actuellement, c'est plus de 40 % des espèces d'insectes qui sont menacées d'extinction, et une méta-analyse récente montre qu'entre 1 % et 2 % des insectes disparaissent chaque année à l'échelle mondiale (Sánchez-Bayo et Wyckhuys, 2019 ; Wagner *et al.*, 2021). Dans certaines zones protégées d'Allemagne, plus de 75 % des insectes ont disparu en 10 ans (Seibold *et al.*, 2019). Même s'il n'existe pas d'étude équivalente pour la France, il est probable que l'évolution soit similaire à celle observée en Allemagne. Le cas des insectes pollinisateurs des écosystèmes sauvages et cultivés (les abeilles, les bourdons, les papillons ou les syrphes) est particulièrement préoccupant, sachant que plus de 75 % des cultures alimentaires mondiales, reposent sur la pollinisation animale (Díaz *et al.*, 2019). Les

insectes représentant environ les deux tiers de toutes les espèces terrestres, leur disparition progressive a un impact profond sur la biodiversité et certains l'assimilent au sixième événement d'extinction majeur qu'a connu la Terre (Thomas *et al.*, 2004).

Plusieurs facteurs sont responsables du déclin des insectes : la perte des habitats naturels, le changement climatique mais aussi l'utilisation de pesticides (IPBES, 2016). Les principaux pesticides mis en cause sont les néonicotinoïdes et le fipronil (Sánchez-Bayo et Wyckhuys, 2019). Ces insecticides ont un effet particulièrement dévastateur sur les insectes terrestres, mais également aquatiques, en raison de leur forte toxicité aiguë et chronique (encadré 1.7). Certains fongicides (les azoles) ont en plus tendance à renforcer la toxicité des insecticides et seraient donc certainement impliqués dans l'effondrement des colonies d'abeilles domestiques (Simon-Delso et al., 2014). Enfin, même s'ils ne sont pas directement toxiques pour les insectes, les herbicides impactent indirectement les densités de populations des insectes et autres arthropodes car ils réduisent l'abondance et la diversité des plantes sauvages dont dépendent ces animaux.

Encadré 1.7. Abeilles et néonicotinoïdes

Les colonies d'abeilles mellifères ont connu des diminutions importantes dans différentes régions européennes. Même si les parasites et les maladies semblent être le principal facteur de ce déclin, les pesticides ont une part de responsabilité non négligeable, en particulier les néonicotinoïdes. Déployés à grande échelle au milieu des années 1990, les néonicotinoïdes sont aujourd'hui la catégorie d'insecticides la plus vendue sur la planète. À la différence des autres insecticides qui sont épandus sur les cultures pour lutter contre la présence d'insectes ravageurs, les néonicotinoïdes sont le plus souvent utilisés en enrobage de semences, de manière préventive. Ces nouveaux insecticides sont ainsi dits « systémiques », car la substance active se diffuse dans toutes les parties de la plante : les feuilles et les tiges mais aussi le pollen ou le nectar dans le cas des plantes mellifères. Ces insecticides sont donc particulièrement efficaces en protégeant l'ensemble de la plante. Ils sont principalement utilisés comme insecticides sur les grandes cultures (maïs, betterave), agissant sur un spectre très large d'insectes ravageurs.

Les néonicotinoïdes agissent sur le système nerveux central des insectes, en particulier les pollinisateurs, en ciblant les récepteurs nicotiniques de l'acétylcholine, provoquant, à dose élevée, la paralysie et la mort. À des doses sublétales, ces insecticides altèrent toutefois le système immunitaire des abeilles, réduisent la capacité de recherche de nourriture, affectent leur mémoire et diminuent leurs performances reproductives. Les néonicotinoïdes ont également tendance à s'accumuler dans le sol car leur dégradation y est très lente et ils finissent par se diffuser dans l'environnement en contaminant des cultures non traitées et les fleurs sauvages.

L'impact des néonicotinoïdes sur l'environnement a conduit en 2013 à un moratoire de l'UE pour restreindre l'emploi de trois néonicotinoïdes (la clothianidine, l'imidaclopride et le thiaméthoxame) dans les cultures attractives pour les abeilles. En France, la loi pour la reconquête de la biodiversité a complété ce moratoire par une interdiction totale sur toutes les cultures extérieures depuis 2018. Une analyse récente sur l'usage des néonicotinoïdes avant leur interdiction montre que dans la grande majorité des cas une méthode alternative non chimique aurait pu les remplacer (Anses, 2018). Des dérogations à leur interdiction sont tout de même demandées, et accordées, comme en 2020 sur les cultures de betterave (Jactel *et al.*, 2019 ; Sánchez-Bayo et Wyckhuys, 2019 ; Wintermantel *et al.*, 2020).

La raréfaction des insectes affecte aussi de nombreux autres organismes vivants qui s'en nourrissent, en particulier les oiseaux. En France, les densités de populations d'oiseaux des milieux agricoles ont chuté de 33 % en une décennie (Commissariat général au développement durable, 2018). Si différents facteurs tels que la disparition de certaines infrastructures paysagères (haies, etc.) en sont responsables, l'utilisation des insecticides semble en être la principale cause (Hallmann *et al.*, 2014). Les densités de populations de poissons sont elles aussi affectées du fait de la diminution des insectes aquatiques (Jactel *et al.*, 2020 ; Yamamuro *et al.*, 2019). L'évolution des densités de populations de chauve-souris qui doivent manger quotidiennement un tiers de leur poids en insectes, est un indicateur de suivi particulièrement révélateur : elles ont diminué de 38 % en une décennie en France (Commissariat général au développement durable, 2018).

Les impacts des pesticides sur l'environnement ne concernent pas seulement les organismes vivants mais aussi les milieux dans lesquels ils évoluent. L'air, l'eau et le sol sont durablement contaminés par les pesticides en raison de transferts entre les champs traités et ces compartiments. Ces transferts ont majoritairement lieu par dérive de pulvérisation, volatilisation, infiltration et ruissellement des zones traitées (Pelosi *et al.*, 2021). Une étude conduite dans une région céréalière française montre que l'ensemble des sols étudiés, qu'ils soient issus de parcelles conduites en agriculture conventionnelle ou en AB, contiennent des pesticides. Bien que ne dépassant pas les seuils réglementaires, cette contamination est à l'origine d'une diminution de l'abondance des microorganismes dans les sols, mais aussi des macroorganismes, comme les vers de terre (Pelosi *et al.*, 2021). Ceci altère la qualité et les fonctions biologiques des sols à travers, en particulier, une plus faible décomposition des matières organiques. Dans les milieux aquatiques, la contamination par les pesticides atteint aussi bien les eaux de surfaces que les eaux souterraines.

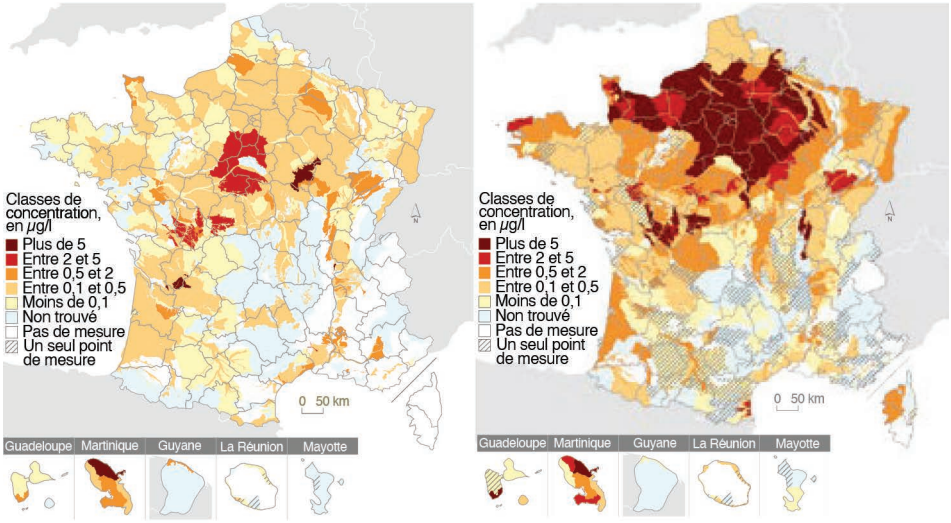

Figure 1.10. Concentration moyenne en pesticides dans les eaux souterraines en 2010 (carte de gauche) et en 2018 (carte de droite) (ministère de la Transition écologique, 2020c)

De nombreux pesticides sont présents dans les cours d'eau, même si leur présence a baissé d'environ 20 % en France entre 2008 et 2017. Cette contamination affecte la production d'eau potable ainsi que les organismes vivants dans ces milieux. De plus, on retrouve également des pesticides dans près de 80 % des eaux souterraines en France et la tendance est plutôt à la hausse (figure 1.10). Parmi les 300 substances détectées en 2018, environ un tiers étaient déjà interdites à cette époque (ministère de la Transition écologique, 2020c). Ainsi, l'accumulation de substances ou de leurs métabolites, ne se dégradant que très lentement, est responsable d'une pollution à long terme. Un exemple emblématique de ce problème est la pollution à la chlordécone que connaissent les Antilles françaises (encadré 1.8).

Encadré 1.8. La contamination des sols par la chlordécone aux Antilles

La chlordécone est un insecticide, utilisé massivement en Guadeloupe et Martinique de 1971 à 1993, pour lutter contre le charançon du bananier (*Cosmopolites sordidus*). Chaque pied de bananier recevait en moyenne 30 g de chlordécone tous les ans. Peu mobile, peu soluble, très peu volatile, la chlordécone se fixe durablement sur la matière organique du sol et se dégrade extrêmement lentement dans les sols aérés. La chlordécone est à l'origine d'une pollution agricole chronique des sols. En 2018, le risque de pollution par cette substance concerne 40 % de la SAU en Martinique (soit 10 000 hectares) et plus de 25 % en Guadeloupe (soit 14 200 hectares) (DAAF Guadeloupe, 2018). Très difficilement dégradable dans l'environnement terrestre, sa persistance pourrait s'étendre jusqu'à cinq ou six siècles, suivant le type de sol. L'insecticide n'a pas seulement contaminé les sols : les plantes consommées par la population, en particulier les racines et tubercules, sont elles aussi contaminées. Il est ainsi désormais interdit de cultiver les légumes racines (igname, carotte, patate douce) dans les zones polluées, où le taux de chlordécone dépasse les 100 mg/kg de sol sec. Les fourrages consommés par les animaux sont également significativement contaminés sur les sols les plus pollués (INRAE, 2020).

La chlordécone est désormais classée comme polluant organique persistant et reconnue comme perturbateur endocrinien, cancérogène potentiel et reprotoxique. La population antillaise peut y être exposée via l'ingestion d'eau ou d'aliments contaminés : on estime que plus de 90 % de la population des deux îles est exposée à différents niveaux par la chlordécone, avec des risques avérés de prématurité et de cancer de la prostate (Santé publique France et Anses, 2018).

Les impacts des pesticides sur la santé

L'exposition aux pesticides touche en particulier les professionnels les utilisant, en premier lieu les agriculteurs, mais également toute la population. Dans la population générale, les expositions sont liées au contact avec des milieux contaminés comme le sol et l'air, en particulier à proximité des zones traitées aux pesticides, ainsi qu'à l'ingestion de résidus de pesticides présents dans les aliments et les boissons. En milieu professionnel, l'exposition aux pesticides peut se produire lors de la fabrication du produit, de la préparation en vue de l'appliquer (dilution du produit commercial), de son application, et lors du remplissage et du nettoyage du matériel servant à l'appliquer (Anses, 2016). Ces substances pénètrent dans

l'organisme selon trois voies : la voie cutanée, la voie respiratoire et la voie digestive (ou orale). Les deux premières voies concernent surtout l'usage professionnel tandis que la voie digestive concerne l'ensemble de la population, que ce soit via l'ingestion d'aliments et de boissons, ou l'ingestion de poussières, en particulier chez les enfants. Une dernière voie existe, la voie *in utero* où le fœtus est exposé par passage transplacentaire des substances auxquelles la mère est elle-même exposée (Institut national du cancer, 2014).

Du fait de leur grande diversité, les substances contenues dans les pesticides peuvent avoir des impacts très variables sur la santé humaine, caractérisés par des effets aigus ou des effets chroniques. Les effets aigus, ou immédiats, sont liés à une exposition courte à forte dose. Ils peuvent rester locaux (brûlures chimiques oculaires, lésions cutanées) ou atteindre un ou plusieurs organes et devenir systémiques, avec des conséquences pouvant être très lourdes (effets neurologiques, troubles hépatiques). Hormis les accidents domestiques, les effets aigus concernent surtout les professionnels agricoles à la suite d'une exposition aux substances pendant l'application de pesticides ou lors d'incident avant ou après l'application (préparation du mélange, remplissage de cuve, nettoyage du matériel de pulvérisation) (Inserm, 2013). Les pesticides organophosphorés et les carbamates sont à l'origine de la plupart des intoxications avec effets aigus.

D'autre part, certaines substances peuvent induire des effets chroniques en s'accumulant dans l'organisme à travers une exposition faible et répétée sur le long terme. Des études épidémiologiques sur des professionnels agricoles ont mis en évidence des liens entre l'exposition aux pesticides et le risque d'apparition de pathologies cancéreuses, neurologiques ou encore de troubles de la reproduction (Inserm, 2013).

Une expertise récente de l'Inserm, qui s'appuie sur une analyse critique de la littérature scientifique internationale, confirme la présomption forte d'un lien entre l'exposition aux pesticides et différentes pathologies : lymphomes non hodgkiniens, myélome multiple, cancer de la prostate, maladie de Parkinson, troubles cognitifs, et certaines maladies respiratoires (bronchopneumopathie chronique obstructive et bronchite chronique) (tableau 1.1). Il a été également possible de préciser des liens (présomption forte) entre certaines familles de pesticides et des pathologies, comme par exemple entre les insecticides organochlorés, et la maladie de Parkinson. Des liens avec une présomption moyenne ont également été identifiés, notamment avec la maladie d'Alzheimer.

De manière moins évidente, des liens entre pesticides et certains troubles de la reproduction ou d'inflammation chroniques telles que l'endométriose sont suspectés à cause du caractère de perturbateurs endocriniens de certains pesticides (encadré 1.9). Outre les pathologies chez l'adulte, une présomption forte de lien a été identifiée entre certains cancers de l'enfant et exposition aux pesticides, aussi bien de l'enfant que de la mère pendant la grossesse (Inserm, 2021).

Tableau 1.1. Présomption d'un lien entre l'exposition aux pesticides et la survenue d'une pathologie chez l'adulte, d'après la synthèse des données analysées dans Inserm (2021)

Pathologies	Populations concernées par un excès de risque	Présomption d'un lien
Cancer de la prostate	Agriculteur, applicateurs de pesticides, ouvriers en industrie de production	++
Lymphomes non-hodgkiniens	Agriculteurs, applicateurs de pesticides, ouvriers en industrie de production	++
Myélome multiple	Agriculteurs, applicateurs de pesticides Éleveurs	++ +
Maladie de Parkinson	Professionnels Population générale ou riverains des zones traitées	++ ±
Troubles cognitifs	Agriculteurs, avec ou sans antécédents d'intoxications aiguës	++
Cancer du rein	Professionnels	+
Leucémie	Agriculteurs, applicateurs de pesticides, ouvriers en industrie de production	+
Maladie d'Alzheimer	Agriculteurs	+
Pathologies thyroïdiennes	Professionnels	+
Sarcomes des tissus mous et des viscères	Travailleurs agricoles, travailleurs du bois, jardiniers, éleveurs	+
Troubles anxio-dépressifs	Agriculteurs ou applicateurs	+
Tumeurs cérébrales	Populations agricoles	+
Cancer de la vessie	Professionnels Population générale	+ ±
Cancer du sein	Professionnels	±
Endométriose	Population générale	±
Lymphome de Hodgkin	Professionnels	±
Sclérose latérale amyotrophique	Agriculteurs	±
Altérations de la santé respiratoire	Professionnels Population générale (proximité, usage domestique)	+ à ++ ± à + (selon pathologie)

Présomption forte : ++ ; présomption moyenne : + ; présomption faible : ±

Encadré 1.9. Les pesticides soupçonnés d'être des perturbateurs endocriniens

Les perturbateurs endocriniens sont des substances qui dérèglent le fonctionnement hormonal des organismes vivants et peuvent ainsi entraîner des effets néfastes sur la santé et les fonctionnalités de l'environnement (Anses, 2019a). En particulier, certaines de ces substances peuvent entraîner des effets délétères sur la reproduction, en diminuant la fertilité ou en perturbant le développement du fœtus. Les perturbateurs endocriniens sont présents dans de nombreux produits : les additifs alimentaires, plastifiants, cosmétiques, solvants, ignifugeants (etc.) et différents pesticides. Les organismes peuvent ainsi être exposés à de multiples substances par plusieurs voies (ingestion, inhalation, contact cutané). Or si les effets aigus à forte dose sont clairement établis pour certains perturbateurs endocriniens, l'identification d'effets chroniques liés à une perturbation hormonale à faible dose et à long terme, voire à travers plusieurs générations, reste encore un défi majeur.

Cette identification est d'autant plus complexe que les perturbateurs endocriniens ne répondent pas forcément aux principes généralement admis en toxicologie classique :

- absence d'effet seuil : les perturbateurs endocriniens sont suspectés d'agir même à faible dose, c'est-à-dire qu'il n'y aurait pas de niveau d'exposition où les mécanismes de défense de l'organisme permettraient d'éviter l'apparition d'effets sanitaires ;
- relations dose-réponse non monotones : les perturbateurs endocriniens peuvent être plus nocifs à faible dose qu'à dose plus forte, le principe « la dose fait le poison » n'est donc pas vérifié (Vandenberg *et al.*, 2012) ;
- fenêtres d'exposition : la sensibilité aux perturbateurs endocriniens peut varier selon les périodes de la vie, avec une sensibilité accrue lors du développement fœto-embryonnaire, de la petite enfance et de la puberté ;
- effet cocktail : les propriétés des perturbateurs endocriniens et leur toxicité peuvent être modifiés lorsqu'ils sont associés, avec un effet multiplié par 10, voire 10 000 (Gaudriault *et al.*, 2017).

Depuis 2018, les substances identifiées comme perturbateurs endocriniens sont interdites mais leur identification reste problématique. Les effets complexes détaillés ci-dessus remettent en question les fondements de l'évaluation des risques liés aux pesticides telle que pratiquée par les agences réglementaires. En particulier, l'évaluation individuelle des pesticides ne permet pas de prendre en compte l'effet cocktail, et les recommandations en termes de doses journalières admissibles ne sont pas adaptées à l'absence d'effet seuil.

L'ensemble de la population est potentiellement concerné par des effets chroniques liés à une exposition sur le long terme aux résidus de pesticides dans l'alimentation, l'eau et l'air. Selon une étude publiée en 2018 par l'organisation non gouvernementale (ONG) Générations Futures, près de trois-quarts des fruits et 41 % des légumes non issus de l'AB portent des traces de pesticides quantifiables. Bien que ces taux de contamination soient en deçà des limites maximales de résidus (LMR) dans l'immense majorité des cas (en moyenne à 97,5 % pour les fruits et 96,5 % pour les légumes), cette étude montre l'omniprésence des pesticides dans notre alimentation (Générations Futures, 2018).

Les coûts cachés des pesticides

Au-delà des coûts d'application des pesticides supportés par les agriculteurs, les pesticides induisent également des coûts pour l'ensemble de la société, acteurs publics comme privés, du fait de leurs impacts négatifs sur l'environnement et la santé. Ces coûts cachés peuvent excéder les bénéfices économiques liés à l'augmentation de la productivité agricole permise par les pesticides. La différence coût-bénéfice de l'utilisation des pesticides aux États-Unis a ainsi été évaluée pour les années 1990 à 13 milliards de dollars : les pesticides auraient rapporté environ 27 milliards de dollars, pour un coût de l'ordre de 40 milliards de dollars (Bourguet et Guillemaud, 2016). Bien que ces chiffres soient forcément approximatifs et datés (de nombreux pesticides utilisés à cette époque sont désormais interdits), ils permettent d'illustrer le fait que la rationalité économique de l'utilisation des pesticides est discutable lorsqu'on intègre les externalités négatives. Dans cette même étude, les coûts cachés sont définis en quatre catégories :

– les coûts réglementaires correspondent aux mesures obligatoires, privées ou publiques, pour protéger l'environnement ou la santé humaine des impacts potentiels des pesticides et/ou pour réparer les dommages déjà infligés. Par exemple, la surveillance et la décontamination de l'eau du robinet peuvent être considérées comme un coût réglementaire ;

– les coûts environnementaux correspondent aux impacts des pesticides sur la biodiversité. Ils incluent donc la perte de certains services écosystémiques comme un manque de pollinisation. Les impacts sur les cultures des bioagresseurs devenus résistants aux pesticides peuvent aussi être associés à ces coûts ;

– les coûts sanitaires sont les dépenses associées à une intoxication aiguë ou chronique par les pesticides. Ils incluent les frais de santé supportés par les acteurs privés, majoritairement des travailleurs agricoles du fait de leur exposition accrue aux pesticides, mais surtout les frais supportés par l'ensemble de la société à travers la sécurité sociale ;

– les dépenses défensives couvrent toutes les dépenses des agriculteurs et de la société pour éviter l'exposition aux pesticides, telles que le coût de la consommation d'eau en bouteille ou le surcoût lié à l'achat de produits en AB.

Au sein de ces quatre catégories, les coûts sanitaires, en particulier ceux liés à une exposition chronique, apparaissent comme le point clef : ils représentent la moitié de l'ensemble des coûts cachés. Cependant il est extrêmement difficile d'estimer de tels coûts pour différentes raisons : estimation de la valeur des vies humaines perdues, causes multifactorielles des maladies chroniques, etc. (Becker, 2017). Une étude anglaise a par exemple évalué les coûts liés à la contamination de l'eau par les pesticides (120 millions de livres sterling en 1996), mais les auteurs n'ont pas intégré dans l'analyse les coûts de l'exposition chronique aux pesticides (Pretty *et al.*, 2000). À ce jour, il n'existe pas d'étude analysant les coûts sanitaires des pesticides à l'échelle européenne ou française. Ce type d'étude pourrait pourtant éclairer les décideurs publics dans les actions à entreprendre pour éviter ces coûts et contribuer à la réduction d'usage des pesticides en favorisant une prise de conscience globale et chiffrée au sujet de leurs impacts.

À retenir

L'usage des pesticides n'est pas sans conséquence sur l'environnement et la santé. Les impacts négatifs des pesticides sur l'environnement concernent essentiellement la perte de biodiversité. Les premiers organismes touchés par les pesticides sont les insectes avec un taux de disparition d'1 % à 2 % par an à l'échelle mondiale. Comme les insectes représentent environ les deux tiers de toutes les espèces terrestres et jouent un rôle clé dans la plupart des chaînes trophiques, leur disparition progressive est très préoccupante. L'air, l'eau et le sol sont également contaminés durablement par les pesticides en raison des transferts entre les champs traités et ces compartiments. Ainsi, les pesticides sont omniprésents dans notre environnement et l'exposition à ces substances dans l'eau, l'air et l'alimentation représente un risque pour l'ensemble de la population. Des effets aigus et chroniques se manifestent, en particulier chez les professionnels agricoles au travers de pathologies cancéreuses, neurologiques ou encore de troubles de la reproduction. Or les coûts cachés des pesticides, comme les coûts pour couvrir des frais de santé, ne sont pas pris en compte dans l'évaluation économique. Bien que très difficilement quantifiables, ces coûts pour l'ensemble de la société peuvent être supérieurs aux bénéfices économiques induits par les pesticides. Si ces coûts étaient connus, le choix rationnel de la société pourrait être alors de s'en passer.

▸▸ Des années 1990 à aujourd'hui : des initiatives nombreuses mais peu efficaces pour réduire l'utilisation des pesticides

Les politiques publiques visant à désintensifier l'agriculture

Dans les années 1990, il apparait nécessaire d'inverser la tendance de l'intensification de la production agricole en développant des politiques publiques adaptées, et ceci pour deux principales raisons (figure 1.12). D'une part, l'explosion de la production agricole a entraîné des excédents de production que l'UE souhaite réduire. D'autre part, les impacts sur l'environnement des pesticides, et des autres intrants chimiques, sont de mieux en mieux identifiés, et décriés, ce qui incite les décideurs publics à définir des politiques pour réduire leur utilisation.

La réforme de la PAC de 1992, dite « MacSharry », instaure pour la première fois l'objectif d'inverser la tendance de l'intensification : il s'agit « d'encourager l'extensification de la production afin de réduire les excédents de production, de contribuer à la protection de l'environnement et de promouvoir des produits alimentaires de qualité » (Jacquet, 1993). Cette réforme marque un tournant dans l'histoire de la PAC, en remplaçant le soutien des prix agricoles par des aides directes à l'hectare, qui seront ensuite progressivement découplées de la production. Les États participant aux négociations du GATT (*General Agreement on Tariffs and Trade*) se sont engagés à ce que l'ensemble des politiques agricoles évoluent vers plus de neutralité vis-à-vis des marchés et des réformes s'engagent dans ce sens, aussi bien en Europe qu'aux États-Unis. Sur le plan interne, cet abandon du soutien par les prix vise également à réduire le coût de gestion des excédents de production en

limitant les incitations à produire. Elle s'accompagne par ailleurs de mesures visant à réduire la surproduction (gel des terres, maintien des quotas laitiers). La baisse des prix doit encourager le développement de systèmes agricoles moins intensifs à travers la modification du rapport entre les prix des intrants et des produits agricoles (figure 1.11). Par exemple, avant la réforme, il était rentable de produire du blé à 8 tonnes par hectare avec un recours important aux intrants, alors que ce n'était plus le cas après, où une production à 7 tonnes par hectare avec des charges d'intrants diminuée de 30 % s'avérait plus rentable (Jacquet, 1993). De nombreux travaux de modélisation ont été conduits à l'époque pour analyser *ex ante* les impacts de la PAC, et tous tendaient à montrer que cette désintensification pouvait avoir lieu (Boussard *et al.*, 1997 ; Boussemart *et al.*, 1996 ; Donaldson *et al.*, 1995).

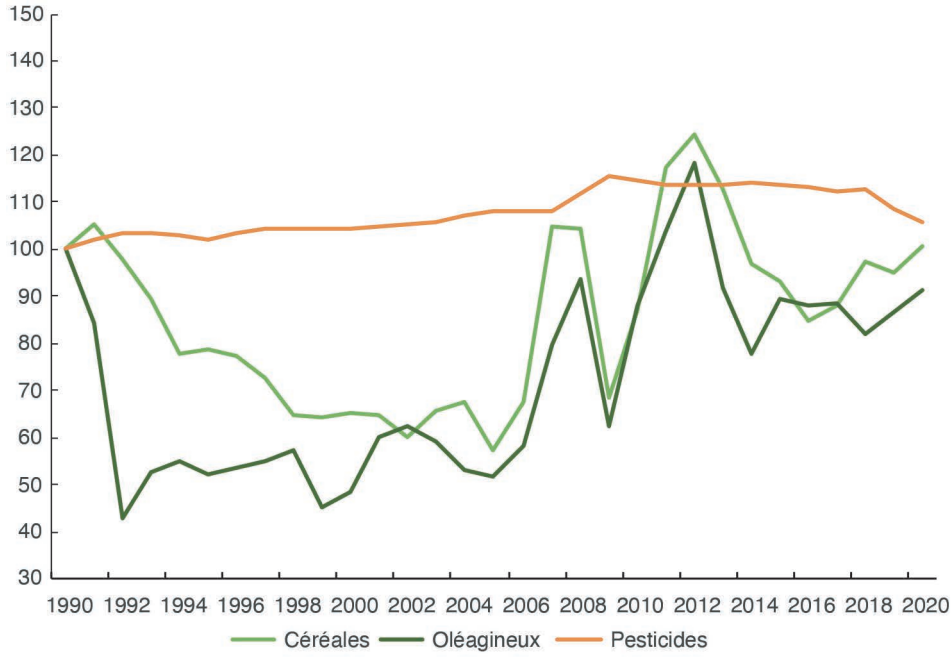

Figure 1.11. Indice des prix des cultures (céréales et oléagineux) et des pesticides, en France de 1990 à 2020 (base 100 en 1990), à partir des données IPPAP et IPAMPA de l'INSEE (2021)

Pour autant, la désintensification attendue n'a pas nettement eu lieu. La réforme a en revanche entraîné des gains d'efficacité dans l'utilisation des intrants, en induisant une certaine réduction de leur « gaspillage ». Ceci est particulièrement net dans le cas des engrais, où de nombreuses actions de recherche et de développement ont été mises en place pour apprendre aux agriculteurs à diminuer les quantités d'engrais utilisés en optimisant le fractionnement des doses et les dates d'application. On observe ainsi, dans la figure 1.2, une diminution du volume des engrais achetés à partir du début des années 1990, et un net ralentissement de la hausse des quantités de pesticides achetées.

La réforme de la PAC de 1999 introduit de nouvelles incitations avec notamment la création des mesures agro-environnementales (MAE). Ces mesures sont mises en place au sein du second pilier de la PAC qui regroupe des mesures socio-structurelles,

agro-environnementales et de développement rural. Les MAE sont un dispositif d'aide volontaire pour soutenir, sur une durée limitée, les agriculteurs s'engageant vers un changement de pratiques. L'aide à la conversion à l'AB mais aussi d'autres MAE ciblées sur des enjeux spécifiques (protection de la biodiversité, qualité de l'eau etc.), et territorialisées à partir de 2007, visent à réduire l'usage des pesticides. Ces mesures ont, dans certains cas, conduit à une réduction effective de consommation de pesticides (Kuhfuss et Subervie, 2018), en particulier lorsqu'elles ont été mobilisées pour protéger la ressource en eau dans certains territoires. Cependant elles ont été généralement insuffisamment adoptées par les agriculteurs et n'ont donc pas entraîné un changement profond des pratiques agricoles.

À partir de 2003, les aides du premier pilier de la PAC ont été conditionnées au respect de bonnes pratiques : respect des directives en vigueur, en particulier de la directive dite « nitrates » et de la directive-cadre sur l'eau, et respect de « bonnes conditions agricoles et environnementales ». La réforme de la PAC de 2013 renforce ces exigences environnementales en les complétant, à partir de 2015, par de nouvelles obligations qui donnent droit à des paiements spécifiques : les paiements verts. À première vue, ces obligations, telles que l'exigence d'une surface minimum en infrastructures écologiques ou la diversification obligatoire des cultures, semblaient des incitations efficaces pour réduire l'utilisation des pesticides. Cependant, le caractère très peu contraignant de ces mesures par rapport aux pratiques d'alors n'a logiquement induit que très peu d'effets sur l'usage des pesticides. D'autres leviers, agissant directement sur la rentabilité des pesticides, pourraient néanmoins être élaborés (encadré 1.10).

Encadré 1.10. La taxation des pesticides

Du point de vue de l'économiste, la taxation des pesticides est le moyen le plus efficace et le moins couteux d'inciter les agriculteurs à en diminuer l'utilisation. Bien que d'envergure limitée, une taxe sur les pesticides a été mise en place en 1999 à travers l'élargissement aux produits phytosanitaires de la taxe générale sur les activités polluantes (TGAP). En 2006, elle a été remplacée par la redevance pour pollution diffuse (RPD) qui est payée par les distributeurs sur la base des quantités de substances actives vendues. Les taux de cette taxe, échelonnés en fonction de la dangerosité des produits, ont été modifiés plusieurs fois : en 2011, ils variaient entre 0,9 €/kg et 5,1 €/kg de pesticides, et depuis 2019, le taux maximal atteint 9 €/kg pour les substances classées cancérigènes, mutagènes et toxiques pour la reproduction (Sénat, 2018). En 2017, le montant de la taxe représentait en général entre 5 % et 6 % des prix des pesticides vendus (OECD, 2017). Ces chiffres peuvent être mis en regard du coût de dépollution pour préserver la qualité de l'eau qui a été évalué à environ 60 000 €/kg de pesticides (Bommelaer et Devaux, 2011). Comme nous le verrons dans la section suivante, aucune baisse tangible dans l'utilisation des pesticides n'a été enregistrée depuis la mise en place de la RPD. À titre de comparaison, le Danemark, et plus récemment la Norvège, taxent les pesticides de manière beaucoup plus importante : au Danemark, les herbicides et fongicides sont taxés à hauteur de 33 % et les insecticides à hauteur de 54 % (Pedersen et Nielsen, 2017). Les taux de taxes employés en Norvège se situent dans les mêmes ordres de grandeur (Finger *et al.*, 2017). Bien que l'utilisation des pesticides ait fortement diminué juste après la mise en place de cette taxe, les objectifs fixés en matière de réduction de l'utilisation des pesticides n'ont pas non plus été atteints, sur la durée, dans ce pays (Pedersen et Nielsen, 2017).

Au niveau européen, en dehors de la PAC, deux directives européennes interviennent dans la régulation de l'usage des pesticides, via l'obligation faite aux États de mettre en place des politiques nationales. D'une part, en 2000, la directive cadre sur l'eau (2000/60/CE), oblige les États à atteindre un « bon état » chimique et écologique de leurs masses d'eau superficielle et un bon état chimique des masses d'eau souterraine. D'autre part, la directive 2009/128/CE, dite « directive pesticides » vise directement une diminution de l'usage des pesticides. Cette directive instaure « un cadre d'action communautaire pour parvenir à une utilisation des pesticides compatible avec le développement durable ». Elle pose les bases de plusieurs dispositifs réglementaires visant la réduction de l'utilisation, des risques et des impacts des pesticides (formation des agriculteurs, contrôle du matériel d'épandage). Elle impose également à chaque État membre d'adopter un plan d'actions national ; en France, il s'agit du plan Écophyto. Le plan Écophyto I a débuté en 2008 : il visait, à échéance de dix ans, une réduction de l'usage des pesticides de 50 % « si possible » (encadré 7.2). Aux vues des faibles retombées en termes de réduction d'usage des pesticides, ce plan a été plusieurs fois révisé, en intégrant de nouvelles actions comme les « certificats d'économie de produits phytopharmaceutiques » (CEPP) (encadré 1.11). En plus de la directive 2009/128/CE, d'autres textes, faisant également partie du « paquet pesticides », visent à accompagner la réduction de l'utilisation des pesticides, comme la directive 2009/127/CE relative aux machines destinées à l'application des pesticides, le règlement (CE) n°1185/2009 relatif aux statistiques sur les pesticides ou encore le n°1107/2009 qui encadre les demandes d'autorisation de mise sur le marché. Ces différents textes, qui ont maintenant plus de dix ans, n'ont pas donné les effets escomptés car l'utilisation des pesticides n'a pas diminué. En 2020, le *Green Deal* européen a fixé un nouvel objectif : – 50 % d'utilisation d'ici 2030.

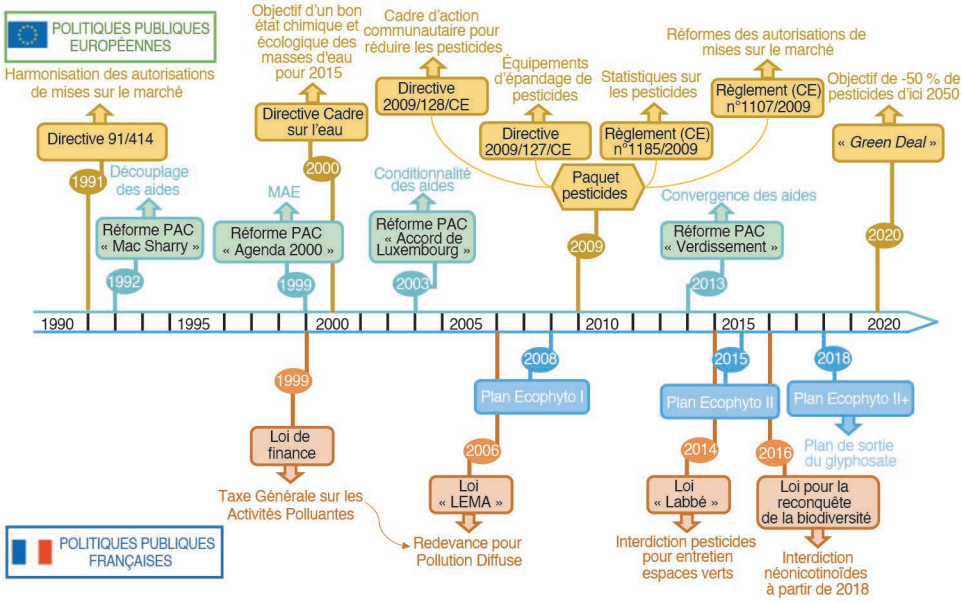

Figure 1.12. Évolutions réglementaires françaises et européennes pour encadrer et réduire l'utilisation des pesticides depuis 1990

Encadré 1.11. Les certificats d'économie de produits phytopharmaceutiques (CEPP)

Le dispositif des CEPP, largement inspiré du dispositif des certificats d'économie d'énergie, a été institué, à titre expérimental dans le cadre de la Loi n°2014-1170 du 13 octobre 2014. Par rapport aux autres dispositifs réglementaires que sont la taxation ou le retrait des autorisations de mise en marché, les CEPP présentent une rupture majeure, puisqu'il s'agit de promouvoir la mise en place de pratiques et de systèmes de culture conduisant à une réduction de l'usage et de l'impact des pesticides. Il repose sur une double logique.

Il s'agit d'abord de construire, valider et mettre en œuvre des fiches-actions, ayant des valeurs standardisées d'économie de pesticides. Dans le dispositif des CEPP, un certificat est attribué quand une action a permis de réduire l'IFT de 1 point sur 1 hectare. Ainsi, ceci permet d'avoir des référentiels communs pour l'ensemble des secteurs de production, tout en traitant de façon unique les différentes cultures et les leviers d'action pour diminuer l'utilisation de pesticides. Les fiches-actions sont construites à partir des propositions d'acteurs des filières agricoles (semenciers, équipementiers, acteurs de la recherche ou du développement, etc.) et sont ensuite validées par une commission indépendante du ministère de l'Agriculture. Il s'agit ensuite d'une logique d'obligation et donc d'obligés. Le dispositif s'adresse aux distributeurs de pesticides, essentiellement coopératives et négoces agricoles, dont l'obligation est proportionnelle au volume historique de leurs ventes, quantifié en NODU (voir encadré 1.6). Ces obligés travaillent donc avec les agriculteurs pour promouvoir l'adoption de pratiques et systèmes pour lesquels des fiches-actions permettent la délivrance de certificats. Si un obligé n'atteint pas ses obligations pour une année ou une période donnée, il s'expose à des sanctions (risque de suspension de l'agrément vente).

En septembre 2021, plus de 530 fiches initiales ont été proposées et évaluées dont 62 % ont été acceptées et traduites en 102 fiches-actions disponibles dans le catalogue officiel. Ce dispositif continue à évoluer et à s'inscrire dans le paysage de la réduction d'usages des pesticides. Les deux prochaines étapes importantes sont d'une part l'intégration des traitements de semences dans le calcul des obligations et d'autre part l'extension du dispositif aux départements et régions d'outre-mer.

Éléments réglementaires encadrant la vente et l'usage de pesticides

Les évolutions en matière de réglementation sur les pesticides sont liées d'une part aux innovations en matière de protection des cultures, proposant sur le marché de nouvelles substances actives et de nouveaux produits, et d'autre part à la mise en évidence des effets néfastes sur l'environnement ou sur les humains de ces produits, qu'il a alors fallu réguler. En 1978, l'unification européenne impose le premier cadre juridique commun et interdit certaines substances actives. Cette interdiction a un double objectif : réduire les risques en matière de santé publique et d'environnement, et éviter toute concurrence déloyale entre les États qui autorisaient ou non certaines substances (encadré 1.12). Par la suite, la volonté d'établir un grand marché homogène des intrants et des produits agricoles accélère la mise en place d'un ensemble de politiques environnementales et sanitaires (Bonnefoy, 2012). En 1991, la directive 91/414 introduit une première harmonisation européenne des procédures d'approbation de substances actives : les États membres perdent le choix individuel des

substances actives autorisées et doivent appliquer une procédure uniforme pour les demandes d'autorisation de mise sur le marché. Cependant, cette procédure se heurte à des lourdeurs administratives importantes, et ne produit pas de résultats probants. Les procédures de demande d'autorisation de mise sur le marché sont donc réformées en 2009 à travers le nouveau règlement (CE) n°1107/2009 inclus dans le « paquet pesticide ». Il intègre, entres autres, des critères d'exclusion plus stricts pour l'approbation des substances actives, l'élargissement du besoin d'approbation à d'autres composés contenus dans les pesticides comme les adjuvants, et la reconnaissance mutuelle des autorisations entre États membres.

Les demandes d'autorisation de mise sur le marché se font actuellement en deux étapes : la première à l'échelle européenne, la seconde dans chaque État membre. La procédure d'évaluation des substances actives est la première étape : elle ne concerne pas le pesticide formulé (c'est-à-dire la substance active dans son association aux autres composants de formulation), mais seulement la substance active. Pour cela, l'entreprise demandant l'autorisation doit présenter un dossier prouvant l'efficacité de la substance active et l'absence de risques inacceptables sur la santé et l'environnement. Le dossier est analysé par l'*European food safety authority* (EFSA) qui, si elle donne un avis positif, le transmet à la commission européenne pour autorisation sur le marché de la substance active (figure 1.13). La deuxième étape, la procédure de mise sur le marché du produit commercial, est du ressort des États membres. L'entreprise demandant l'autorisation présente un dossier prouvant l'efficacité du produit et l'absence de risques inacceptables du produit pour les usages concernés. En France, ce dossier est évalué par l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) qui, si l'avis est positif, le transmet au ministère de l'Agriculture pour autorisation. Une fois l'ensemble de ces étapes franchies, le produit contenant la substance active est autorisé à la vente (Anses, 2019b).

Durant les deux étapes, l'entreprise soumet un dossier qui doit prouver que le niveau de risques est en dessous d'une certaine limite. Ce dossier doit se baser sur un corpus d'études évaluant la toxicité sur différents organismes, ainsi que sur des modèles de prévision des concentrations de la substance active dans l'environnement et tenir compte de l'exposition potentielle des professionnels agricoles et du reste de la population. Ces études doivent être évaluées par des pairs de manière indépendante, mais de nombreuses ONG dénoncent l'opacité de la procédure (Citizens for science in pesticide regulation, 2018). Un autre problème est que l'évaluation des pesticides est cantonnée à la notion d'exposition aigüe qui permet d'évaluer le danger immédiat représenté par le produit (et la substance active) et ainsi de définir une dose acceptable d'exposition. Cette dose est déterminée par des tests en laboratoire, puis des tests en plein champ réalisés avec des agriculteurs volontaires pour estimer leur niveau de contamination, et de le comparer à cette dose acceptable. Les études épidémiologiques qui évaluent les risques liés aux conditions réelles d'utilisation et à une exposition chronique à long terme ne sont donc pas intégrées dans l'évaluation (Jouzel, 2019).

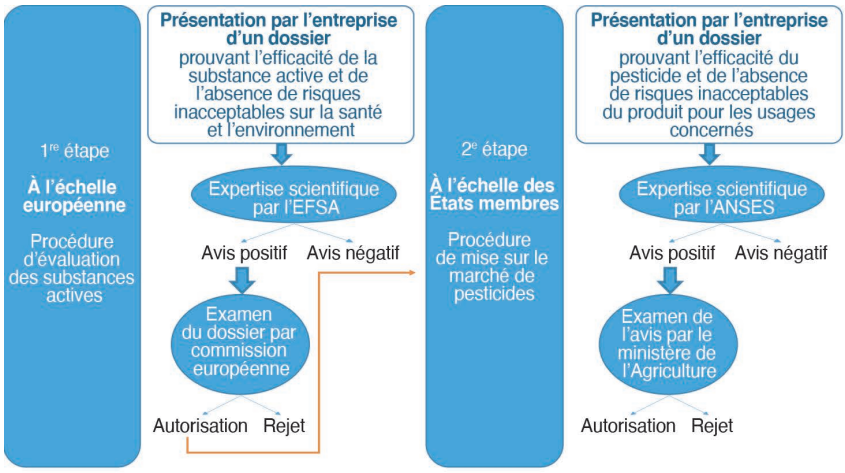

Figure 1.13. Étapes d'autorisation de mise sur le marché d'une substance active et du pesticide qui la contient en France

Outre les demandes d'autorisation de mise sur le marché, les réévaluations des substances actives et des pesticides suivent la même procédure. Ces réévaluations donnent régulièrement lieu à des retraits de produits qui correspondent à des interdictions totales ou partielles relatives à certains usages. Comme le montre la figure 1.14, le nombre de pesticides autorisés a augmenté jusque dans les années 1980 pour entamer une baisse importante à partir des années 2000, due à l'augmentation des retraits et à la diminution des nouvelles autorisations. L'interdiction de certains pesticides intervient également en dehors du cadre de ces réévaluations en excluant certains usages. Par exemple, la loi dite « Labbé » de 2014, a interdit l'utilisation, à partir de 2017, de tous les pesticides de synthèse par les personnes publiques (État, collectivités territoriales et établissements publics), pour l'entretien des espaces verts et des voiries notamment. Cette interdiction a été étendue aux particuliers à partir de 2019.

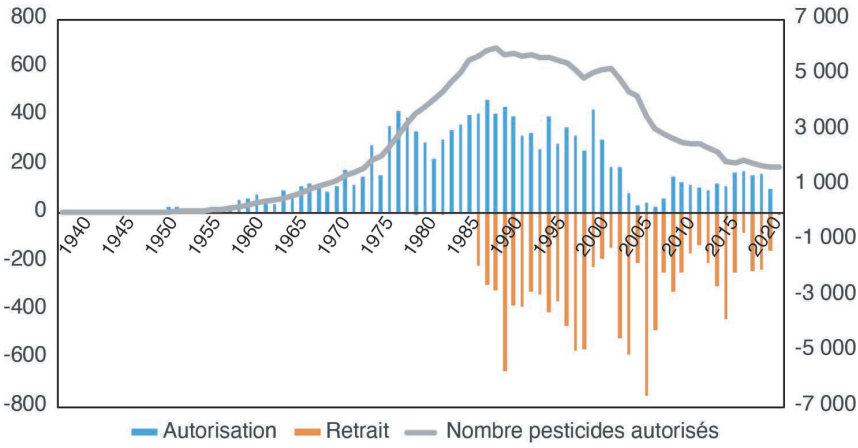

Figure 1.14. Évolution des autorisations et retraits de pesticides (produits phytosanitaires *stricto sensu*, hors adjuvants) à partir des données du catalogue Ephy (Anses, 2021)

Encadré 1.12. Les réglementations nationales face au marché mondial des pesticides

Les réglementations encadrant l'utilisation de pesticides diffèrent largement d'un pays à l'autre, ce qui peut donner lieu à une concurrence déloyale sur les marchés internationaux, certains pays autorisant ou non certains pesticides. Par exemple, plus du quart des volumes de pesticides utilisés dans l'agriculture américaine sont interdits dans l'UE, en particulier des herbicides (Donley, 2019). De plus, même si l'UE semble proposer une réglementation assez stricte, une partie des pesticides interdits d'utilisation dans l'UE sont en fait produits sur son sol, puis exportés vers des pays aux réglementations plus souples. Ainsi, l'ONG Public Eye montre qu'en 2018, l'UE a exporté dans le monde environ 80 000 tonnes de pesticides dont elle interdit l'utilisation, 30 % étant exportés aux États-Unis (Public Eye, 2020). Outre les États-Unis, les principaux importateurs de ces pesticides interdits sont des pays dont les réglementations sont moins strictes et qui en retour exportent massivement vers l'Europe des produits agricoles, comme l'Ukraine avec le blé, ou le Mexique et le Maroc avec les fruits. Ceci est d'autant plus préoccupant que les conditions d'utilisation des pesticides sont parfois difficilement respectées dans ces pays, conduisant à des risques de contamination plus élevés, aussi bien pour les agriculteurs locaux que pour les consommateurs (OMS et FAO, 2019). On considère que 97 % à 98 % des légumes et fruits produits en Europe sont conformes aux seuils règlementaires, mais cette part est plus faible, autour de 90 %, pour les importations (DGCCRF, 2019). Ainsi, malgré la réglementation européenne, qui est l'une des plus strictes dans le monde, les consommateurs européens sont confrontés à des expositions chroniques plus ou moins régulières et peuvent retrouver des résidus de pesticides interdits dans leurs assiettes.

À retenir

Une volonté de réduire les effets négatifs de l'intensification de la production agricole émerge au début des années 1990 au niveau européen. À partir de 1992, les réformes successives de la PAC mettent en place des incitations au changement de pratiques agricoles : baisse des prix des produits agricoles, MAE, conditionnalité des aides, paiements verts. Cependant, ces différentes mesures, en réalité peu contraignantes, n'ont pas eu les effets escomptés sur les changements de pratiques. Par ailleurs, le « paquet pesticides » de 2009 inclut plusieurs directives et règlements pour favoriser la réduction d'usage des pesticides. La directive 2009/128/CE oblige ainsi les États à mettre en place des plans d'actions nationaux. C'est dans ce cadre qu'est alors mis en place le plan Écophyto (encadré 7.2). Les procédures d'autorisation de mises sur le marché des pesticides ont également été réformées en intégrant des critères plus stricts pour l'approbation des substances actives, et la reconnaissance mutuelle des autorisations entre États membres au sein de l'UE. Les substances actives sont tout d'abord évaluées à l'échelle européenne, puis les formulations de pesticides contenant ces substances actives sont évaluées par les États membres. L'évaluation des risques et de la toxicité reste sujette à controverses. Depuis le début des années 2000, le nombre de pesticides autorisés a chuté considérablement et les pesticides les plus dangereux sont progressivement retirés du marché, mais globalement l'utilisation des pesticides n'a pas diminué.

Conclusion

Au cours du XX^{e} siècle, les pesticides sont devenus une composante centrale des itinéraires techniques. Différentes générations de fongicides, herbicides et insecticides se sont succédées grâce à l'essor de la chimie organique. Ces intrants ont accompagné l'intensification de l'agriculture qui a permis d'augmenter significativement la production agricole avec la mise en place de systèmes de culture simplifiés, mais très sensibles aux bioagresseurs. L'utilisation de ces intrants chimiques a également été favorisée par le dispositif de soutien des prix de la PAC, qui a incité les agriculteurs à obtenir des rendements toujours plus élevés. Cependant, cette intensification de la production n'a pas été sans conséquence sur l'environnement et la santé. La biodiversité est en particulier largement impactée par les pesticides, depuis les insectes jusqu'à la plupart des chaines trophiques. L'air, l'eau et le sol sont également contaminés durablement par les pesticides, ce qui induit une exposition de l'ensemble de la population à ces substances. Des effets aigus et chroniques se manifestent, en particulier chez les professionnels agricoles, engendrant des frais de santé importants. D'autres coûts cachés, comme les coûts de décontamination des milieux naturels, sont difficilement quantifiables mais représentent sans doute un coût bien supérieur pour la société que les bénéfices économiques engendrés par les pesticides.

Une volonté de réduire les effets négatifs de l'intensification de la production agricole émerge au début des années 1990 au niveau européen. À partir de 1992, les réformes successives de la PAC mettent en place des incitations au changement de pratiques agricoles : baisse des prix des produits agricoles, MAE, conditionnalité des aides, paiements verts, etc. Cependant, ces différentes mesures n'ont eu que relativement peu d'effets sur les changements de pratiques. Pour renverser la tendance, des plans d'actions nationaux sont mis en place, comme le plan Écophyto en France en 2008. Les procédures d'autorisation de mises sur le marché des pesticides sont également réformées en intégrant des critères plus stricts pour l'approbation des substances actives. Même si l'évaluation des risques et de la toxicité des pesticides reste sujette à controverses, le nombre de pesticides autorisés a chuté considérablement dans les années 2000. Néanmoins, la France reste l'un des plus gros consommateurs de pesticides dans le monde, avec 85 000 tonnes de pesticides utilisés en 2018 sur le territoire national. Ces intrants sont principalement utilisés en grande culture, viticulture et arboriculture, ce qui se retrouve dans la répartition spatiale des ventes de pesticides dans l'Hexagone. Cette dépendance de l'agriculture aux pesticides s'explique par différents facteurs techniques, économiques et organisationnels, qui verrouillent les filières et limitent le développement de modes de production sans pesticides.

Références bibliographiques

Agreste, 2018. Apports de produits phytopharmaceutiques en arboriculture : nombre de traitements et indicateur de fréquence de traitements - Campagnes agricoles 2015 et 2012, Les dossiers, ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 30 p.

Agreste, 2019. Pratiques culturales en grandes cultures en 2017 : IFT et nombre de traitements, Chiffres et Données, Paris, France, ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 30 p.

Agreste, 2020. Pratiques phytosanitaires en production légumière en 2018 : IFT et nombre de traitements, Chiffres et Données, Paris, France, ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 16 p.

Agreste, 2021. Données du RICA

Agreste Guadeloupe, 2018. Enquête Pratiques culturales en arboriculture en 2015 : la culture de la banane, ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 4 p.

Agreste Nouvelle-Aquitaine, 2019. Les pratiques phytosanitaires en viticulture en Nouvelle-Aquitaine en 2016, Analyses & Résultats, ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 6 p.

Agreste Pays de la Loire, 2019. Pays de la Loire : pratiques culturales 2015 en pomiculture, Paris, France, Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 6 p.

Anses, 2016. Expositions professionnelles aux pesticides en agriculture - Volume n°1 : Volume central, Rapport d'expertise collective, 244 p.

Anses, 2018. Risques et bénéfices relatifs des alternatives aux produits phytopharmaceutiques comportant des néonicotinoïdes - Tome 1 : Rapport du groupe de travail Identification des alternatives aux usages autorisés des néonicotinoïdes, Rapport d'expertise collective, 548 p.

Anses, 2019a. Les perturbateurs endocriniens, Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

Anses, 2019b. Evaluation avant mise sur le marché des préparations commerciales phytopharmaceutiques, Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

Anses, 2021. Données ouvertes du catalogue E-Phy des produits phytopharmaceutiques, matières fertilisantes et supports de culture, adjuvants, produits mixtes et mélanges.

Becker N., 2017. External costs of food production: environmental and human health costs of pest management, *in* Coll M., Wajnberg E. (eds), *Environmental pest management: challenges for agronomists, ecologists, economists and policymakers*, John Wiley & Sons, 369-384. https://doi.org/10.1002/9781119255574.ch16

Bommelaer O., Devaux J., 2011. Coût des principales pollutions agricoles de l'eau, Paris, France, Commissariat Général au Développement Durable, 34 p. (coll. Etudes et documents)

Bonnefoy N., 2012. Pesticides : vers le risque zéro, Paris, France, Sénat, 348 p.

Bourguet D., Guillemaud T., 2016. The hidden and external costs of pesticide use, *in* Lichtfouse E. (éd.), *Sustainable agriculture reviews, vol 19*, Cham, Springer, 35-120. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26777-7_2

Boussard J.-M., Boussemart J.-P., Flichman G., Jacquet F., Lefer H.-B., 1997. Les effets de la réforme de la PAC sur les exploitations de grande culture, *Économie rurale*, (239) :20-29. https://doi.org/10.3406/ecoru.1997.4865

Boussemart J.P., Flichman G., Jacquet F., Lefer E.H.B., 1996. Prévoir les effets de la réforme de la politique agricole commune sur deux régions agricoles françaises : application d'un modèle bioéconomique, *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'Agroéconomie*, 44(2) :121-136. https://doi.org/10.1111/j.1744-7976.1996.tb00188.x

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

Carpentier A., Fadhuile A., Roignant M., Blanck M., Reboud X., Jacquet F., Huygue C., 2020. Alternatives au glyphosate en grandes cultures. Evaluation économique, Paris, INRAE, 161 p. https://doi.org/10.15454/9gv2-3904

Carson R., 1962. *Silent Spring*, Boston, Hamish Hamilton

Citizens for science in pesticide regulation, 2018. Refonte de l'évaluation des risques liés aux pesticides, Brussels, Pesticide action network, 30 p.

Commissariat général au développement durable, 2018. Biodiversité - Les chiffres clés - Edition 2018, Paris, Agence française pour la biodiversité, Observatoire national de la biodiversité, 92 p.

DAAF Guadeloupe, 2018. Chlordécone et pesticides : mise à disposition des résultats de l'étude ChlEauTerre.

DGCCRF, 2019. Contrôle des résidus de pesticides dans les denrées végétales en 2017.

Díaz S., Settele J., Brondízio E., Ngo H.T., Guèze M., Agard J., *et al*. (eds), 2019. Résumé à l'intention des décideurs du rapport sur l'évaluation mondiale de la biodiversité et des services écosystémiques, Bonn, IPBES secretariat, 56 p.

Donaldson A.B., Flichman G., Webster J.P.G., 1995. Integrating agronomic and economic models for policy analysis at the farm level: The impact of CAP reform in two European regions, *Agricultural Systems*, 48(2):163-178. https://doi.org/10.1016/0308-521X(94)00009-G

Donley N., 2019. The USA lags behind other agricultural nations in banning harmful pesticides, *Environmental Health*, 18:44. https://doi.org/10.1186/s12940-019-0488-0

Eurostat, 2021. Ventes de pesticides.

FAOSTAT, 2021. Utilisation de pesticides.

Finger R., Möhring N., Dalhaus T., Böcker T., 2017. Revisiting pesticide taxation schemes, *Ecological Economics*, 134:263-266. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.12.001

Gaudriault P., Mazaud-Guittot S., Lavoué V., Coiffec I., Lesné L., Dejucq-Rainsford N., *et al*., 2017. Endocrine disruption in human fetal testis explants by individual and combined exposures to selected pharmaceuticals, pesticides, and environmental pollutants, *Environmental Health Perspectives*, 125(8):087004. https://doi.org/10.1289/EHP1014

Générations Futures, 2018. Etat des lieux sur les résidus de pesticides dans les fruits et les légumes en France, 36 p.

Griffon M., 2002. Révolution verte, révolution doublement verte - Quelles technologies, institutions et recherche pour les agricultures de l'avenir ? *Mondes en développement*, 2002/1 (117) : 39-44. https://doi.org/10.3917/med.117.0039

Hallmann C.A., Foppen R.P.B., van Turnhout C.A.M., de Kroon H., Jongejans E., 2014. Declines in insectivorous birds are associated with high neonicotinoid concentrations, *Nature*, 511:341-343. https://doi.org/10.1038/nature13531

Hébert J., 1969. La fumure azotée du blé tendre d'hiver, *Bulletin Technique d'Information*, (224) :755-766.

INRAE, 2020. La chlordécone, un poison pour longtemps, INRAE Institutionnel.

INSEE, 2020. Comptes CCAN.

INSEE, 2021. Indices des prix dans l'agriculture.

Inserm, 2013. Pesticides : effets sur la santé, Paris, Collection expertise collective, 161 p.

Inserm, 2021. Pesticides et effets sur la santé : nouvelles données, Collection Expertise collective, EDP Sciences, 1036 p.

Institut national du cancer, 2014. Pesticides et risques de cancers, Fiche repère, 12 p.

IPBES, 2016. Assessment report on pollinators, pollination and food production, Bonn, Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, 552 p. https://doi.org/10.5281/ZENODO.3402856

Jacquet F., 1993. La réforme de 1992, un tournant dans l'histoire de la politique agricole commune, *Le Déméter : économie et stratégies agricoles*, 13-73.

Jactel H., Imler J.-L., Lambrechts L., Failloux A.-B., Lebreton J.D., Le Maho Y., *et al*., 2020. Insect decline: immediate action is needed, *Comptes Rendus. Biologies*, 343(3) :267-293. https://doi.org/10.5802/crbiol.37

Jactel H., Verheggen F., Thiéry D., Escobar-Gutiérrez A.J., Gachet E., Desneux N., 2019. Alternatives to neonicotinoids, *Environment International*, 129:423-429. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.04.045

Jepsen M.R., Kuemmerle T., Müller D., Erb K., Verburg P.H., Haberl H., … Reenberg A., 2015. Transitions in European land-management regimes between 1800 and 2010, *Land Use Policy*, 49:53-64. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.07.003

Jouzel J.-N., 2019. Pesticides : Comment ignorer ce que l'on sait, Paris, Les Presses de Sciences Po, 262 p.

Kuhfuss L., Subervie J., 2018. Do European agri-environment measures help reduce herbicide use? Evidence from viticulture in France, *Ecological Economics*, 149:202-211. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.03.015

Lachiver M., 2002. Vins, vignes et vignerons : histoire du vignoble français, Paris, Fayard, 714 p.

Lamine C., Messéan A., Paratte R., Hochereau F., Meynard J.-M., Ricci P., 2011. Chapitre 2. La lutte chimique au cœur de la construction du système agri-alimentaire, *in* Ricci P. (ed), *Repenser la protection des cultures. Innovations et transitions*, Dijon, Éducagri éditions, 29-52.

Mahé L.P., Rainelli P., 1987. Impact des pratiques et des politiques agricoles sur l'environnement, *Cahiers d'économie et sociologie rurales*, (4) :9-31.

Meynard J.M., Messéan A., Charlier, A., Charrier F., Farès M., Le Bail M., Magrini M.-B., 2013. Freins et leviers à la diversification des cultures. Etude au niveau des exploitations agricoles et des filières. Paris, Rapport d'étude, INRA, 226 p.

Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2021. Ventes de produits phytopharmaceutiques pour l'année 2019.

Ministère de la Transition écologique, 2019. Pesticides - Fiches thématiques, L'environnement en France - Rapport sur l'état de l'environnement.

Ministère de la Transition écologique, 2020a. QSA – Les quantités de substances actives vendues au niveau infra-national, Banque Nationale des Ventes par les Distributeurs (BNV-D), extraction du 26/11/2020.

Ministère de la Transition écologique, 2020b. Indicateurs de suivi des achats de produits phytopharmaceutiques en France : approche territoriale à partir des quantités de substances actives vendues par code postal des acheteurs, Banque Nationale des Ventes par les Distributeurs (BNV-D), extraction du 26/11/2020.

Ministère de la Transition écologique, 2020c. Eau et milieux aquatiques - Les chiffres clés - Édition 2020, Paris, Le service des données et études statistiques (SDES) en partenariat avec l'Office français de la biodiversité (OFB), 128 p.

Ministère de la Transition écologique, 2021. Synthèse des achats de produits phytopharmaceutiques à partir des registres de la BNV-D, Banque Nationale des Ventes par les Distributeurs (BNV-D), extraction du 26/11/2020.

Ministère des Solidarités et de la Santé, 2019. Pesticides : l'évolution des politiques publiques pour protéger les populations.

OECD, 2017. The evolution of the tax on pesticides and the pesticide savings certificates in France, *in* The political economy of biodiversity policy reform, Paris, OECD Publishing, 41-58. https://doi.org/10.1787/9789264269545-7-en

Oerke E.-C., 2006. Crop losses to pests, *The Journal of Agricultural Science*, 144(1):31-43. https://doi.org/10.1017/S0021859605005708

Ollerton J., Erenler H., Edwards M., Crockett R., 2014. Extinctions of aculeate pollinators in Britain and the role of large-scale agricultural changes, *Science*, 346(6215):1360-1362. https://doi.org/10.1126/science.1257259

OMS et FAO, 2019. Global situation of pesticide management in agriculture and public health: report of a 2018 WHO-FAO survey, Genève, Organisation mondiale de la Santé, 73 p.

Pedersen A.B., Nielsen H.Ø., 2017. Effectiveness of pesticide policies: experiences from Danish pesticide regulation 1986-2015, *in* Coll M., Wajnberg E. (eds), *Environmental pest management: challenges for agronomists, ecologists, economists and policymakers*, John Wiley & Sons, 267-324. https://doi.org/10.1002/9781119255574.ch13

Pelosi C., Bertrand C., Daniele G., Coeurdassier M., Benoit P., Nélieu S., *et al*., 2021. Residues of currently used pesticides in soils and earthworms: A silent threat?, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 305:107167. https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107167

Pingali P.L., 2012. Green Revolution: impacts, limits, and the path ahead, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(31):12302-12308. https://doi.org/10.1073/pnas.0912953109

Poulain D., 2004. Histoires et chronologies de l'agriculture française, Paris, Ellipses, 426 p.

Pretty J.N., Brett C., Gee D., Hine R.E., Mason C.F., Morison J.I.L., *et al*., 2000. An assessment of the total external costs of UK agriculture, *Agricultural Systems*, 65(2):113-136. https://doi.org/10.1016/S0308-521X(00)00031-7

Public Eye, 2020. Pesticides interdits : l'hypocrisie toxique de l'Union européenne.

Sánchez-Bayo F., Wyckhuys K.A.G., 2019. Worldwide decline of the entomofauna: a review of its drivers, *Biological Conservation*, 232:8-27. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.01.020

Santé Publique France et Anses, 2018. Synthèse - Martinique / Guadeloupe : évaluation des expositions à la chlordécone et aux autres pesticides. Surveillance du cancer de la prostate, 6 p.

Seibold S., Gossner M.M., Simons N.K., Blüthgen N., Müller J., Ambarlı D., *et al*., 2019. Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers, *Nature*, 574(7780):671-674. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1684-3

Sénat, 2018. Projet de loi de finances pour 2019 : Écologie, développement et mobilité durables.

Simon-Delso N., Martin G.S., Bruneau E., Minsart L.-A., Mouret C., Hautier L., 2014. Honeybee colony disorder in crop areas: the role of pesticides and viruses, PLOS ONE, 9(7):e103073. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103073

Székács A., Darvas B., 2018. Re-registration challenges of glyphosate in the European Union, *Frontiers in Environmental Science*, 6 https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00078

Thomas J.A., Telfer M.G., Roy D.B., Preston C.D., Greenwood J.J.D., Asher J., *et al*., 2004. Comparative losses of British butterflies, birds, and plants and the global extinction crisis, *Science*, 303(5665):1879-1881. https://doi.org/10.1126/science.1095046

Urruty N., 2017. Robustesse du rendement du blé tendre face aux perturbations abiotiques et biotiques : cadre méthodologique et leviers agronomiques, thèse de doctorat, Université de Poitiers, https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01980909

Vandenberg L.N., Colborn T., Hayes T.B., Heindel J.J., Jacobs D.R., Lee D.-H., *et al*., 2012. Hormones and endocrine-disrupting chemicals: low-dose effects and nonmonotonic dose responses, *Endocrine Reviews*, 33(3):378-455. https://doi.org/10.1210/er.2011-1050

van Ittersum M.K., Cassman K.G., Grassini P., Wolf J., Tittonell P., Hochman Z., 2013. Yield gap analysis with local to global relevance—A review, *Field Crops Research*, 1434-17. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009

Wagner D.L., Grames E.M., Forister M.L., Berenbaum M.R., Stopak D., 2021. Insect decline in the Anthropocene: death by a thousand cuts, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(2):e2023989118. https://doi.org/10.1073/pnas.2023989118

Wintermantel D., Odoux J.-F., Decourtye A., Henry M., Allier F., Bretagnolle V., 2020. Neonicotinoid-induced mortality risk for bees foraging on oilseed rape nectar persists despite EU moratorium, *Science of The Total Environment*, 704:135400. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135400

Yamamuro M., Komuro T., Kamiya H., Kato T., Hasegawa H., Kameda Y., 2019. Neonicotinoids disrupt aquatic food webs and decrease fishery yields, *Science*, 366(6465):620-623. https://doi.org/10.1126/science.aax3442

Chapitre 2

Pourquoi faut-il changer de stratégie dans la protection des cultures ?

Florence Jacquet, Julia Jouan

Aujourd'hui, l'agriculture française est largement dépendante des pesticides : des systèmes de culture, aux entreprises d'amont et d'aval, en passant par les exploitations, c'est l'ensemble du fonctionnement des filières agricoles et agroalimentaires qui repose sur l'utilisation de pesticides (figure 2.1). Des stratégies existent pourtant pour diminuer, voire se passer complètement des pesticides. D'une part, l'IPM vise à limiter au maximum l'utilisation de ces intrants. D'autre part, l'AB implique un cahier des charges qui interdit l'utilisation des pesticides de synthèse.

⏩ La dépendance aux pesticides des systèmes agricoles : quels sont les freins au changement ?

À l'échelle des systèmes de culture : un cercle vicieux qui favorise le recours aux pesticides

Trois éléments rendent l'utilisation de pesticides indispensable dans les systèmes de culture conventionnels. Tout d'abord, ces systèmes de culture sont généralement basés sur un nombre limité d'espèces et de variétés végétales, implantées pour plusieurs années dans le cas des cultures pérennes (arboriculture, viticulture) ou qui reviennent fréquemment sur une même parcelle pour les grandes cultures, ce qui, dans les deux cas, favorise le développement de bioagresseurs. Deuxièmement, les variétés sélectionnées au fil des années l'ont été avant tout pour leurs hauts rendements plutôt que pour leurs capacités de résistance aux bioagresseurs, ce qui les a rendues progressivement plus sensibles. Toutefois, la résistance aux maladies fait aujourd'hui partie des critères

de sélection et d'inscription au catalogue pour la grande majorité des espèces cultivées. Troisièmement, les cultures sont implantées à haute densité, et de plus en plus tôt dans la saison pour les grandes cultures, avec un recours important à la fertilisation, ce qui permet de maximiser les rendements mais favorise également les attaques de bioagresseurs. Dans ce contexte, les pesticides de synthèse sont devenus essentiels pour protéger efficacement les plantes contre les bioagresseurs. Les caractéristiques des systèmes de culture actuels – faible diversité, variétés peu résistantes et forte densité – se sont ainsi développées grâce à l'utilisation des pesticides (Delecourt *et al.*, 2019 ; Meynard et Girardin, 1991). Les pesticides sont considérés comme des intrants au même titre que les semences ou la fertilisation et non pas comme des produits à but curatif, venant soigner les plantes de manière ponctuelle, d'autant plus qu'ils sont souvent utilisés en préventif. Parmi les pesticides, les insecticides appliqués sur la végétation diminuent également l'abondance de nombreux insectes non ciblés. En diminuant la présence des auxiliaires de cultures, les pesticides réduisent le potentiel des régulations naturelles et donc rendent leur utilisation d'autant plus nécessaire (van der Sluijs, 2020). Cette situation est renforcée par la disparition d'éléments paysagers, comme les haies ou les jachères, limitant d'autant plus les populations d'auxiliaires qui y trouvaient refuge. Ainsi, pour maximiser les surfaces et la fréquence de retour des cultures les plus rentables, les agriculteurs privilégient des pratiques qui favorisent les bioagresseurs, limitent la résistance des cultures et rendent indispensable le recours aux pesticides : ceux-ci sont devenus la « clef de voûte » des systèmes de culture (Guichard *et al.*, 2017).

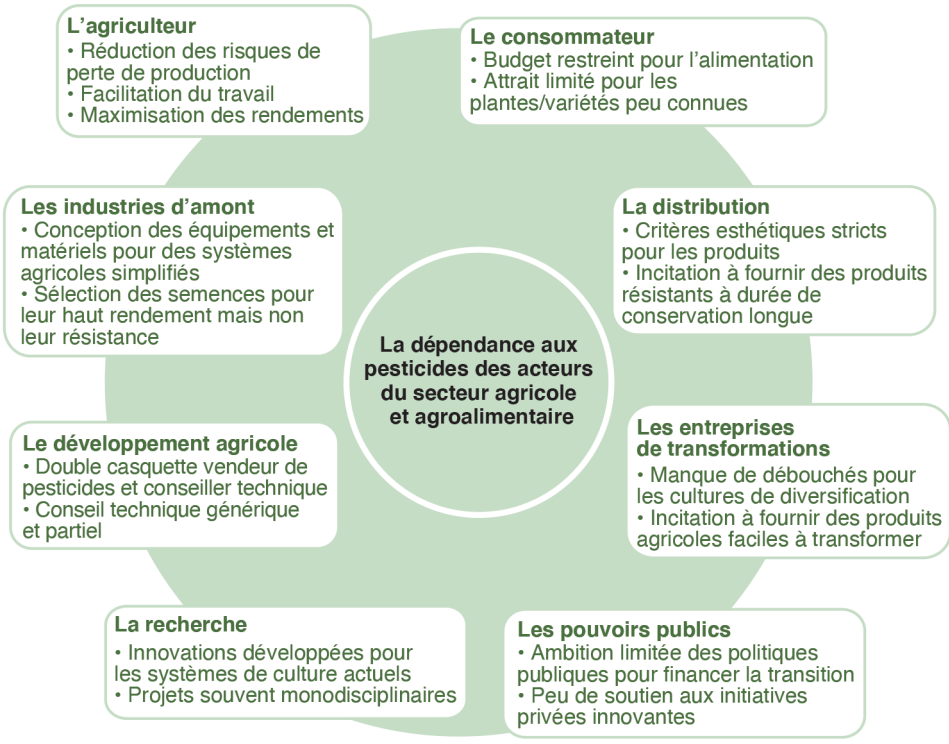

Figure 2.1. L'ensemble des acteurs du secteur agricole et agroalimentaire sont dépendants des pesticides

En parallèle, l'utilisation répétée de pesticides induit le développement de résistances chez les bioagresseurs qui s'adaptent aux substances actives contenues dans les pesticides, contribuant à leur inefficacité qui elle-même conduit à multiplier les traitements. Ceci est particulièrement marqué pour les herbicides sur céréales, avec le développement de flores résistantes aux sulfonylurées chez le vulpin, la folle avoine ou le ray-grass (Chauvel *et al.*, 2009). Pour contrer ce phénomène, les agriculteurs sont donc engagés dans une course de vitesse, en utilisant plus de pesticides et en faisant appel à de nouvelles substances actives, qui permettent de limiter ces résistances (Bakker *et al.*, 2020), ceci se trouvant freiné par l'absence de découverte de nouveaux modes d'action. Ces deux tendances – diminution des auxiliaires et augmentation des résistances – aboutissent alors à l'émergence d'un cercle vicieux à la base d'une utilisation massive de pesticides.

À l'échelle de l'exploitation : l'utilisation des pesticides assujettie au contexte économique

Les pesticides représentent un outil efficace et peu onéreux pour lutter contre les bioagresseurs et ainsi limiter les risques de perte de production (Chèze *et al.*, 2020). Depuis la fin des années 1990, le rapport des prix des cultures sur le prix des pesticides est favorable à l'utilisation des pesticides. Ainsi, bien que des solutions techniques alternatives aux pesticides soient disponibles, peu d'entre elles sont mises en œuvre car les pesticides représentent une solution plus simple, plus rapide, et surtout moins chère, pour lutter contre les bioagresseurs, tant que l'on ne prend pas en compte les coûts cachés liés aux externalités négatives des pesticides (encadré 2.1). La dépendance des cultures aux pesticides est donc étroitement liée à des facteurs économiques (Carpentier, 2010). Les pesticides ont également permis de faciliter le travail des agriculteurs. Couplés à un machinisme agricole de plus en plus performant, ils ont permis de réaliser des tâches fastidieuses, comme le désherbage, beaucoup plus rapidement et avec une efficacité inégalée. Il a donc été possible de produire plus avec moins de travailleurs agricoles, ce qui a conduit à une augmentation de la taille des exploitations. Cette tendance à l'agrandissement représente à présent un frein important à la diminution des pesticides, d'autant plus que, dans certains cas, la réduction de l'utilisation de pesticides peut augmenter le besoin de main d'œuvre (en maraichage en particulier), et donc les coûts de production associés (Forget *et al.*, 2019). Toutefois, de nombreuses solutions agronomiques existent et permettent d'ores et déjà à certains agriculteurs de réduire leurs utilisations de pesticides sans que leurs revenus en soient diminués.

Cependant, l'utilisation des pesticides ne s'inscrit pas toujours dans une maximisation du revenu. Par exemple, afin d'obtenir des rendements toujours plus hauts, certains agriculteurs ont une consommation très élevée de pesticides, qui réduit leurs marges brutes et ne permettent donc pas de maximiser leurs revenus (Boussemart *et al.*, 2013 ; Nave *et al.*, 2013 ; Pedersen *et al.*, 2012). D'autres surutilisent aussi les pesticides afin de limiter au maximum les risques de perte de cultures : les pesticides servent ici d'outil d'assurance, en particulier lorsque les produits agricoles ont une forte valeur ajoutée (Aubert et Enjolras, 2014). De plus, le manque de formation et d'information des agriculteurs sur les régulations naturelles et l'utilisation généralisée des pesticides ont sans doute engendré un manque de connaissances sur le fonctionnement des agroécosystèmes,

renforçant la dépendance aux pesticides. Enfin, l'intention des agriculteurs de réduire leur utilisation semble fortement déterminée par le fait que d'autres agriculteurs en prennent également l'initiative (Bakker *et al.*, 2021 ; Stallman et James, 2015).

Encadré 2.1. Les coûts de sortie du glyphosate

La France est le premier utilisateur de glyphosate en Europe. Du fait de nombreuses critiques sur ses effets sur les plans sanitaire et environnemental, l'utilisation de cet herbicide est remise en cause (voir chapitre 1). Afin d'évaluer les conséquences d'une potentielle interdiction, des études ont été menées sur les surcoûts engendrés par l'arrêt de l'utilisation du glyphosate dans les trois filières agricoles qui en consomment le plus : la grande culture, la viticulture et l'arboriculture.

En grande culture, le glyphosate est principalement utilisé pour la lutte contre les adventices vivaces, les repousses et la destruction de couverts végétaux. Des itinéraires techniques utilisant ou non du glyphosate ont été reconstitués dans plusieurs régions céréalières pour comparer leurs coûts. Sans glyphosate, les surcoûts obtenus varient de + 6,5 €/ha pour les situations en labour fréquent à + 80 €/ha pour les situations en semis direct, très dépendantes du glyphosate. Pour mesurer l'impact à l'échelle des exploitations, ces surcoûts ont été ramenés à l'excédent brut d'exploitation (EBE) : ils sont alors relativement limités pour les exploitations en labour fréquent (autour de 1,5 % de l'EBE), mais impactent beaucoup plus les exploitations en semis direct (de 14 % à 23 % de l'EBE selon les régions). La question de l'arrêt du glyphosate en grande culture est donc intimement liée à celle de l'évolution des stratégies de travail du sol et, indirectement, aux possibilités de valorisation par le marché des systèmes de culture n'ayant pas recours au glyphosate (Carpentier *et al.*, 2020 ; Reboud *et al.*, 2017).

En viticulture, le glyphosate est principalement employé pour désherber en interrang, et surtout sous le rang car cette zone est très difficile à gérer sans herbicide. L'alternative au glyphosate repose principalement sur le désherbage mécanique : les coûts de cette technique ont donc été calculés pour plusieurs modalités de gestion de la vigne (en particulier l'écartement des rangs) et dans plusieurs régions viticoles. En intégrant l'amortissement du matériel nécessaire au désherbage mécanique, le surcoût moyen obtenu s'élève en moyenne à + 210 €/ha pour les vignes larges et à + 408 €/ha pour les vignes étroites, avec des résultats très variables selon les régions viticoles. Ramenés à l'EBE, les surcoûts représentent moins de 5 % de l'EBE dans plusieurs bassins viticoles, autour de 7,5 % en Val de Loire et Languedoc-Roussillon et jusqu'à 11,5 % en Alsace (Jacquet *et al.*, 2019b).

En arboriculture, le glyphosate est aussi utilisé pour désherber sous le rang, c'est-à-dire sous les arbres, là où est souvent déployé le système d'irrigation. Les surcoûts liés au désherbage mécanique varient énormément, selon les données analysées et les espèces cultivées, avec par exemple + 478 €/ha en prunier et + 724 €/ha en pommier. Pour les exploitations arboricoles, cela représenterait entre 6 % et 20 % de l'EBE (Jacquet *et al.*, 2019a).

Pour ces trois filières, les coûts liés à l'arrêt du glyphosate pourraient être compensés par des aides publiques ou par le marché. En particulier, le développement de filières permettant de valoriser les pratiques sans glyphosate pourrait être envisagé, ainsi que le renforcement des politiques de recherche et développement (R&D) pour rendre les solutions alternatives plus compétitives.

Au-delà de l'exploitation agricole : l'ensemble du secteur agricole est dans une situation de verrouillage sociotechnique

Les systèmes de culture actuels se sont développés de manière cohérente avec l'organisation des filières amont et aval, qui se sont également structurées autour des pesticides. L'ensemble des acteurs ont adapté leurs stratégies, et leurs relations aux autres acteurs, à l'utilisation des pesticides, la stratégie de chacun renforçant celle des autres (Guichard *et al.*, 2017). Ceci a alors conduit à un verrouillage du secteur agricole autour de l'utilisation des pesticides (Wilson et Tisdell, 2001). Un système est technologiquement verrouillé lorsque des phénomènes d'auto-renforcement perpétuent les techniques dominantes, ce qui rend difficile les changements vers de nouvelles techniques, même si elles sont potentiellement plus souhaitables (Liebowitz et Margolis, 1995). Ce verrouillage se retrouve tout d'abord en amont des filières : les vendeurs de pesticides sont souvent aussi ceux qui conseillent le plus directement les agriculteurs, et ont donc tout intérêt à proposer des solutions techniques basées sur l'utilisation de pesticides (Pedersen *et al.*, 2019). La séparation vente-conseil, inscrite aujourd'hui dans la loi française, cherche à apporter une réponse à cette situation. Les organismes de développement privilégient aussi le plus souvent un conseil spécialisé qui vise à identifier une solution à un problème précis, autrement dit un pesticide pour un bioagresseur, au lieu de développer une démarche plus systémique qui aborde l'ensemble des problèmes simultanément et propose plusieurs solutions en synergie. Les entreprises de sélection végétale contribuent également à cet auto renforcement en privilégiant le rendement comme principal critère de sélection, produisant ainsi des variétés qui nécessitent d'être protégées par des pesticides pour exprimer leur potentiel de rendement. Ainsi, la diversité génétique est aussi marquée par ce verrouillage 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 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). Certains auteurs considèrent que le verrouillage repose également sur le fait de poser des brevets sur le vivant (Orsi, 2002), mais dans un contexte de certificats d'obtention végétale (COV), ce sont surtout les deux premiers processus qui fonctionnent. De plus, les entreprises de machines agricoles ont investi dans des technologies adaptées aux systèmes de production majoritaires actuellement (Fitzgerald, 2008).

L'aval de la filière est aussi concerné par le verrouillage autour de l'utilisation des pesticides (Lamine *et al.*, 2010). Un des éléments principaux concourant à ce verrouillage est l'absence d'investissements et de filières dédiées pour les cultures de diversification, limitant leur valorisation et donc leur rentabilité pour les agriculteurs (Meynard *et al.*, 2018). Par exemple, dans une coopérative, c'est l'investissement dans des cellules de stockage qui va induire l'importance de remplir ces cellules et rendre difficile la diversification et l'introduction de nouvelles espèces. Au-delà de ce problème, le manque de valeur ajoutée est certainement le facteur le plus important qui limite la mise en œuvre de pratiques avec peu ou pas de pesticides : comme les produits issus de ces pratiques ne sont pas vendus à des prix plus élevés que les produits conventionnels, les agriculteurs ne sont pas incités à les mettre en œuvre.

Un autre exemple concerne les variétés proposées par les entreprises de sélection et les coopératives qui ont été développées principalement pour leur rendement, mais aussi pour optimiser leur utilisation dans des processus de transformation des entreprises agroalimentaires : leur capacité à résister aux bioagresseurs n'est pas incluse dans cette stratégie (Nuijten *et al.*, 2018). Plus en aval, certains circuits de distribution et de commercialisation favorisent également indirectement l'utilisation de pesticides car ils imposent des critères de commercialisation basés sur l'absence de défauts visuels, c'est en particulier le cas dans le secteur des fruits et légumes (Carpentier, 2010).

La recherche agricole est elle-même concernée : la plupart des programmes de recherche visent à produire des innovations qui puissent s'intégrer dans les systèmes agricoles actuels, sans envisager une véritable reconception des systèmes agricoles. Les innovations pour réduire les pesticides sont davantage axées sur des solutions d'optimisation ou de substitution permettant une réduction progressive des pesticides plutôt qu'une reconception des systèmes (Vanloqueren et Baret, 2009). Par exemple, la recherche sur la lutte biologique tend à développer des alternatives aux pesticides qui fonctionnent comme des substituts, mais dont l'efficacité et la généricité sont moindres (Guichard *et al.*, 2017 ; Raymaekers *et al.*, 2020). Depuis quelques années seulement, la recherche accorde assez d'importance aux travaux qui conduiront à des innovations agroécologiques de rupture, permettant à terme une réduction substantielle de l'utilisation des pesticides et ayant des retombées bénéfiques au-delà du périmètre strictement agricole. Le lancement du PPR « Cultiver et Protéger Autrement » s'inscrit dans ce changement. Comme développé dans le chapitre 1, une des raisons sous-jacentes au maintien de l'utilisation des pesticides est la non prise en compte dans les bilans de leurs impacts sur la santé ou l'environnement (Becker, 2017).

À retenir

La dépendance des systèmes agricoles aux pesticides existe à différentes échelles. Premièrement, la simplification des systèmes de culture a rendu l'utilisation des pesticides incontournable, ce phénomène étant renforcé par l'émergence de résistances aux pesticides. Deuxièmement, les pesticides représentent souvent la solution la moins chère pour limiter les pertes de production dans les exploitations agricoles et permettent de limiter les charges de main d'œuvre. Troisièmement, l'ensemble des acteurs des filières ont développé leurs activités de manière cohérente, en se basant sur l'utilisation des pesticides. Ceci a conduit à un verrouillage de l'ensemble du secteur agricole. Par exemple, les entreprises en amont proposent des équipements et des services adaptés à l'utilisation des pesticides, tandis que les entreprises en aval privilégient des variétés adaptées à leurs processus de transformation, mais ne tiennent pas compte de leur sensibilité aux bioagresseurs, et n'offrent pas de débouchés pour les cultures de diversification. Enfin, un manque de création de valeur ajoutée pour des produits sans pesticides n'incite pas les agriculteurs à changer leurs pratiques. Ainsi, atteindre une agriculture sans pesticides ne relève pas seulement d'un changement de pratiques des agriculteurs, mais bien d'une évolution profonde de l'ensemble du secteur agricole.

⏩ Deux stratégies dominantes pour se passer des pesticides mais qui atteignent leurs limites : l'IPM et l'AB

L'IPM : une stratégie globale mais peu appliquée

Le concept d'IPM est apparu dans les années 1950 quand des entomologistes californiens ont proposé de combiner lutte chimique et lutte biologique pour contrôler des pucerons dans des champs de luzerne (Stern *et al.*, 1959). Depuis, ce concept a beaucoup évolué et a été repris dans de nombreux contextes. Il est à présent la pierre angulaire de la politique européenne de réduction des pesticides. Selon la commission européenne, l'IPM implique « un examen attentif de toutes les méthodes de protection des végétaux disponibles résultant en des mesures appropriées qui découragent le développement de populations d'organismes nuisibles et maintiennent l'utilisation des pesticides et d'autres formes d'intervention à des niveaux économiquement et écologiquement justifiés et réduisant ou minimisant les risques pour la santé humaine et l'environnement » (European Commission, 2017). De cette définition générale, découlent différents principes (figure 2.2) :

– la prévention et/ou la suppression des bioagresseurs doit s'appuyer sur un ensemble cohérent de pratiques agronomiques ;

– les bioagresseurs doivent être surveillés par des méthodes et des outils adéquats, intégrant observations de terrain, épidémiosurveillance et conseils de professionnels qualifiés ;

– sur la base des résultats de cette surveillance, l'agriculteur doit décider, ou non, d'appliquer des pesticides en prenant en compte les niveaux de seuil des populations de bioagresseurs ainsi que les conditions climatiques ;

– les méthodes de lutte biologique et physique, ainsi que toute autre méthode non chimique durable, doivent être préférées aux pesticides chimiques si elles permettent une lutte suffisamment efficace contre les bioagresseurs – ces derniers n'étant envisagés que dans une logique de dernier recours ;

– les pesticides appliqués doivent être aussi spécifiques que possible pour le bioagresseur cible et avoir le moins d'effets secondaires sur la santé humaine et l'environnement ;

– l'agriculteur doit limiter l'utilisation des pesticides au strict nécessaire en utilisant des doses et des fréquences réduites afin de limiter le développement de résistance chez les bioagresseurs ;

– lorsque le risque de résistance est avéré mais que la pression des bioagresseurs nécessite une application répétée de pesticides sur les cultures, des stratégies antirésistance doivent être mises en place comme l'utilisation de plusieurs pesticides avec des modes d'action différents ;

– sur la base des registres d'utilisation des pesticides et de la surveillance des bioagresseurs, l'agriculteur doit vérifier le succès des interventions de protection des cultures.

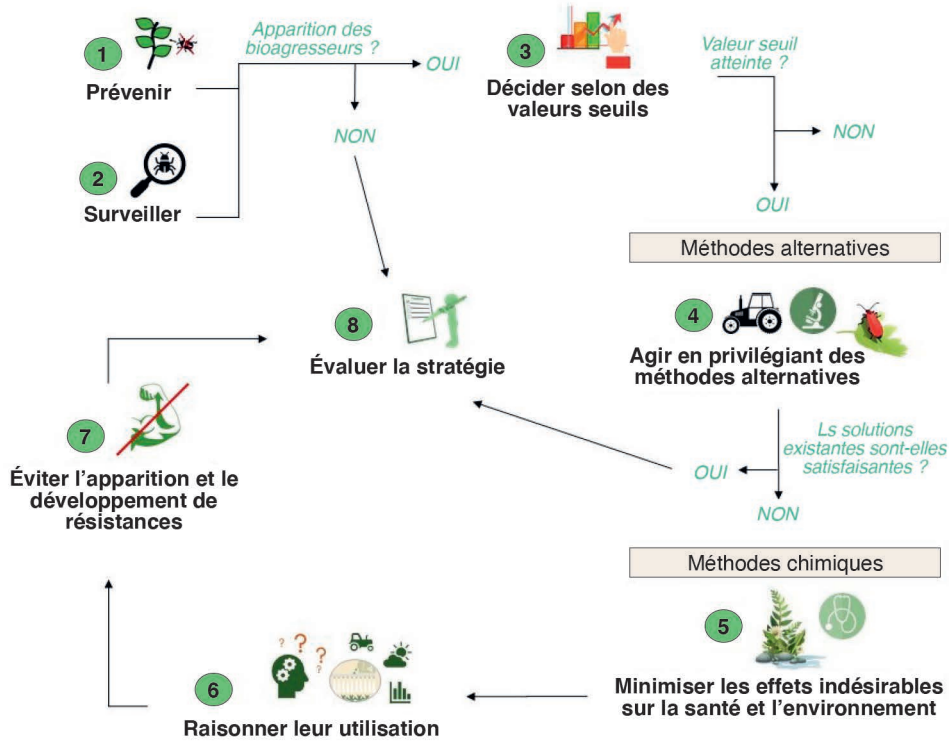

Figure 2.2. Huit principes généraux pour l'IPM (Écophytopic, 2019)

L'objectif de l'IPM n'est pas d'éradiquer les bioagresseurs, mais de les gérer, en maintenant leurs populations en-dessous de niveaux économiquement préjudiciables, tout en limitant au maximum l'utilisation de pesticides (Stenberg, 2017). Pour cela, un ensemble de pratiques est mis en place (tableau 2.1). Elles peuvent avoir une visée prophylactique, c'est-à-dire qu'elles réduisent l'apparition et/ou le développement trop important de bioagresseurs, ou alors une visée curative, en évitant autant que possible l'utilisation de pesticides chimiques. Par exemple, des auxiliaires de culture peuvent être directement introduits dans le milieu afin de réguler les populations de certains bioagresseurs. La prophylaxie combine des actions à l'échelle de la parcelle, et d'autres à l'échelle de l'exploitation. Elle passe en particulier par la mise en place de rotations longues, l'utilisation de techniques de culture appropriées (dates et densités de semis adaptés, travail du sol), le choix de variétés résistantes ou tolérantes aux bioagresseurs, une fertilisation équilibrée, la présence d'éléments fixes du paysages (haies, bandes enherbées, etc.) ainsi que l'ensemble des pratiques favorisant la présence d'auxiliaires de cultures.

Tableau 2.1. Pratiques mises en place dans le cadre de l'IPM dans trois types de production, au sein du réseau DEPHY EXPE (Écophytopic, 2020)

Leviers de gestion	Grandes cultures	Arboriculture	Maraîchage
Action sur le stock, l'inoculum, la population	Labour Faux semis Rotation : cultures étouffantes Rotation : diversification des périodes Rotation : cultures résistantes Gestion des résidus Cultures pièges	Broyage des feuilles Gestion de l'irrigation Suppression des organes	Travail du sol Faux semis Rotation : engrais verts Cultures intermédiaires Solarisation Gestion des résidus Cultures pièges
Évitement	Décalage de la date de semis Organisation paysagère		Décalage de la date de semis/plantation Organisation paysagère
Atténuation en culture	Gestion de la fertilisation Gestion de l'irrigation Densité/écartement du semis Fauches (prairies) Densité et écartement de semis	Aération des arbres Aération des fruits Couvre sol Éclaircissage manuel/taille Égourmandage Gestion girobroyage Maîtrise de la vigueur	Gestion de la fertilisation Gestion de l'irrigation Densité des semis/plantations Paillage/Buttage Buttage Gestion du climat Culture sur substrat
Contrôle génétique	Mélanges variétaux Variétés concurrentielles Variétés résistantes/tolérantes	Diversité variétale/spécifique Porte greffe résistant Variétés résistantes/tolérantes	Variétés résistantes Greffage
Lutte physique	Désherbage mécanique Travail du sol Destruction repousses/adventices	Désherbage mécanique Argile, talc Fauche des drageons Bâche anti-pluie	Désherbage manuel Désherbage mécanique Voile/filet anti-insectes Biofumigation
Lutte biologique	Par conservation	Par conservation Micro organismes Confusion sexuelle Piégeage massif Lâcher inoculatif/inondatif Animaux (volailles)	Micro organismes Phéromones Piégeage de masse Biodésinfection Macro organismes
Lutte chimique	Application localisée de pesticides Réduction des doses de pesticides Utilisation d'OAD Traitement des semences	Application localisée de pesticides Réduction des doses de pesticides Utilisation d'OAD Stimulateurs de défense Phytothérapie	Application localisée de pesticides Utilisation d'OAD Stimulateurs de défense Phytothérapie Substances naturelles

La diversité de pratiques présentées dans le tableau 2.1 peut impliquer des changements plus ou moins importants des systèmes de culture : on peut alors parler d'IPM « faible » ou « forte », en particulier lorsque plusieurs pratiques doivent être associées. Par exemple, la mise en place d'organisations paysagères spécifiques, associées à des rotations plus longues et des mélanges variétaux conduit nécessairement à reconcevoir en profondeur le système de culture et représente alors une IPM forte. En revanche, réduire seulement les doses de pesticides ne remet généralement pas en cause le système de culture dans sa globalité et représente une IPM faible. Cette gradation de l'IPM peut être aussi évaluée en se référant au cadre conceptuel de l'E-S-R (*Efficience-Substitution-Reconception*) (Hill et MacRae, 1996). L'IPM faible reste cantonnée à des pratiques visant à augmenter l'efficacité des pesticides (E), ou à leur substituer d'autres moyens de lutte (S), alors que l'IPM forte suppose la mobilisation de plusieurs pratiques complémentaires, ce qui induit une reconception profonde du système de culture (R). Sans surprise, l'IPM faible est plus facilement plébiscitée par les acteurs agricoles que l'IPM forte. Par ailleurs, mettre en place des pratiques d'IPM ne constitue pas seulement un choix individuel, mais peut nécessiter une certaine coordination à l'échelle des territoires. Par exemple, mettre en place des infrastructures paysagères (haie, jachère) pour favoriser la présence d'auxiliaires suppose une coordination entre agriculteurs pour être efficace (trame verte). De même, le déploiement de la confusion sexuelle[2], en viticulture ou en arboriculture, suppose que ceci soit déployé de façon concertée entre les différents producteurs dans un territoire.

Au sein de l'UE, l'IPM est la pierre angulaire de la politique européenne en matière de réduction des pesticides. La directive européenne 2009/128 CE enjoint les États membres à mettre en place des plans d'action nationaux pour parvenir à « une utilisation des pesticides compatible avec le développement durable ». En France, il s'agit du plan Écophyto dans ses formes successives. Cependant, cette stratégie basée sur l'IPM ne s'est pas avérée efficace à l'échelle européenne : le déploiement de l'IPM est resté relativement limité et les résultats en matière de diminution des pesticides sont faibles. Ce faible impact peut s'expliquer par différents facteurs : (i) une confusion quant à la définition de l'IPM ; (ii) des incohérences entre les concepts, la pratique et les politiques de soutien à l'IPM ; (iii) le manque de compréhension des concepts écologiques qui sous-tendent cette stratégie (Deguine *et al.*, 2021). Par ailleurs, la grande diversité de pratiques associées à l'IPM fait que les agriculteurs n'adoptent que les plus accessibles, et donc potentiellement les moins efficaces en termes de réduction des pesticides (Lefebvre *et al.*, 2015). Ainsi, la mise en œuvre de pratiques incluses dans l'IPM forte est souvent réservée à des agriculteurs innovants, leur déploiement à grande échelle restant encore un défi (Lamichhane et Messéan, 2016). Enfin, la dépendance aux pesticides de l'ensemble du secteur agricole et agroalimentaire, ainsi que la priorité donnée aux solutions de substitution, limitent la diffusion de l'IPM et les potentialités de son amélioration continue.

2. La confusion sexuelle est une méthode de lutte biologique contre les insectes utilisée en arboriculture et viticulture. En diffusant des phéromones sexuelles artificielles, elle permet de réduire la reproduction en brouillant la communication entre les mâles et les femelles.

L'AB : un mode de production créateur de valeur ajoutée mais aux rendements limités

L'AB est apparue en France dans les années 1950, à contre-courant de l'intensification qui avait lieu à l'époque. Des agriculteurs, médecins, chercheurs et citoyens se rassemblent alors pour défendre une « alimentation naturelle » en critiquant les dérives de l'industrie agroalimentaire et agricole (encadré 2.2). Au fil des années, l'AB se structure avec la création de marques commerciales et d'associations de producteurs et de consommateurs, puis avec la mise en place des premiers cahiers des charges techniques au début des années 1970 (Leroux, 2015). Avec la reconnaissance par les pouvoirs publics de ce mode de production, l'AB se développe de manière plus importante dans les années 1980, et connaît un véritable essor depuis 2010. La superficie agricole cultivée en AB a été ainsi multipliée par 10 entre 1998 et 2019, avec une augmentation annuelle moyenne de + 12 % depuis 2010 (figure 2.3). En 2019, la France compte environ 10 % des exploitations en AB, ce qui correspond à 8,3 % de surfaces certifiées, dont une part importante est dédiée aux prairies et cultures fourragères (Agence Bio, 2020).

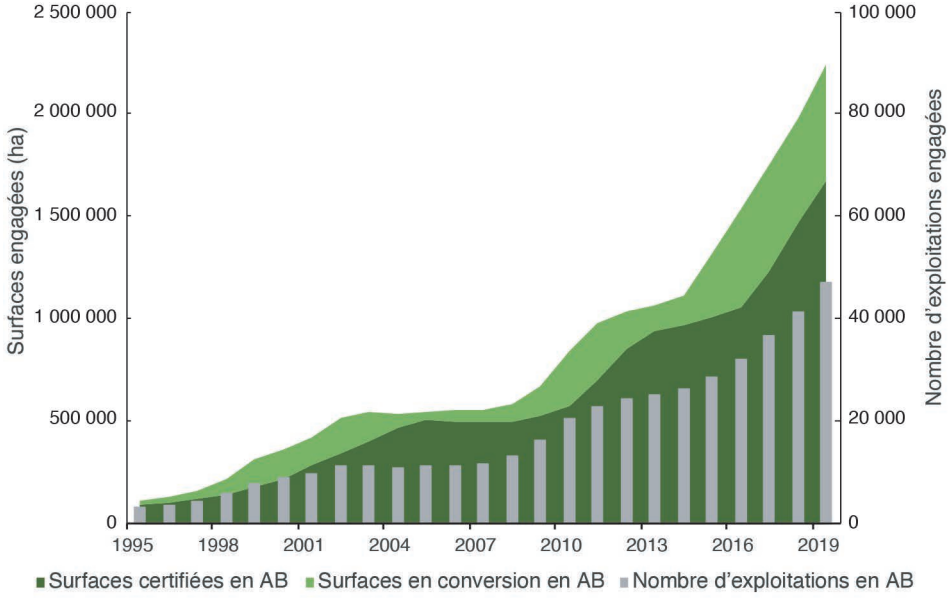

Figure 2.3. Évolution des surfaces et du nombre d'opérateurs engagés dans l'AB en France (1995-2019) (Agence Bio, 2020)

Encadré 2.2. L'AB : d'un courant idéologique à une filière dédiée

Au début du xx^{e} siècle, plusieurs scientifiques et chercheurs européens vont concevoir ce qui se révèlera être les bases techniques et théoriques de l'AB. On peut citer en particulier les travaux de l'allemand Rudolf Steiner sur l'agriculture

…

…

biodynamique, du britannique Albert Howard sur l'*organic farming*, du suisse Hans Peter Rusch, sur le lien entre microorganismes et fertilité du sol ou encore du japonais Masanobu Fukuoka (Besson, 2009). En France, il faut attendre les années 1950 pour que des professionnels ne se reconnaissant pas dans les pratiques agricoles majoritaires reprennent ces idées et défendent une « alimentation naturelle ». Des associations rassemblant médecins, agriculteurs et pharmaciens voient alors le jour pour défendre une alimentation « saine » et une « médecine naturelle », en se basant sur des courants de pensées plutôt traditionalistes, voire réactionnaires. Peu soutenus par leurs pairs, ils se tournent alors vers les réseaux d'agriculture paysanne et biodynamique qui ont émergé à la même époque. Ce choix, qui conduit à refuser une application des technologies modernes, aura des conséquences sur la dynamique d'adoption de l'AB, conduisant à entretenir une certaine défiance des autres agriculteurs et une dimension anecdotique de son développement.

Au début des années 1960, les associations d'agriculteurs et de consommateurs dénonçant les pratiques intensives du secteur agricole et agroalimentaire se multiplient. De cette pluralité, émergent deux principaux mouvements qui influenceront l'histoire de l'AB en France. Tout d'abord, la méthode « Lemaire-Boucher » qui domine le secteur de l'AB jusqu'au milieu des années 1970. Ses fondateurs, Raoul Lemaire et Jean Boucher, développent des engrais et des semences de blés à hauts rendements, et finissent par créer leur marque commerciale derrière laquelle de nombreux agriculteurs vont se réunir. En réaction à cette approche commerciale, le courant « Nature & Progrès » voit le jour en 1964. Plus proche des mouvements sociaux et politiques de la fin des années 1960, cette association accueille de nombreux néo-ruraux et défend les petits producteurs dans une vision anticapitaliste. Dans les années 1970, Nature & Progrès rassemble différents acteurs du secteur agricole et agroalimentaire (producteurs, transformateurs, distributeurs), en intégrant également des consommateurs, et contribue à l'organisation de la filière biologique. Elle crée un premier cahier des charges technique, et sera à l'origine de groupements d'achats de produits biologiques qui permettront aux consommateurs de s'approvisionner à des coûts plus abordables que dans les circuits habituels. L'empreinte de cette association est ainsi déterminante : elle impulse la dynamique fédérative qui va permettre aux agriculteurs biologiques de s'engager dans la voie d'une reconnaissance par les pouvoirs publics qui aura lieu dans les années 1980.

Néanmoins, jusqu'à la fin du XX^{e} siècle, l'AB reste un mouvement marginal aussi bien à travers le nombre d'agriculteurs affiliés que dans les valeurs défendues. Fondé sur une critique du système productiviste, voire du capitalisme, ce mouvement peine à se démocratiser. Sa proximité politique avec l'extrême gauche, ses pratiques parfois perçues comme ésotériques, et sa tendance à sacraliser la nature marginalisent l'AB auprès de la profession agricole. Il faudra attendre les années 2000, et la multiplication des scandales sanitaires, modifiant profondément l'opinion publique quant aux dérives de l'agriculture intensive, pour que l'AB se popularise et devienne plus un mode de production qu'un mode de vie (Leroux, 2015).

L'AB est un mode de production agricole systémique, visant à renforcer la santé de l'agrosystème et à préserver la biodiversité, ainsi qu'à valoriser les cycles géochimiques et l'activité biologique des sols. Son cahier des charges interdit tout intrant chimique de synthèse tel que les engrais minéraux et les pesticides de synthèse, et

limite fortement l'usage des antibiotiques (encadré 2.3). Des traitements fongicides minéraux, et notamment le cuivre, sont utilisés, en particulier en viticulture. L'AB privilégie une approche préventive des besoins des plantes en matière de nutrition et de protection contre les bioagresseurs. Une reconception importante du système de culture lors de la conversion à l'AB est en général nécessaire en incluant des rotations longues et pluriannuelles avec des légumineuses et des couverts végétaux et en épandant des effluents d'élevage (FNAB, 2019). L'AB repose donc traditionnellement sur un système mixte associant culture et élevage (Nowak *et al.*, 2013). Cependant, du fait de la spécialisation des exploitations agricoles et des régions, de nombreuses exploitations biologiques n'ont pas d'atelier d'élevage et doivent donc importer des engrais organiques pour fertiliser leurs cultures si l'apport d'azote par les légumineuses introduites ne suffit pas. La disponibilité en phosphore soluble devient alors rapidement limitante dans les systèmes céréaliers en AB. La protection des cultures, quant à elle, repose largement sur la prophylaxie à travers la rotation des cultures, le travail du sol et la mise en place d'infrastructures paysagères favorisant la présence d'auxiliaires de culture. Les actions mécaniques de lutte contre les différents ravageurs sont également largement pratiquées. La plus faible disponibilité en éléments nutritifs et la difficulté de protection des cultures expliquent les plus faibles rendements observés en AB, avec des réductions moyennes de 20 % (Röös *et al.*, 2018). Ceci explique aussi l'importance des prairies en AB, car d'une part les associations graminées-légumineuses limitent les baisses de rendement et l'incidence des bioagresseurs est faible en prairies, et d'autre part la présence d'animaux est favorable à l'ensemble des cultures en bouclant les cycles des éléments nutritifs.

Encadré 2.3. Principaux éléments du cahier des charges des productions végétales en AB

L'AB est étroitement liée aux cahiers des charges qui lui ont été successivement assignés. Le premier cahier des charges privé est apparu en 1972. En 1980, la France reconnaît officiellement l'AB en tant « qu'agriculture sans produits chimiques de synthèse », puis en homologuant et en harmonisant les différents cahiers des charges existants. En 1991, un règlement européen est mis en place pour les productions végétales conduites en AB, qui est ensuite élargi aux productions animales en 1999. Cette réglementation vient harmoniser les pratiques des différents États membres (INAO, 2016). Le tableau 2.2 récapitule les principaux éléments du cahier des charges de la production végétale biologique (FNAB, 2019).

Tableau 2.2. Les principaux éléments du cahier des charges de la production végétale biologique (FNAB, 2019)

Thème	Contenu du cahier des charges
Conversion	Cultures annuelles (céréales) : 2 ans avant l'ensemencement Pâturages et fourrages pérennes : 2 ans avant l'utilisation en alimentation animale bio Cultures pérennes (vignes, arbres fruitiers) : 3 ans avant la première récolte

…

…

Gestion des sols et fertilisation	La fertilité et l'activité biologique du sol sont préservées et augmentées par : • la rotation des cultures, intégrant légumineuses et engrais verts • l'épandage d'effluents d'élevages ou de matières organiques Si les besoins nutritionnels des végétaux ne sont pas couverts, seuls les engrais organiques et amendements du sol énumérés à l'annexe I du cahier des charges peuvent être utilisés. Ils ne doivent pas être issus d'élevages industriels
Protections phytosanitaires	La prévention des dégâts causés par les bioagresseurs repose principalement sur : • la protection des prédateurs naturels • le choix des espèces et des variétés • la rotation des cultures • les techniques culturales • les procédés thermiques En cas de menace avérée pour une culture, des pesticides peuvent être utilisés à condition que les substances actives soient listées dans l'annexe II du règlement n°889/2008*. Contrairement aux autres matières actives, le cuivre a une limite spécifique de quantité dans le cadre de la réglementation biologique. La dose maximale de cuivre est de 6 kg/ha/an
Semences, et plants	Les semences et plants doivent être issus de l'AB. Lorsqu'ils ne sont pas disponibles en AB, les semences et plants peuvent être achetés : • en priorité, en provenance d'une unité de production en conversion • si cela n'est pas possible, en agriculture conventionnelle (non traités)
OGM	Il est interdit d'utiliser des plantes génétiquement modifiées en AB
Mixité	En principe, l'ensemble d'une exploitation agricole est géré en bio. Toutefois, il est possible d'avoir sur la même exploitation des surfaces en bio et des surfaces en agriculture conventionnelle, à condition de ne cultiver en même temps que des variétés différentes et aisément distinguables.
Contrôle	L'organisme certificateur procède à une inspection sur site (physique et documentaire) au moins une fois par an
Carnet de production végétale	Un carnet de production végétale doit être tenu à jour et disponible. Il comporte en particulier : • les documents attestant la nécessité d'utiliser les intrants dérogatoires • les documents attestant que les produits achetés sont autorisés en AB
Nettoyage	Seuls les produits respectant les critères listés en annexe II du cahier des charges français (CCF) peuvent être utilisés pour le nettoyage et la désinfection des bâtiments et installations de productions végétales

* Journal officiel de l'Union européenne, Règlement (CE) n o 889/2008 de la Commission du 5 septembre 2008 portant modalités d'application du règlement (CE) n o 834/2007 du Conseil relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques en ce qui concerne la production biologique, l'étiquetage et les contrôles, 250 OJ L, (2008) http://data.europa.eu/eli/reg/2008/889/oj/fra

Les performances productives de l'AB sont classiquement évaluées en comparant les rendements des productions biologiques à ceux des productions conventionnelles. De nombreuses études montrent que les productions biologiques sont généralement caractérisées par des rendements inférieurs à ceux des productions conventionnelles, ces différentiels de rendements pouvant être plus ou moins importants selon les cultures et les pratiques mises en place (de Ponti *et al.*, 2012 ; Ponisio *et al.*, 2015 ; Seufert *et al.*, 2012) et en partie découler du choix de variétés plus rustiques. Par ailleurs, les rendements en AB sont plus variables, ce qui augmente les risques pour les agriculteurs (Knapp et van der Heijden, 2018). Malgré ces contraintes, l'AB reste un mode de production rentable pour les agriculteurs du fait des prix de vente plus élevés, qui permettent de compenser les rendements plus faibles. Ces prix de vente élevés découlent d'un consentement à payer important de la part des consommateurs qui considèrent les produits issus de l'AB comme meilleurs pour la santé, plus frais et avec de meilleures qualités organoleptiques (Schleenbecker et Hamm, 2013 ; Wier *et al.*, 2008). La demande pour les produits agricoles et agroalimentaires biologiques s'est fortement accrue ces dernières années : la proportion de consommateurs de produits biologiques dans la population française est passée de 46 % en 2009 à 71 % en 2019 (Agence Bio, 2020). Cette demande croissante permet de conserver des prix de vente élevés pour les produits agricoles biologiques et explique en partie le dynamisme des conversions vers l'AB.

Concernant le différentiel de rentabilité entre exploitations biologiques et conventionnelles, il est difficile de dégager une conclusion générale (Guyomard, 2013). En revanche, l'AB est clairement aujourd'hui le système le plus performant sur le plan économique pour permettre la réduction des pesticides. C'est ce que mettent en évidence les résultats des expérimentations en arboriculture menées dans le réseau DEPHY, qui montrent que la réduction des pesticides entraîne une baisse de rendements dans tous les systèmes, mais qu'elle est compensée par la hausse des prix pour les exploitations en AB (Écophyto Dephy, 2018). Cette capacité de l'AB à permettre de se passer des pesticides tout en dégageant des revenus comparables aux exploitations en agriculture conventionnelle est particulièrement nette dans les filières où la valorisation du produit se fait directement auprès des consommateurs, sans transformation et avec peu d'intermédiaires : viticulture, fruits et légumes et, dans une moindre mesure, viande bovine (Dedieu *et al.*, 2017 ; Grémillet et Fosse, 2020).

L'évaluation des performances de l'AB doit aussi intégrer les externalités qu'elle génère. Par rapport à l'agriculture conventionnelle, l'AB génère davantage d'externalités positives sur la biodiversité (Maeder *et al.,* 2002) et moins d'externalités négatives en termes de pollution (des eaux et des sols) et d'exposition de la population aux résidus de pesticides (Sautereau *et al.,* 2016). Plusieurs questions restent cependant en suspens sur les bénéfices de l'AB et son développement à grande échelle. Le développement de l'AB sur de grandes exploitations en cultures maraîchères sous abri ou en grande culture tel qu'on le constate aujourd'hui, pose la question d'un modèle d'AB « industrialisé », avec un recours important aux intrants extérieurs (comme la fertilisation organique), des dépenses élevées en énergie et, en conséquence, un bilan carbone sans doute défavorable. Par ailleurs, l'utilisation des produits de traitement des cultures autorisés en AB n'est pas non plus sans poser certains problèmes d'impacts environnementaux, le cas du cuivre étant

particulièrement emblématique (encadré 2.4). Enfin, les rendements moins élevés de l'AB conduisent à discuter de la capacité de l'AB à « nourrir le monde ». Sur ce point, la plupart des auteurs s'accordent à dire que l'AB nécessitant plus de surfaces pour produire la même quantité de produits (Seufert *et al.*, 2012), sa généralisation suppose d'adapter l'ensemble du système alimentaire, en consommant moins de produits animaux et en limitant le gaspillage alimentaire (Muller *et al.*, 2017 ; Poux et Aubert, 2019). Enfin, il sera sans doute difficile d'atteindre une part élevée de produits alimentaires biologiques dans la consommation sans augmenter le budget que les consommateurs dédient à l'alimentation, sauf si les habitudes alimentaires changent (moins de produits animaux). Des questions d'équité sociale se posent alors avec la difficulté pour les plus démunis d'accéder aux produits certifiés biologiques.

Encadré 2.4. Les traitements à base de cuivre : le besoin d'alternatives

Le cuivre est traditionnellement utilisé pour prévenir ou traiter certaines maladies fongiques ou bactériennes, principalement en viticulture, arboriculture et cultures légumières. Il est devenu indispensable aux productions conduites en AB car il représente la seule matière active homologuée en AB à effet fongicide fort et avec une gamme d'action large.

Le cuivre est principalement employé sous forme ionique, dans des formulations à base de sels (sulfate ou hydroxyde) combinés à divers adjuvants. La bouillie bordelaise (sulfate de cuivre + chaux) est emblématique de ce type de formulation. Il est généralement utilisé en pulvérisation sur les parties aériennes des plantes, mais peut être également appliqué localement (badigeon sur les plaies des arbres), ou employé en traitement des semences pour les céréales. Le cuivre est ainsi homologué en protection des plantes pour plus de 50 « usages », chacuns définis par une combinaison agent(s) pathogène(s)/culture. Parmi ces usages, trois peuvent être considérés comme majeurs : le mildiou de la vigne, la tavelure du pommier, et le mildiou de la pomme de terre.

L'application répétée de cuivre est la principale source de pollution cuprique des sols agricoles. L'utilisation massive de bouillie bordelaise pour lutter contre le mildiou de la vigne est responsable de teneurs en cuivre très importantes dans les sols viticoles : de 200 mg/kg à 500 mg/kg, voire 1 000 mg/kg pour des sols extrêmement contaminés (Michaud *et al.*, 2007), contre 3 mg/kg à 100 mg/kg dans les sols naturels. L'excès de cuivre dans les sols a des effets délétères sur la plupart des plantes, mais aussi sur la microfaune et la macrofaune du sol (comme les collemboles). Du fait de ces impacts sur l'environnement, des restrictions d'usage ont été mises en place en France et dans la plupart des pays de l'UE : la dose maximale de cuivre métal autorisée est de 4 kg/ha/an. La consommation effective de cuivre, si elle est souvent très inférieure aux doses maximales autorisées, reste tout de même élevée et dépend grandement des conditions climatiques favorables aux agents pathogènes.

Un grand nombre d'études montrent qu'une forte diminution des quantités de cuivre appliquées est néanmoins possible en conservant la fréquence d'utilisation mais en réduisant drastiquement les doses à chaque passage et en améliorant la qualité de la pulvérisation. Ainsi, une protection très satisfaisante vis-à-vis de ces parasites a pu être fournie par l'emploi de 1,5 kg de cuivre métal par hectare et par an, contre 3 kg/ha/an dans la plupart des programmes classiques. Outre

…

…

la réduction des doses et la généralisation des approches prophylactiques en réduisant les sources d'inoculum, des méthodes alternatives au cuivre peuvent être mises en place, comme la protection anti-pluie, le mélange de variétés ou encore des microorganismes antagonistes (Andrivon *et al.*, 2018). Quelques expérimentations pilotes ont permis de montrer que ces systèmes associant plusieurs leviers permettent de se passer totalement de cuivre, mais leur efficacité dépend fortement des caractéristiques génétiques de résistance variétale ou des mesures prophylactiques mises en place. L'adoption de tels systèmes implique donc des ruptures majeures qui requièrent un ajustement important tout au long des filières de production (Andrivon *et al.*, 2018).

Bien que l'AB permette pour l'instant de rémunérer correctement les agriculteurs tout en limitant les externalités négatives liées à l'usage des pesticides, ses plus faibles rendements, les difficultés de maitrise technique, et plus largement les réticences d'un grand nombre d'agriculteurs constituent encore des freins importants à sa généralisation. La troisième voie que nous proposons dans cet ouvrage vise à imaginer, au-delà de l'IPM et de l'AB, une agriculture sans pesticides, fondée sur les principes de l'agroécologie et privilégiant toute la palette des mesures de prophylaxie.

À retenir

Deux stratégies sont actuellement développées dans le cadre de la réduction de l'utilisation des pesticides. D'une part, l'IPM qui vise à gérer les populations de bioagresseurs afin de limiter les pertes économiques tout en réduisant au maximum l'utilisation de pesticides. L'UE a enjoint aux États membres de développer des plans d'action pour déployer l'IPM à grande échelle, ce qui s'est traduit en France par le plan Écophyto. Cependant, cette stratégie ne s'est pas avérée efficace : les agriculteurs ont surtout mis en place les pratiques d'IPM les plus accessibles, relevant plutôt de la substitution des pesticides, sans forcément concevoir de nouveaux systèmes favorisant la prophylaxie. De plus, la difficulté que représente la mise en place de pratiques relevant de l'IPM forte, sans pouvoir les valoriser auprès des consommateurs, explique aussi cet échec. L'autre stratégie efficace pour réduire globalement l'utilisation des pesticides est le développement de l'AB. L'AB interdit tout pesticide chimique de synthèse, ce qui induit automatiquement une diminution de l'utilisation des pesticides lorsqu'une exploitation se convertit à ce mode de production. L'AB nécessite souvent une reconception importante du système de culture afin d'assurer une protection et une nutrition satisfaisante des plantes. Grâce à une réduction des charges d'intrants associé à des prix de commercialisation plus élevés, l'AB représente un mode de production rentable, voire plus rentable que l'agriculture conventionnelle dans certaines productions, comme en viticulture. Néanmoins, ses plus faibles rendements, entraînant des prix plus élevés pour les consommateurs, constituent un frein important pour son développement à grande échelle.

Conclusion

Les systèmes agricoles actuels sont dépendants des pesticides en raison de la concomitance de plusieurs facteurs. La simplification des systèmes de culture associée à l'émergence de résistance chez les bioagresseurs a rendu l'utilisation des pesticides incontournable. Les pesticides permettent de protéger les cultures à un coût relativement faible pour les agriculteurs, tout en limitant la charge de travail. Mais au-delà de l'exploitation agricole, c'est l'ensemble du secteur agricole et agroalimentaire qui s'est structuré autour de l'utilisation des pesticides : les entreprises en amont proposent des équipements et des services adaptés aux systèmes utilisant des pesticides, tandis qu'en aval, peu de filières valorisent les efforts des agriculteurs pour limiter l'usage des pesticides. En particulier, la mise en place de pratiques relevant de l'IPM se heurte au manque de différentiation des produits issus de ce mode de production. *A contrario*, l'AB connaît une forte croissance ces dernières années grâce à une différenciation des produits efficace qui, associée à des charges d'intrants limitées, permet d'assurer une certaine rentabilité. Néanmoins, ce mode de production a des rendements plus faibles que l'agriculture conventionnelle, et certaines impasses techniques subsistent en matière de protection des cultures. Dans ce contexte, nous proposons une troisième voie, au-delà de l'IPM et de l'AB : une agriculture sans pesticides, fondée sur les principes de l'agroécologie et privilégiant la prophylaxie.

Références bibliographiques

Agence Bio, 2020. Les chiffres 2019 du secteur bio.

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

Aubert M., Enjolras G., 2014. The determinants of chemical input use in agriculture: a dynamic analysis of the wine grape–growing sector in France, *Journal of Wine Economics*, 9(1):75-99. https://doi.org/10.1017/jwe.2013.34

Bakker L., Sok J., van der Werf W., Bianchi F.J.J.A., 2021. Kicking the habit: what makes and breaks farmers' intentions to reduce pesticide use?, *Ecological Economics*, 180:106868. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106868

Bakker L., Werf W. van der, Tittonell P.A., Wyckhuys K.A.G., Bianchi F.J.J.A., 2020. Neonicotinoids in global agriculture: evidence for a new pesticide treadmill?, *Ecology and Society*, 25(3):26. https://doi.org/10.5751/ES-11814-250326

Becker, 2017. External costs of food production: environmental and human health costs of pest management, *in Environmental Pest Management: Challenges for Agronomists, Ecologists, Economists and Policymakers*, Hoboken, NJ, États-Unis, John Wiley & Sons, p. 369-384.

Besson Y., 2009. Une histoire d'exigences : philosophie et agrobiologie. L'actualité de la pensée des fondateurs de l'agriculture biologique pour son développement contemporain, *Innovations Agronomiques*, 4 :4329.

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.

Boussemart J.-P., Leleu H., Ojo O., 2013. The spread of pesticide practices among cost-efficient farmers, *Environmental Modeling & Assessment*, 18(5):523-532. https://doi.org/10.1007/s10666-013-9363-5

Carpentier A., 2010. Economie de la production agricole et régulation de l'utilisation des pesticides, une synthèse critique de la littérature. *La réduction des pesticides agricoles enjeux, modalités et conséquences*, Mars 2010, Lyon, France. 41 p. https://hal.inrae.fr/hal-02821066

Carpentier A., Fadhuile A., Roignant M., Blanck M., Reboud X., Jacquet F., Huygue C., 2020. *Alternatives au glyphosate en grandes cultures. Evaluation économique*, Paris, France, INRAE, 161 p. https://doi.org/10.15454/9gv2-3904

Chauvel B., Guillemin J.-P., Colbach N., 2009. Evolution of a herbicide-resistant population of *Alopecurus myosuroides* Huds. in a long-term cropping system experiment, *Crop Protection*, 28(4):343-349. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2008.11.013

Chèze B., David M., Martinet V., 2020. Understanding farmers' reluctance to reduce pesticide use: a choice experiment, *Ecological Economics*, 167:106349. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.06.004

Dedieu M.-S., Lorge A., Louveau O., Marcus V., 2017. *Les exploitations en agriculture biologique : quelles performances économiques ?*, Paris, France, INSEE, 12 p. (coll. Insee Références).

Deguine J.-P., Aubertot J.-N., Flor R.J., Lescourret F., Wyckhuys K.A.G., Ratnadass A., 2021. Integrated pest management: good intentions, hard realities. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 41(3):38. https://doi.org/10.1007/s13593-021-00689-w

Delecourt E., Joannon A., Meynard J.-M., 2019. Work-related information needed by farmers for changing to sustainable cropping practices, *Agronomy for Sustainable Development*, 39(2):28. https://doi.org/10.1007/s13593-019-0571-5

de Ponti T., Rijk B., van Ittersum M.K., 2012. The crop yield gap between organic and conventional agriculture, *Agricultural Systems*, 1081-9. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2011.12.004

Écophyto Dephy, 2018. *Réseau DEPHY EXPE - Arboriculture : Synthèse des résultats à l'échelle nationale*, 64 p.

Écophytopic, 2019. Qu'est-ce que la PIC ?

Écophytopic, 2020. Les ressources produites par le dispositif DEPHY EXPE

European Commission, 2017. Integrated Pest Management (IPM), *Sustainable use of pesticides*.

Fitzgerald D.K., 2008. *Every Farm a Factory: The Industrial Ideal in American Agriculture*, London, UK, Yale University Press, 254 p.

FNAB, 2019. Fiche réglementaire productions végétales, *Produire Bio*.

Forget V., Depeyrot J.-N., Mahé M., Midler E., Hugonnet M., Beaujeu R., … Hérault B., 2019. *Actif'Agri. Transformations des emplois et des activités en agriculture*, Paris, France, Centre d'études et de prospective, Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 245 p. (coll. La Documentation française).

Grémillet A., Fosse J., 2020. *Les performances économiques et environnementales de l'agriculture : les coûts et bénéfices de l'agroécologie*, Paris, France, France Stratégie, 74 p.

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) :14002. https://doi.org/10.1051/cagri/2017004

Guyomard H., 2013. *Vers des agricultures à hautes performances. Volume 1. Analyse des performances de l'agriculture biologique*, Paris, France, INRA, 368 p.

Hill S.B., MacRae R.J., 1996. Conceptual framework for the transition from conventional to sustainable agriculture, *Journal of Sustainable Agriculture*, 7(1):81-87. https://doi.org/10.1300/J064v07n01_07

INAO, 2016. *L'agriculture biologique*, Paris, France, INAO, 2 p.

Jacquet F., Delame N., Reboud X., Huyghe C., Thoueille A., 2019a. *Alternatives au glyphosate en arboriculture. Evaluation économique des pratiques de désherbage*, Paris, France, INRAE, 25 p.

Jacquet F., Delame N., Vita J.L., Reboud X., Huyghe C., 2019b. *Alternatives au glyphosate en viticulture. Evaluation économique des pratiques de désherbage*, Paris, France, INRAE, 25 p. https://doi.org/10.15454/1j9z-3m37

Knapp S., van der Heijden M.G.A., 2018. A global meta-analysis of yield stability in organic and conservation agriculture, *Nature Communications*, 9(1):3632. https://doi.org/10.1038/s41467-018-05956-1

Lamichhane J.R., Messéan A., 2016. *Strategic research agenda for IPM in Europe*, C-IPM, 36 p.

Lamine C., Meynard J.M., Bui S., Messean A., 2010. Réductions d'intrants : des changements techniques, et après ? Effets de verrouillage et voies d'évolution à l'échelle du système agri-alimentaire, *Innovations Agronomiques*, 8121-134. https://hal.inrae.fr/hal-02667368

Lefebvre M., Langrell S.R.H., Gomez-y-Paloma S., 2015. Incentives and policies for integrated pest management in Europe: a review, *Agronomy for Sustainable Development*, 1(35):27-45. https://doi.org/10.1007/s13593-014-0237-2

Leroux B., 2015. L'émergence de l'agriculture biologique en France : 1950-1990, *Pour*, N° 227(3) :59-66. https://doi.org/10.3917/pour.227.0059

Liebowitz S.J., Margolis S.E., 1995. Path dependence, lock-in, and history, *Journal of Law, Economics, & Organization*, 11(1):205-226.

Maeder P., Fliessbach A., Dubois D., Gunst L., Fried P., Niggli U., 2002. Soil fertility and biodiversity in organic farming, *Science*, 296(5573):1694-1697. https://doi.org/10.1126/science.1071148

Meynard J.-M., Charrier F., Fares M., Le Bail M., Magrini M.-B., Charlier A., Messéan A., 2018. Socio-technical lock-in hinders crop diversification in France, *Agronomy for Sustainable Development*, 38(5):54. https://doi.org/10.1007/s13593-018-0535-1

Meynard J.-M., Girardin P., 1991. Produire autrement, *Courrier de la cellule environnement Inra*, 15(15) :1-19.

Michaud A.M., Bravin M.N., Galleguillos M., Hinsinger P., 2007. Copper uptake and phytotoxicity as assessed in situ for durum wheat (Triticum turgidum durum L.) cultivated in Cu-contaminated, former vineyard soils, *Plant and Soil*, 298(1-2):99-111. https://doi.org/10.1007/s11104-007-9343-0

Muller A., Schader C., El-Hage Scialabba N., Brüggemann J., Isensee A., Erb K.-H., *et al*., 2017. Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture, *Nature Communications*, 8(1):1290. https://doi.org/10.1038/s41467-017-01410-w

Nave S., Jacquet F., Jeuffroy M.-H., 2013. Why wheat farmers could reduce chemical inputs: evidence from social, economic, and agronomic analysis, *Agronomy for Sustainable Development*, 33(4):795-807. https://doi.org/10.1007/s13593-013-0144-y

Nowak B., Nesme T., David C., Pellerin S., 2013. Disentangling the drivers of fertilising material inflows in organic farming, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 96(1):79-91. https://doi.org/10.1007/s10705-013-9578-5

Nuijten E., de Wit J., Janmaat L., Schmitt A., Tamm L., Lammerts van Bueren E.T., 2018. Understanding obstacles and opportunities for successful market introduction of crop varieties with resistance against major diseases, *Organic Agriculture*, 8(4):285-299. https://doi.org/10.1007/s13165-017-0192-8

Pedersen A.B., Nielsen H.Ø., Christensen T., Hasler B., 2012. Optimising the effect of policy instruments: a study of farmers' decision rationales and how they match the incentives in Danish pesticide policy, *Journal of Environmental Planning and Management*, 55(8):1094-1110. https://doi.org/10.1080/09640568.2011.636568

Pedersen A.B., Nielsen H.Ø., Christensen T., Ørum J.E., Martinsen L., 2019. Are independent agricultural advisors more oriented towards recommending reduced pesticide use than supplier-affiliated advisors?, *Journal of Environmental Management*, 242507-514. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.091

Ponisio L.C., M'Gonigle L.K., Mace K.C., Palomino J., de Valpine P., Kremen C., 2015. Diversification practices reduce organic to conventional yield gap, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1799):20141396. https://doi.org/10.1098/rspb.2014.1396

Poux X., Aubert P.-M., 2019. *Une Europe agroécologique en 2050 : une agriculture multifonctionnelle pour une alimentation saine*, Paris, France, Iddri-AScA, 78 p.

Raymaekers K., Ponet L., Holtappels D., Berckmans B., Cammue B.P.A., 2020. Screening for novel biocontrol agents applicable in plant disease management – A review, *Biological Control*, 144:104240. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104240

Reboud X., Blanck M., Aubertot J.-N., Jeuffroy M.-H., Munier-Jolain N., Thiollet-Scholtus M., Huyghe C., 2017. *Usages et alternatives au glyphosate dans l'agriculture française. Rapport Inra à la saisine Ref TR507024*, report https://hal.inrae.fr/hal-02788370

Röös E., Mie A., Wivstad M., Salomon E., Johansson B., Gunnarsson S., … Watson C.A., 2018. Risks and opportunities of increasing yields in organic farming. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 38(2):14. https://doi.org/10.1007/s13593-018-0489-3

Sautereau N., Benoit M., Savini I., 2016. *Quantifier et chiffrer économiquement les externalités de l'agriculture biologique*, Paris, France, ITAB, 20 p.

Schleenbecker R., Hamm U., 2013. Consumers' perception of organic product characteristics. A review, *Appetite*, 71:420-429. https://doi.org/10.1016/j.appet.2013.08.020

Seufert V., Ramankutty N., Foley J.A., 2012. Comparing the yields of organic and conventional agriculture, *Nature*, 485(7397):229-232. https://doi.org/10.1038/nature11069

Stallman H.R., James H.S., 2015. Determinants affecting farmers' willingness to cooperate to control pests, *Ecological Economics*, 117:182-192. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.07.006

Stenberg J.A., 2017. A conceptual framework for integrated pest management, *Trends in Plant Science*, 22(9):759-769. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.06.010

Stern V., Smith R., van den Bosch R., Hagen K., 1959. The integration of chemical and biological control of the spotted alfalfa aphid: The integrated control concept, *Hilgardia*, 29(2):81-101.

van der Sluijs J.P., 2020. Insect decline, an emerging global environmental risk, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 46:39-42. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2020.08.012

Vanloqueren G., Baret P.V., 2009. How agricultural research systems shape a technological regime that develops genetic engineering but locks out agroecological innovations, *Research Policy*, 38(6):971-983. https://doi.org/10.1016/j.respol.2009.02.008

Wier M., O'Doherty Jensen K., Andersen L.M., Millock K., 2008. The character of demand in mature organic food markets: Great Britain and Denmark compared, *Food Policy*, 33(5):406-421. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2008.01.002

Wilson C., Tisdell C., 2001. Why farmers continue to use pesticides despite environmental, health and sustainability costs, *Ecological Economics*, 39(3):449-462. https://doi.org/10.1016/S0921-8009(01)00238-5

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 XIXe 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 accroitre 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 XXe 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 pyréthrinoïdes 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'ébourgeonnage[3] pour réduire les pesticides, ou encore le choix de cépages résistants au mildiou et à l'oïdium 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 meilleur 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.

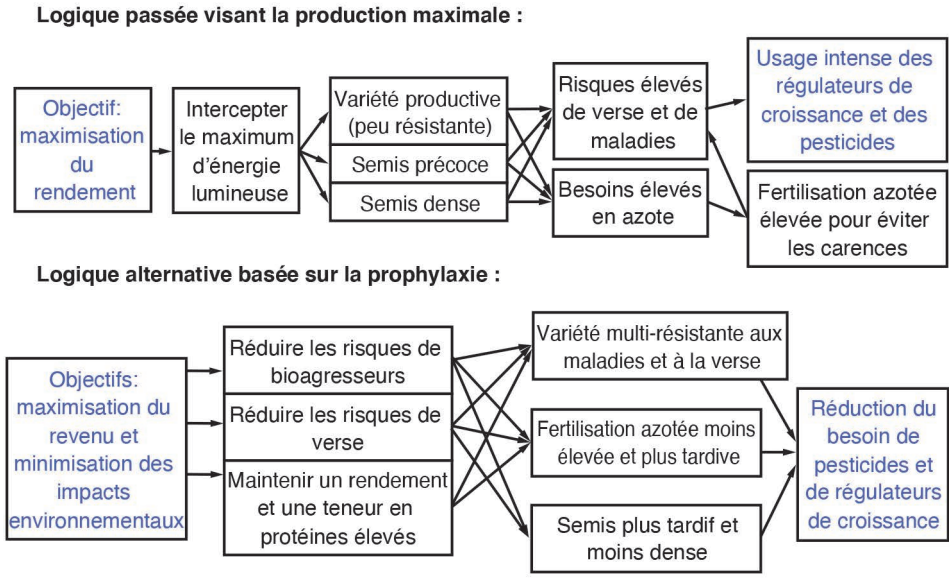

Figure 3.1. Logiques de raisonnement de la conduite de la culture du blé, basées soit sur le recours non limitant aux intrants (logique passée visant la production maximale), soit sur la réduction du recours aux intrants (logique alternative basée sur le recours à la prophylaxie)

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 apparait 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'hibernation (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 chaines 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 (Tscharntke *et al.*, 2021).

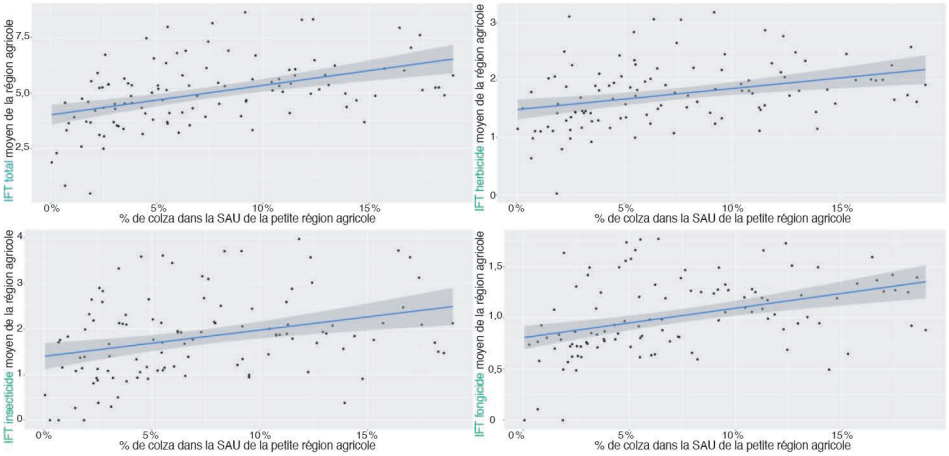

Figure 3.2. Relation entre la proportion de colza dans la SAU par petite région agricole (abscisse) et l'indice de fréquence de traitements phytosanitaires par parcelle de colza (IFT). Sources : SSP – Agreste (2017) et IGN (2021)

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'accroitre 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).

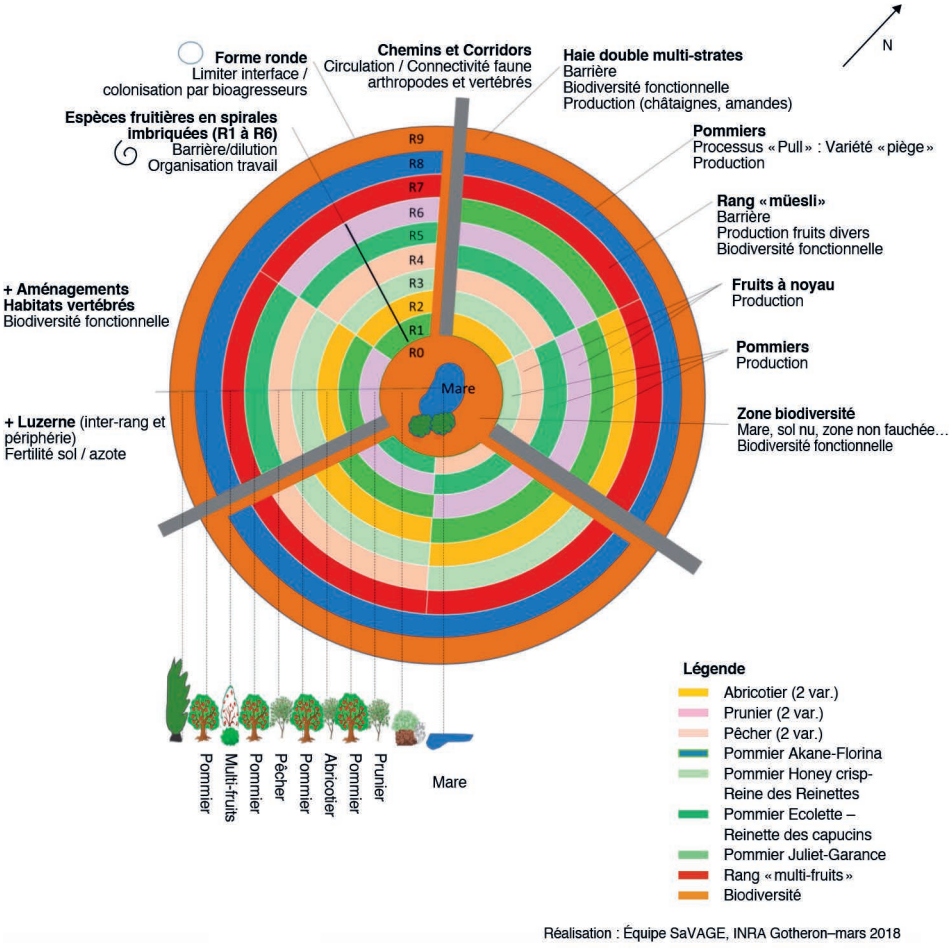

Figure 3.3. Description du verger Z, conçu pour favoriser la régulation des bioagresseurs, implanté depuis 2018 à l'Unité Expérimentale INRAE de Gotheron. L'objectif général a été de créer un espace de production de fruits « suppresseur » vis-à-vis des bioagresseurs, en utilisant la biodiversité et l'agencement 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 pêchers 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'antéprécédente 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 maitrise 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 maitrise 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 décroit 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 (Fernaud *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 (*Alopecurus myosuroides* 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 *splashing* 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 maitriser 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 maitriser 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) accroitre 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 maitrise 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'efficience 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'efficience 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 (res0Pest[4]), 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 apparait 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 GECO[5]. 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 maitriser 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'accroitre 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 agroécologiques très bas intrants, très diversifiés et par nature multi-filières. Pour développer des systèmes sans pesticides, il apparait urgent de revisiter ces organisations, de faire reconnaitre 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

Amossé 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., Hiltpold 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

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

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

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 JL., 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 JM., 2006. Les associations de variétés : accroitre la biodiversité pour mieux maitriser 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-proteger-autrement/Les-Projets/SPECIFICS

INRAE, 2021b. BE-CREATIVE, https://www6.inrae.fr/cultiver-proteger-autrement/Les-Projets/BE-CREATIVE

INRAE, 2021c. VITAE, https://www6.inrae.fr/cultiver-proteger-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

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

Papaïx 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 multicriteria 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 culturales 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 cul- tivars 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

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

Chapitre 4

Le(s) biocontrôle(s) dans une perspective d'agriculture sans pesticides

Thibaut Malausa, Aura Parmentier-Cajaiba,
Marie-Noëlle Brisset, Manuel Boutet

⏩ Biocontrôle : un seul terme pour une diversité de méthodes de protection des cultures

Tour d'horizon des méthodes de biocontrôle

Le terme « biocontrôle » est un néologisme, fréquemment utilisé à partir de 2010 en France et consigné dans la loi 2014-1170 d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt (Herth et Le Maire, 2011). Dans la loi, le biocontrôle est défini comme « des agents et produits utilisant des mécanismes naturels dans le cadre de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures. Ils comprennent en particulier : 1° Les macroorganismes ; 2° Les produits phytopharmaceutiques comprenant des microorganismes, des médiateurs chimiques comme les phéromones et les kairomones et des substances naturelles d'origine végétale, animale ou minérale ». La définition sur le site du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation le présente par ailleurs comme un ensemble de méthodes de protection des végétaux basé sur l'utilisation de mécanismes naturels (ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2021).

Le biocontrôle n'est pas une simple traduction française de l'anglais *biocontrol*. Le périmètre qu'il définit n'a pour ainsi dire pas été formalisé vis-à-vis de références internationales. Cependant, si l'on resitue les méthodes travaillées par la

communauté scientifique et technique française dans le cadre terminologique proposé par Eilenberg *et al.* (2001), le biocontrôle englobe :
– les quatre types de lutte biologique (*biocontrol* en anglais) : lutte biologique par acclimatation, lutte biologique par inondation, lutte biologique par inoculation et lutte biologique par conservation ;
– la lutte autocide ;
– une partie des agents biochimiques (*biochemical agents*).

Le périmètre désigné par ce terme apparemment simple est donc en fait très vaste. Y est incluse tout d'abord l'utilisation des organismes vivants (arthropodes, virus, bactéries, champignons, etc.) de façon directe et indirecte. En termes d'utilisation directe, on parle de lutte biologique par inondation quand l'introduction des organismes bénéfiques (souvent en grande quantité) vise un contrôle court-terme du bioagresseur (par les organismes lâchés eux-mêmes). On parle de lutte biologique par inoculation lorsque l'introduction (souvent plus ciblée et en plus petite quantité) vise un contrôle sur quelques générations ou saisons, et donc un établissement au moins transitoire des populations de l'organisme. Lorsque les organismes de biocontrôle sont exotiques (quand ils sont initialement absents de la zone géographique considérée), et que l'objectif est leur établissement pérenne en vue d'un contrôle à long terme du bioagresseur, c'est la lutte biologique par acclimatation (aussi nommée lutte biologique classique). L'utilisation indirecte des organismes vivants déjà présents dans la zone géographique considérée est la lutte biologique par conservation. Ce type de lutte regroupe l'ensemble des pratiques (plantation de bandes enherbées, haies, mélanges floraux, etc.), méthodes (introduction de ressources additionnelles comme des sucres et pollens, etc.) et même configurations d'un paysage en vue de favoriser la croissance des populations d'organismes ennemis naturels des bioagresseurs. Est aussi incluse implicitement dans le périmètre biocontrôle la lutte autocide. Il s'agit ici d'utiliser des individus de l'espèce du bioagresseur lui-même, en les stérilisant par exemple, pour causer une diminution des densités de ses populations naturelles. L'exemple le plus classique est l'introduction massive de mâles préalablement stérilisés qui entrent en compétition avec les mâles de la population naturelle cible et perturbent donc la reproduction.

Le terme français couvre enfin une large gamme de méthodes basées sur l'utilisation de substances ou molécules d'origine végétale, animale ou minérale, dans une forme existante dans l'environnement naturel (si la molécule utilisée a subi une quelconque modification chimique la rendant différente de son homologue naturelle, alors on ne parle plus de biocontrôle). Ces molécules et substances peuvent être extraites d'organismes vivants ou synthétisées par la chimie (à condition, une fois encore, de rester strictement identiques aux molécules naturellement présentes dans l'environnement). On retrouve parmi ces « substances naturelles » des huiles végétales, des métabolites végétales et animales, des toxines, etc. La spécificité du biocontrôle au sens de la loi française est certainement l'inclusion parmi ces substances des minéraux (le soufre et le phosphate ferrique par exemple), qui différencie fortement le biocontrôle de toutes les définitions de *biocontrol* au niveau international.

Une autre dimension à prendre en compte pour chacune de ces catégories, qu'il s'agisse de macro ou microorganismes, de substances d'origine naturelle ou de médiateurs chimiques, est qu'elles font appel à des modes d'action très divers. Beaucoup

sont destinées à agir directement sur le bioagresseur mais par différents biais : parasitisme (macro ou microorganismes), antibiose (microorganismes), compétition nutritionnelle (microorganismes), toxicité (substances naturelles), barrière physique (substances naturelles), confusion sexuelle (médiateurs chimiques), piégeage (médiateurs chimiques), etc. D'autres, appelées SDP ou stimulateurs de défense des plantes (microorganismes, substances naturelles) sont destinées au contraire à agir sur la culture cible pour activer son immunité et assurer sa propre protection par l'établissement de barrières physiques et chimiques. Enfin, certains produits de biocontrôle cumulent plusieurs modes d'action, par exemple antibiose et effet SDP pour certains microorganismes, ou encore toxicité et effet SDP pour certaines substances naturelles.

Une dernière subtilité de ce terme est conférée par la méthode de création de la liste nationale des produits phytopharmaceutiques reconnus comme biocontrôle en France. Pour établir cette liste, mise à jour régulièrement sous la forme de notes de service du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation[6], 19 mentions de danger (pour la santé, pour l'environnement) sont utilisées comme critères d'exclusion pour les substances candidates. Certains organismes ou substances considérés comme de lutte biologique à l'étranger peuvent donc ne pas être une méthode de biocontrôle en France.

Il est à noter que des méthodes ne reposant pas sur l'usage d'organismes ou de substances naturelles mais ayant les mêmes effets de toxicité ou d'induction de l'immunité, comme les traitements lumineux à spectre particulier ou stress mécanique par exemple, ne font actuellement pas partie du périmètre défini pour le biocontrôle.

Le terme français « biocontrôle » implicitement orienté vers les produits

Dans la loi française et dans les communications des pouvoirs publics comme de la plupart des acteurs privés, le biocontrôle est explicitement présenté comme un ensemble de quatre catégories de produits (macroorganismes, microorganismes, médiateurs chimiques, substances naturelles). Les plans d'action et programmes de financement des pouvoirs publics mettent par ailleurs en avant la mise au point de nouveaux produits et l'essor de l'industrie du biocontrôle (au sens des développeurs et metteurs en marché de produits). Implicitement, les méthodes de biocontrôle sont donc actuellement présentées comme des intrants, avec une tendance à les considérer comme des substituts des produits chimiques de synthèse. Le biocontrôle est quant à lui positionné comme un secteur industriel dont le rôle est proche de celui de l'agrochimie (créer et commercialiser des intrants pour un maximum d'usages), mais diffère par la nature des intrants commercialisés. De nombreux opérateurs industriels du biocontrôle sont également des acteurs de l'agrochimie.

Cette présentation du biocontrôle n'est sans doute pas anodine en termes d'impacts. Tout d'abord, elle ne remet pas en question les systèmes de culture et les organisations des chaînes de valeur actuelles. Ensuite, cette vision focalisée sur les

6. https://info.agriculture.gouv.fr/gedei/site/bo-agri/instruction-2021-549, consulté le 03/08/2021

produits marginalise les autres formes de biocontrôle basées sur des services et sur des actions de régulation à plus ou moins long terme : lutte biologique par conservation, par acclimatation et lutte autocide en particulier. Il est par exemple intéressant de noter qu'après environ 10 ans d'utilisation dans le langage courant, le biocontrôle, sans doute en partie à cause de sa présentation actuelle, a été assimilé par une large partie de la communauté recherche et innovation à une logique de substitution d'une pratique polluante par une autre plus vertueuse (le biocontrôle y est par exemple évoqué de cette manière dans cet ouvrage, dans l'encadré 7.5).

Les réussites remarquables du biocontrôle vont au-delà du succès d'un produit

Cette communication orientée vers les produits de biocontrôle n'est pas du tout dénuée d'intérêts pour la promotion du biocontrôle et elle met en avant une industrie de petite taille (environ 100 à 150 millions d'euros de chiffre d'affaires annuel) mais très active comme en attestent les taux d'augmentation des parts de marché des produits de biocontrôle (supérieurs à 10 % chaque année depuis plusieurs années, encadré 4.1). Cette promotion des produits se traduit aussi dans la pratique avec, par exemple, plus d'un tiers des fiche-actions du dispositif français CEPP (encadré 1.11) qui mobilisent des produits de biocontrôle[7].

Cependant, cette focalisation sur les produits passe sous silence de nombreux succès, originaux ou spectaculaires, qui semblent souvent correspondre à des mises en place de stratégies qui vont au-delà de l'utilisation d'un produit performant ou passent par des voies alternatives n'utilisant pas un produit commercial. En Europe, dans les deux dernières décennies, trois exemples emblématiques peuvent être cités : l'essor du biocontrôle dans les serres dans la plupart des pays européens, des programmes de lutte biologique par acclimatation ayant provoqué l'engouement de filières entières, et des succès collectifs d'implémentation de lutte biologique par conservation.

Encadré 4.1. Le biocontrôle présente un ratio bénéfice/coût extrêmement attractif

Des travaux scientifiques documentent, de façon répétée depuis les années 1990, les taux de succès de développement et les ratios bénéfice/coût/risque extrêmement attractifs des méthodes de biocontrôle. Ces ratios sont meilleurs que ceux des pesticides chimiques, avec notamment des taux de succès de développement nettement supérieurs et des ratios bénéfice/coût similaires ou supérieurs à ceux d'un pesticide chimique (Bale *et al.*, 2008). Pour la lutte biologique par inondation et inoculation (c'est-à-dire les produits de biocontrôle), ce ratio est évalué comme proche (entre 2:1 et 5:1) et il atteint 250:1 dans le cas de la lutte biologique par acclimatation. De plus, les méthodes de biocontrôle présentent de faibles risques d'apparition de résistance chez le bioagresseur, et des impacts nettement plus faibles sur la biodiversité et la santé.

L'intégration réussie du biocontrôle dans les systèmes de protection intégrée sous serre est un exemple emblématique. Cette réussite est souvent présentée comme le

7. https://alim.agriculture.gouv.fr/cepp/content/ap_fiches_action

succès commercial de produits de biocontrôle grâce à des productions à hautes valeurs ajoutées et à la facilité de contrôle des milieux confinés. Si ces deux facteurs favorisent bien évidemment l'utilisation du biocontrôle, il est remarquable d'observer à quel point cette intégration repose en fait sur des combinaisons de variétés résistantes, de prophylaxie (via le contrôle du climat notamment) et de biocontrôle (combinant inondation, inoculation et conservation). Cette intégration est également associée à une expertise croissante des agriculteurs sur l'utilisation des organismes vivants et une forte propension des acteurs industriels du biocontrôle à implicitement accompagner leurs produits par des services de conseil quasiment personnalisés. L'essor du biocontrôle sous serre a par ailleurs été accéléré par des scandales sanitaires liés à l'utilisation des pesticides en milieu confiné ou à la présence de résidus de pesticides dans les fruits et légumes. Ces événements ont constitué des chocs pour les acteurs et ont entraîné des arrêts d'utilisation de pesticides, volontaires ou imposés par la loi. Ils ont amené des changements de pratique massifs, parfois sur des pas de temps courts, et motivé un fort investissement R&D. C'est par exemple ce qui a été observé dans les cultures sous serre dans le sud de l'Espagne, où les surfaces d'utilisation du biocontrôle ont augmenté de 1 400 hectares en 2007 à 26 000 hectares en 2014, suite à un scandale après la détection de résidus d'un pesticide interdit en Europe dans divers légumes en 2006 (Glass, 2012 ; Sanchez *et al.*, 2014).

Le deuxième exemple est le potentiel de la lutte biologique par acclimatation dans des filières où l'espace phytosanitaire est peu occupé par les pesticides chimiques. Cette stratégie diffère grandement des pratiques d'utilisation d'intrants sous forme de produits. Alors qu'un intrant classique fonctionne avec un investissement R&D initial massif suivi d'une utilisation récurrente commerciale (rémunérant l'industriel du biocontrôle et représentant un coût récurrent pour l'agriculteur), la lutte biologique par acclimatation correspond à un investissement R&D initial plus modeste qui fait place, après l'établissement de l'auxiliaire introduit, à un service pérenne et gratuit pour l'agriculteur, qui peut aller jusqu'à une régulation dispensant de toute pratique de protection phytosanitaire sur le long terme. Un exemple de tel succès récent en France est l'acclimatation du parasitoïde asiatique *Torymus sinensis* contre le cynips du châtaignier, une espèce envahissante menaçant la filière entière en Europe. Signalée en 2007 en France et touchant des zones clés de production castanéicole à partir de 2010, cette invasion biologique a fait l'objet d'un programme d'acclimatation débuté en 2011. En quelques années, ce programme, qui a fortement mobilisé les acteurs des filières concernées, a permis un établissement de l'auxiliaire introduit dans 80 % des sites de lâcher et une diminution drastique des infestations par le ravageur (Borowiec *et al.*, 2018). Autre différence majeure par rapport à une utilisation classique d'intrants : la structure du risque pris par les acteurs. Les attentes vis-à-vis d'un intrant classique est une efficacité répétée et la plus constante possible dans le temps, avec un risque récurrent mais modéré. Au contraire, la lutte biologique par acclimatation se caractérise par une haute prise de risque initiale : la probabilité d'un contrôle satisfaisant du bioagresseur après une acclimatation est seulement de 10 % (Kenis *et al.*, 2017), mais ces 10 % constituent le plus souvent des *success stories* significatives pour des filières entières.

Le troisième exemple est une preuve de concept du potentiel de la mise en œuvre de stratégies collectives de lutte biologique par conservation. Aux Pays-Bas, dans le sud

de Rotterdam, un projet a été initié en 2004 par un collectif d'agriculteurs avec des équipes de recherche, pour mettre en place des bandes fleuries et évaluer leur impact, sur un territoire d'environ 325 kilomètres carrés (Alebeek et Clevering, 2005 ; Paulin *et al.*, 2020). Une réduction de 90 % de l'utilisation d'insecticides dans les cultures de pommes de terre et de blé a été atteinte et a pu être maintenue. Dans certaines cultures (par exemple les féveroles), des bénéfices de rendement ont également été établis. Une fois le projet de cinq ans terminé, les agriculteurs participants ont poursuivi et élargi l'initiative en fondant une coopérative : la Coöperatie Collectief Hoeksche Waard (CCHW). Actuellement, 84 agriculteurs ont rejoint la coopérative et ont mis en place 500 kilomètres de marges fleuries. L'initiative implique également les pouvoirs publics locaux et l'office du tourisme, qui utilisent les bandes fleuries pour promouvoir la région (notamment via la création de pistes cyclables proches des bandes). Cet exemple représente un succès majeur à une échelle géographique, certes locale, mais significative en termes de surfaces impliquées et d'importance économique. Pourtant, il est peu connu au niveau international – ces résultats sont mentionnés dans la littérature scientifique (Steingröver *et al.*, 2010 ; Paulin *et al.*, 2020) et le projet initial a fait l'objet d'un rapport en néerlandais (Alebeek et Clevering, 2005) – et n'a vraisemblablement pas pu être largement utilisé comme une preuve de concept au niveau européen. Cette situation illustre à la fois le potentiel et les difficultés de diffusion de la lutte biologique par conservation. Les initiatives mobilisant ces stratégies ne sont pas forcément nommées et valorisées en tant que telles, elles sont souvent initiées par une diversité d'acteurs locaux, et leur extrapolation géographique est rarement un objectif initial ou repris par d'autres initiatives.

⏩ Les modèles agricoles dominants influencent les pratiques et recherches dans le domaine du biocontrôle

Les systèmes de culture dominants sont défavorables au biocontrôle

Comme exposé dans le chapitre 1, les modèles agricoles dominants sont le résultat de plusieurs décennies d'investissement pour optimiser des systèmes de culture simplifiés dont la robustesse s'appuie principalement sur des variétés à haut rendement et des pesticides à large spectre d'action. Ceci, et le fait que le biocontrôle est actuellement principalement vu comme un substitut ou un complément aux pesticides, verrouillent le biocontrôle dans un cadre directement hérité de l'agrochimie : dans l'immense majorité des cas, pouvoirs publics, investisseurs privés et utilisateurs formulent, de façon explicite ou implicite, des attentes correspondant aux références de la chimie. Dans cette vision, une industrie en amont des filières, dynamique et créatrice d'emplois, doit développer et commercialiser des intrants, dont la distribution et le conseil peuvent être organisés par les acteurs existants. Ces intrants doivent être disponibles contre chacun des bioagresseurs pouvant poser problème, être utilisés de manière indépendante les uns des autres et présenter une efficacité curative visible à relativement court terme. Ils doivent également présenter un coût le plus proche possible d'un pesticide chimique et être préférablement utilisables

au champ avec des agroéquipements initialement adaptés pour la chimie. Or, ces attentes sont peu compatibles avec la majeure partie des méthodes de biocontrôle.

En premier lieu, plusieurs types de méthodes ne sont pas des intrants commercialisés de façon récurrente via des distributeurs (comme la lutte biologique par conservation et acclimatation), ce qui induit une véritable marginalisation de ces méthodes. En effet, malgré le rapport bénéfice/coût très favorable des programmes de lutte biologique par acclimatation (ratio médian de 63:1 d'après Naranjo *et al.* (2019) pour le contrôle des arthropodes) et les niveaux de bénéfices à l'hectare de la lutte biologique par conservation (bénéfice médian de 86 dollars par hectare d'après Naranjo *et al.* (2019)), ces stratégies font l'objet de très peu d'investissements publics et privés. Ceci s'explique probablement par les critères actuellement utilisés pour évaluer la pertinence des investissements : chiffre d'affaires lié à un produit, création de richesse et d'emplois dans le secteur industriel développant et commercialisant le produit, efficacité à court terme dudit produit contre un bioagresseur particulier, etc. Par ailleurs, comme nous le verrons à la section suivante (p. 127), ces stratégies ne font pas ou peu l'objet d'organisations d'acteurs et de modèles d'affaires adaptés.

Ensuite, certaines méthodes, bien que mettant en jeu des organismes ou substances introduits de façon répétée dans l'agrosystème cible (et pouvant être considérées comme une utilisation d'intrants), diffèrent profondément des intrants chimiques en termes de conditions d'utilisation. C'est le cas par exemple de l'utilisation des médiateurs chimiques pour la confusion sexuelle ou la lutte autocide utilisant des mâles stériles. Ces deux méthodes nécessitent notamment la coordination d'un nombre plus ou moins grand d'exploitations agricoles présentes sur la zone géographique hébergeant la majeure partie de la population de bioagresseurs, sous peine de voir leur efficacité diminuer drastiquement. En effet, ces méthodes reposent sur la perturbation de la reproduction (dans le premier cas, les ravageurs mâles n'arrivent plus à se diriger vers les femelles et dans le second ils sont stériles et ne peuvent pas féconder les femelles avec lesquelles ils s'accouplent). Si seule une partie de la population fait l'objet du contrôle et que les femelles de l'espèce cible sont suffisamment mobiles, alors des femelles fécondées dans des zones non couvertes pourront se disperser vers les zones couvertes et infester les cultures s'y trouvant. Une utilisation efficace de ces méthodes nécessite donc une activité de coordination et de gestion sur plusieurs saisons des populations de bioagresseurs. Or ce service n'est que peu ou pas demandé, proposé ou assuré par les différents acteurs des systèmes agricoles actuellement dominants et utilisant des intrants chimiques. Un autre exemple est l'utilisation des SDP, que ces derniers soient des microorganismes ou des substances naturelles. Les modèles agricoles dominants ont essentiellement considéré la plante comme un partenaire passif en protection des cultures, cette dernière étant assurée efficacement par les pesticides. Or, les SDP placent la plante en acteur central et actif, mais l'environnement, qu'il s'agisse du climat ou de certaines pratiques culturales (fertilisation, biostimulation, régulateurs de croissance, irrigation), agit sur l'état physiologique de celle-ci et conditionne la réussite de l'induction de l'immunité. L'efficacité des SDP restera décevante et leur utilisation marginale tant que les interactions variées ne seront pas clairement comprises puis considérées dans l'application pratique de cette méthode de biocontrôle.

L'incompatibilité entre les attentes influencées par les systèmes dominants et le biocontrôle s'observe également sur un autre plan pour la plupart des méthodes de biocontrôle reposant sur une utilisation relativement classique sous forme d'intrants (substances ou organismes). Un intérêt majeur de ces méthodes est leur innocuité ou leur impact extrêmement faible sur l'environnement et la santé. Ces propriétés, qui les différencient positivement des pesticides chimiques, reposent souvent sur le fait que ces organismes ou substances sont moins biocides et toxiques pour les êtres vivants et qu'ils sont également moins rémanents dans l'environnement. Or, la forte activité biocide et la rémanence sont des propriétés clés des intrants attendus dans les systèmes agricoles dominants : c'est ce qui leur permet de contrôler un large spectre de bioagresseurs sur une période relativement longue (à tel point que malgré leur vocation curative ces intrants sont utilisés à titre préventif). Attendre une substitution poste pour poste des pesticides par des méthodes de biocontrôle est donc en général un non-sens : d'un point de vue technique comme financier, un seul produit à large spectre et à activité rémanente ne peut pas être remplacé par une multitude de méthodes contrôlant chacune un ou quelques bioagresseurs et devant être utilisées de façon répétée dans le temps. L'utilisation des modes d'action de biocontrôle requiert donc l'usage de méthodes prophylactiques (variétés résistantes, pratiques agronomiques) permettant de diminuer le nombre de problèmes phytosanitaires à gérer simultanément et un niveau de régulation biologique naturelle suffisamment élevé pour ne pas rendre indispensable l'utilisation d'intrants à haut pouvoir curatif. Or, l'utilisation de pesticides chimiques dans un système, à moins qu'elle ne soit extrêmement ciblée (ce qui n'est généralement pas le cas dans les systèmes dominants aujourd'hui en France, en Europe et dans de nombreux pays avec une agriculture à forte mobilisation d'intrants) invalide le plus souvent ces deux conditions de succès de façon directe (la présence de biocides rémanents détruit ou déséquilibre les communautés responsables de la régulation biologique des bioagresseurs) ou indirecte (l'usage de pesticides chimiques rend peu prioritaire le choix de variétés résistantes ou de pratiques agronomiques à vocation prophylactique). C'est aussi pour cette raison que l'utilisation du biocontrôle comme un complément aux pesticides chimiques (pour diminuer les doses ou éviter des résidus en fin de saison) ne développe que très marginalement (et tend même plutôt à bloquer) l'utilisation du biocontrôle dans les systèmes agricoles.

Les caractéristiques et l'organisation des acteurs de la chaîne de valeur créent aussi un effet de verrouillage. De solides expertises, savoir-faire et expériences sur les intrants de type chimique sont établis chez les acteurs de la logistique, de la distribution et du conseil. Les attentes actuelles configurées autour d'une vision du biocontrôle de type « produits » obligent implicitement le biocontrôle à se conformer aux standards de logistique, distribution et conseil en vigueur dans les systèmes fondés sur l'utilisation des pesticides. En conséquence, le biocontrôle est très clairement défavorisé car il nécessite des organisations, services, connaissances et équipements différents (et variables selon les types de biocontrôle et leur mode d'action). Cette situation se traduit en pratique par une augmentation des coûts du biocontrôle et une impression d'efficience inférieure, qui conduisent les acteurs actuels du conseil et la distribution à ne proposer que marginalement les méthodes de biocontrôle et préférer des substances anciennement disponibles et récemment reclassées comme produits de biocontrôle dans la loi française (Villemaine *et al.*, 2021).

Les facteurs précédemment cités sont probablement à la base du plafond de verre que les méthodes de biocontrôle ne parviennent pas à dépasser en termes de surfaces d'utilisation ou de taille de marché. En France par exemple, en dehors du soufre qui correspond à un cas très particulier (il s'agit d'un intrant historiquement largement utilisé qui, à l'échelle internationale, n'est pas considéré comme de la lutte biologique mais fait partie des produits de biocontrôle au sens de la loi française), les méthodes de biocontrôle les plus connues (par exemple l'utilisation de *Trichogramma brassicae* contre la pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*), de la confusion sexuelle contre la tordeuse de la vigne (*Lobesia botrana*), le carpocapse du pommier (*Cydia pomonella*) ou encore la carpovirusine contre ce même carpocapse) plafonnent autour de 100 000 hectares (d'après les données communiquées en 2019 par les industriels du biocontrôle, https://www.ibmafrance.com/ibma-france/).

La recherche et l'innovation inhibées et orientées par le cadre imposé par les systèmes utilisant des pesticides

Ce plafond de verre, observé en France comme à l'étranger (Barratt *et al.*, 2018 ; van Lenteren, 2012 ; van Lenteren *et al.*, 2018), est symptomatique du verrouillage de l'essor du biocontrôle par les systèmes dominants. D'un point de vue technique, un investissement en recherche et innovation peut permettre de le dépasser en améliorant l'état de l'art scientifique et technique sur une série de besoins clés (par exemple : amélioration des formulations ou caractéristiques des substances ou organismes, des méthodes d'introduction ou d'épandage au champ, expertise et outils pour les positionner dans le temps et dans l'espace, outils pour coordonner les acteurs dans le cas des médiateurs chimiques et de la technique de l'insecte stérile, etc.). Cependant, cet investissement (substantiel) n'est pas consenti, et ce pour des raisons économiques logiques. La probabilité d'investissement privé dépend en effet de la présence de marchés et donc de besoins insatisfaits. Or, en présence de systèmes basés sur les pesticides chimiques, les besoins insatisfaits sont incertains : ils sont souvent formulés en prévision d'un retrait de substance active (la décision de retrait est d'ailleurs souvent conditionnée à l'existence de solutions alternatives, dont le développement est lui-même inhibé par la position dominante de la substance active à retirer). Par ailleurs, lorsque le besoin insatisfait est réel, les surfaces agricoles concernées et les marchés correspondants paraissent dans la plupart des cas plafonnés à des valeurs relativement limitées. Quant à l'investissement public sur l'innovation, il a souvent été fixé de façon proportionnelle à l'investissement privé, par exemple via les systèmes de financement comme le crédit d'impôt recherche, la banque publique d'investissement, de partenariat public-privé, etc. De plus, la structure du marché (prédominance de besoins exprimés en matière de produits sur le modèle chimique) et les modalités de financement orientent les investissements vers une logique de développement industriel de produits de type intrants et des modèles d'affaires correspondants.

La logique actuelle de soutien du biocontrôle, centrée sur le développement industriel de produits, présente donc des limites intrinsèques car elle s'enferme dans un cercle vicieux : les petits marchés limitent l'investissement et l'investissement insuffisant limite le développement et les capacités d'utilisation des produits, ce qui

plafonne les tailles de marché, etc. Les problèmes spontanément exprimés par les acteurs développant des produits, – le manque de soutien financier à la R&D d'une part (qui ont par exemple abouti à une demande d'augmentation du crédit d'impôt recherche pour la recherche et développement sur le biocontrôle[8]), et la longueur et le coût des procédures d'autorisation de mise sur le marché d'autre part – sont certes tout à fait légitimes et constituent des barrières à court terme, mais ils traduisent surtout les effets des systèmes agricoles dominants qui plafonnent les tailles de marché et l'investissement. En effet, si les perspectives de marché étaient beaucoup plus attractives, l'investissement serait supérieur et permettrait des projets de R&D plus ambitieux et intégrant les coûts d'autorisation de mise sur le marché.

Sans déprécier l'industrie actuelle du biocontrôle, à l'origine de nouvelles solutions utiles aux agriculteurs et qu'il convient de continuer à soutenir avec les dispositifs existants, il paraît par ailleurs opportun et important de diversifier les angles d'approches pour assurer l'essor du biocontrôle et trouver en particulier des modalités d'action pour tirer profit des stratégies de biocontrôle, qui ne bénéficient pas encore de dispositifs de soutien adaptés et ne sont pas encore stabilisés en termes de modèles d'affaires.

À retenir

Les systèmes agricoles dominants, construits autour des pesticides, sont défavorables à l'essor du biocontrôle à plusieurs titres. Ils imposent des attentes qui sont incompatibles avec les caractéristiques de la plupart des stratégies de biocontrôle : (i) les acteurs sont organisés pour produire, distribuer et utiliser des intrants, alors qu'une partie du biocontrôle ne correspond pas à des intrants (lutte biologique par conservation, acclimatation), (ii) la logistique et les agroéquipements optimisés pour les pesticides et via lesquels les produits de biocontrôle doivent transiter ne sont pas adaptés aux caractéristiques de ces derniers (organismes vivants, formulations différentes, substances volatiles, etc.), (iii) la faiblesse des méthodes assurant prophylaxie et régulations naturelles rend quasiment indispensable l'utilisation de méthodes à fort pouvoir biocide, à large spectre et à forte rémanence, ce qui va à l'encontre du biocontrôle dont l'intérêt est précisément d'être à l'opposé pour être plus respectueux de l'environnement et de la santé. De plus, les acteurs actuels du biocontrôle, tout comme les pouvoirs publics, renforcent aujourd'hui malgré eux ce blocage en mettant en avant et en soutenant l'essor d'une industrie du biocontrôle développant et commercialisant des produits en s'inspirant très fortement du modèle des pesticides (R&D et financement de la R&D, production, distribution, conseil, etc.). Ce constat pessimiste est toutefois à contrebalancer par les nombreuses perspectives positives qui se présentent actuellement. D'une part, les nombreuses possibilités scientifiques et techniques (formulation, agroéquipements, outils de diagnostic et de prédiction pour l'aide au positionnement, etc.) peuvent permettre de mieux développer et positionner les produits de biocontrôle. D'autre part, inventer de nouvelles organisations et secteurs d'activités pourrait permettre de pleinement exploiter le potentiel des stratégies de biocontrôle qui sont actuellement à la base de

8. https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/amendements_alt/3360C/AN/429

nombreux succès (lutte biologique par conservation, par acclimatation, déploiement collectif de médiateurs chimiques et luttes autocides, etc.) mais font l'objet d'investissements privés et publics très bas et sont sous-utilisées. Dans ce contexte, fixer un cadre de réflexion « sans pesticides » apparaît donc comme un excellent moyen de stimuler l'innovation (technique, organisationnelle) pour plus de diversification et de déploiement du biocontrôle.

⏩ Quelles priorités de recherche et innovation favorisées par un cap zéro pesticide ?

Outre la potentielle redirection d'efforts humains et financiers de la chimie vers les leviers de l'agroécologie, l'ambition zéro pesticide donne l'opportunité de réfléchir à des organisations de filières, de territoires et des systèmes de culture plus favorables au biocontrôle et ouvrant sur une diversité de modèles d'affaires valorisant l'ensemble du panel de types de stratégies basées sur des mécanismes naturels.

On peut distinguer deux grands types de priorités de recherche et innovation qui devraient ainsi être renforcés : des recherches d'amont et premières preuves de concept dans des domaines émergents et prometteurs ; des recherches portant sur des techniques ou concepts déjà relativement mûrs mais dont l'efficacité et le déploiement peuvent être largement améliorés.

L'étude et la gestion du microbiome, une voie majeure d'innovation

Parmi les domaines particulièrement prometteurs pour le champ d'application du biocontrôle figure la compréhension et la gestion du microbiome des plantes. Ces dernières hébergent en effet une diversité de microorganismes (archées, champignons filamenteux, eubactéries, oomycètes, protistes, virus) en leur sein ou à leur surface (racines, feuilles, fleurs, fruits, graines, etc.). Ces microorganismes interagissent entre eux et avec leur environnement, et peuvent impacter directement ou indirectement la plante, en modifiant ses réponses aux stress biotiques et abiotiques ainsi qu'en agissant sur les bioagresseurs (Barret *et al.*, 2020). Les applications possibles des recherches sur le microbiome en matière de biocontrôle sont citées depuis plusieurs années dans la littérature scientifique (Massart *et al.*, 2015). Elles provoquent un engouement car elles ouvrent toutes sortes de pistes allant de l'identification d'antagonistes des bioagresseurs (susceptibles de devenir des produits utilisés sous forme de lutte biologique par inoculation ou inondation), jusqu'à des stratégies de gestion d'un microbiome bénéfique via différents moyens (pratiques agronomiques, choix des variétés d'espèces cultivées et non-cultivées, soit une forme de lutte biologique par conservation utilisant des microorganismes). Dans le contexte français, deux projets récents témoignent de cet intérêt. En 2019, le consortium public-privé recherche-développement-innovation sur le biocontrôle a impulsé le lancement du projet BCMicrobiome[9] dont l'objectif est de concevoir et

9. www.consortium-biocontrole.fr

utiliser des méthodes d'inférence des réseaux d'interactions des microorganismes autour de deux pathogènes majeurs (le mildiou de la vigne et la septoriose du blé), et ainsi identifier des organismes les influençant directement ou indirectement. Le PPR « Cultiver et Protéger Autrement » a par ailleurs fortement soutenu les recherches dans ce domaine, avec deux larges projets. Le premier, DEEP IMPACT (encadré 4.2), propose une approche globale pour caractériser le rôle des microbiotes sur la résistance du colza et du blé à leurs bioagresseurs.

Encadré 4.2. Le projet de recherche DEEP IMPACT : analyse des interactions plante-microbiote pour promouvoir la défense des plantes aux bioagresseurs (PPR CPA – 2020/2026)

Des résultats prometteurs montrent que la diversité inexploitée du microbiote du sol peut influencer la tolérance/résistance des plantes à des ravageurs. L'agriculture moderne doit donc relever le défi de concevoir une nouvelle génération de solutions agroécologiques permettant d'accroître la résistance des plantes aux stress biotiques grâce à la valorisation des interactions plante-microbiote. Cependant, la conception de microbiote synthétique spécifique de plante nécessite une meilleure compréhension des mécanismes sous-jacents aux interactions du microbiote de plante dans un contexte écologique réaliste. Dans ce cadre, le projet DEEP IMPACT vise à combiner l'écologie, la biologie, la génétique des plantes et les biostatistiques pour identifier, caractériser et valider les communautés microbiennes, les communautés végétales et les pratiques agricoles modulant la résistance du colza et du blé à plusieurs parasites. À terme, une combinaison d'espèces microbiennes et de sols corrélée à une meilleure résistance des cultures aux bioagresseurs sera identifiée. DEEP IMPACT étudiera également le rôle potentiel d'espèces de plantes auxiliaires dans la modulation de la résistance des cultures aux ravageurs en agissant indirectement sur le microbiote du sol. Ces différents travaux permettront la mise en place de pratiques agricoles durables basées sur le microbiote de plante afin de réduire l'utilisation de pesticides en milieu agricole (INRAE, 2021).

Le second, SUCSEED, portant sur les stratégies de protection des plantes via la gestion des semences (encadré 5.7), explore notamment le cas spécifique de la gestion du microbiote des semences. Le microbiote des graines est en effet la source primaire du microbiote de la future plante et est susceptible d'influencer son développement et sa santé (Shade *et al.*, 2017). À ce titre, les graines sont à la fois des cibles pour le biocontrôle, mais également des vecteurs permettant d'acheminer des substances et organismes bénéfiques jusqu'à l'agrosystème (Buitink *et al.*, 2020).

Optimiser et déployer les stratégies déjà utilisées, un défi pour la recherche

Comme annoncé plus haut, un autre type de défi de recherche, qui peut être promu par l'ambition zéro pesticide, consiste à améliorer et déployer des méthodes qui sont actuellement déjà utilisées, mais en deçà de leur potentiel. Bien que paraissant plus appliqué et moins en rupture qu'un axe de recherche sur le microbiome des

plantes, ce défi n'en reste pas moins clé pour l'essor du biocontrôle, en lien avec des fronts de connaissances, et faisant appel à une diversité de disciplines. Par exemple, améliorer et déployer une stratégie basée sur l'utilisation d'un organisme vivant nécessite l'étude de ce dernier (de son génome à la dynamique de ses populations dans divers environnements, en passant par ses caractéristiques biologiques), des recherches technologiques et d'ingénierie pour mettre au point des méthodes efficientes d'élevage et de lâcher sur le terrain (automatisation des procédés de production, artificialisation de l'alimentation, nouveaux conditionnements préservant les performances de biocontrôle de l'agent, dispositifs d'épandage et d'aide au positionnement temporel et spatial dans l'agrosystème, etc.), ou encore des recherches en gestion de l'innovation facilitant, à terme, l'implémentation de modèles d'affaires et d'organisations d'acteurs optimisant son utilisation par les acteurs de terrain.

La liste des méthodes de biocontrôle pouvant être considérées comme mûres et à déployer plus largement est potentiellement longue puisque de nombreuses méthodes, de toutes les catégories de biocontrôle, sont actuellement utilisées en dessous de leur potentiel. Cependant, des cas d'étude pourraient en premier lieu porter sur des cas emblématiques, c'est-à-dire des méthodes qui représentent un succès au sein du périmètre du biocontrôle mais restent affectées par le plafond de verre susmentionné : leur utilisation, bien qu'efficace et satisfaisante localement, plafonne à environ 10-20 % des surfaces possibles (ces chiffres varient en fonction des sources, des années et des pays, mais sont généralement de cet ordre, quelle que soit la méthode considérée).

Quelles activités de recherche et innovation pourraient donc les faire passer d'une sous-utilisation chronique à une généralisation d'usage au profit des agriculteurs ? Nous proposons ici de discuter le cas de chaque catégorie de biocontrôle, en citant si possible des situations emblématiques susceptibles de constituer des cas d'étude pour la recherche et l'innovation sur le déploiement du biocontrôle.

En premier lieu, le problème du déploiement touche bien évidemment les organismes utilisés sous forme de produits en lutte biologique par inondation et inoculation, et les substances naturelles. Si leur utilisation peut ressembler de prime abord à celle des pesticides de synthèse, ils se caractérisent cependant par des contraintes spécifiques. Leur transport et leur stockage nécessitent souvent des conditions différentes des pesticides, en particulier pour les organismes vivants. Leur épandage également, de façon plus ou moins prononcée : certaines substances ou organismes peuvent être utilisés via des agroéquipements relativement classiques sous réserve qu'ils ne soient pas endommagés par la pression des buses de pulvérisation par exemple. D'autres nécessitent des dispositifs dédiés, comme les macroorganismes ou les phéromones. Leur positionnement nécessite par ailleurs assez souvent plus de précision, du fait de leur action moins rémanente. Les acteurs actuels qui distribuent les pesticides ne sont pas toujours bien armés pour accompagner et conseiller les agriculteurs sur l'utilisation du biocontrôle. Parmi les produits disponibles en France, on peut probablement citer quatre exemples emblématiques susceptibles d'être des cas d'étude sur les actions et infrastructures à développer pour décupler le déploiement. Le premier, historiquement, est l'utilisation de la micro-guêpe *Trichogramma brassicae* contre la pyrale du maïs. C'est un cas intéressant dans la mesure où des innovations successives (conditionnement pour le lâcher de terrain, planification d'émergences

successives d'adultes à partir d'une seule pose de diffuseurs sur le terrain, choix de souches présentant un parasitisme plus élevé sur le terrain, agroéquipement pour automatiser les lâchers, etc.) ont permis à ce produit de biocontrôle d'arriver à un taux d'utilisation de l'ordre de 20 % des surfaces touchées par la pyrale du maïs. L'utilisation de *Bacillus thuringiensis*, connu sous le nom de Bt, est également un exemple emblématique et cosmopolite. Plus récemment, des microorganismes des genres *Bacillus*, *Trichoderma* ou *Coniothyrium*, commercialisés par plusieurs industriels, ont connu un essor d'utilisation sans toutefois devenir dominants sur le marché. À ce titre, ils constituent également de bons candidats pour des cas d'étude. Dans la catégorie des substances d'origine minérale, le phosphate ferrique, utilisé pour le contrôle des limaces, est également un produit qui est devenu significativement utilisé et illustre les défis à la fois techniques et organisationnels à relever.

Ce défi du déploiement est sans doute encore plus pertinent dans les cas de la lutte biologique par conservation, la lutte biologique par acclimatation et la lutte autocide. Ces stratégies présentent des rapports bénéfices/coûts très avantageux et sont à l'origine de *success stories* fréquentes depuis plusieurs décennies. Pourtant, elles restent nettement sous-utilisées.

L'acclimatation est, par essence, un service, puisqu'il s'agit d'introduire idéalement une seule fois, pour l'établir, un organisme bénéfique. En France, ce service est très majoritairement financé par l'État, via le personnel des instituts de recherche et des actions faisant l'objet de subventions de recherche (dans le cadre du programme Écophyto par exemple), accompagnés par les instituts techniques agricoles et des acteurs des filières. Dans d'autres pays, comme en Nouvelle-Zélande avec l'exemple du programme d'introduction de la micro-guêpe parasitoïde *Mastrus ridens* (Charles *et al.*, 2019), ces services ont pu faire l'objet de financements plus équilibrés entre recherche publique et filières. La question de l'organisation de cette activité et de son mode de cofinancement entre les parties prenantes, est un sujet d'actualité. L'optimisation de ces stratégies fait également appel à des recherches fondamentales et appliquées en biologie des populations et écologie évolutive. En effet, il est nécessaire d'optimiser les taux de succès d'établissement des populations en fonction des caractéristiques des populations de l'organisme bénéfique, du bioagresseur cible, de l'environnement d'élevage, de l'environnement de lâcher. Il faut aussi anticiper et prévenir les risques non intentionnels sur la biodiversité native qui doivent être le plus faible possible pour qu'une acclimatation puisse avoir lieu. Les cas d'étude possibles dans cette catégorie sont potentiellement nombreux, et certains sont imprévisibles puisqu'un programme de lutte biologique par acclimatation est typiquement lancé suite à une invasion biologique. Cependant, les programmes en cours (contre le carpocapse du pommier, et contre *Drosophila suzukii*) sont des cas d'étude tout à fait pertinents pour travailler les innovations techniques et organisationnelles nécessaires au déploiement de cette méthode.

La lutte biologique par conservation est plus diversifiée que l'acclimatation dans ses méthodes. Il s'agit de favoriser l'action des organismes bénéfiques par plusieurs moyens. Ces moyens peuvent être d'adapter des pratiques agronomiques, de procéder à des aménagements des parcelles et des paysages, de planter certaines espèces, cultivées ou non cultivées, afin de créer des refuges ou des ressources supplémentaires pour les auxiliaires. Des méthodes sont aussi basées sur l'ajout de

ressources (sucres, pollens, œufs stérilisés de proies des auxiliaires, gîtes pour les auxiliaires, etc.) au champ. La forme de cette lutte biologique pourra donc être à la fois un service (du conseil ou un service d'implémentation des mesures de lutte biologique par conservation), combiné ou non avec des produits (les ressources telles que des sucres, pollens, etc., peuvent être mises à disposition sous forme de produits commerciaux par l'industrie). Dans ces cas également, l'organisation de la mise en place de ce type de stratégies pose question et n'est de toute évidence pas stabilisée en France comme à l'étranger. En atteste par exemple l'absence de fiche-action CEPP (encadré 1.11) sur la lutte biologique par conservation, alors que plus de 30 fiche-actions mobilisent le biocontrôle. La généralisation de l'utilisation de la lutte biologique par conservation soulève au moins deux catégories de questions de recherche. La première porte sur l'étude théorique et empirique du fonctionnement des communautés dans les agrosystèmes (écologie des communautés, écologie des réseaux trophiques, écologie fonctionnelle, compréhension des facteurs de régulation naturelle). Elle est à la base de toute stratégie de lutte biologique par conservation et peut par ailleurs déboucher sur des mesures d'aménagement des parcelles et paysages maximisant la probabilité d'augmenter le niveau de régulation par les organismes bénéfiques. La communauté scientifique française est particulièrement active sur ces domaines de recherche et se focalise en particulier sur des ensembles de questions permettant à terme d'envisager des stratégies prédictives et potentiellement à large échelle (Muneret *et al.*, 2020). Elle est cependant plus discrète sur un volet de recherche appliquée plus ciblé, visant à utiliser la lutte biologique par conservation de manière territorialisée, à l'image des bandes fleuries créées, adaptées et évaluées dans la zone de Hoeksche Waard aux Pays-Bas. Bien que les disciplines scientifiques pertinentes soient les mêmes que pour des questionnements plus génériques, l'attention sera plus portée ici sur le rôle fonctionnel d'une ou de quelques espèces, vis-à-vis de cibles précises. Plus proches du développement et partagés avec des acteurs des filières et des collectivités locales, ces programmes cherchent aussi actuellement, à l'image de la lutte biologique par acclimatation, leurs modes d'organisation et de cofinancement. Citer des cas d'étude dans cette catégorie est un exercice difficile. La lutte biologique par conservation est en effet très présente de façon implicite (des mécanismes de lutte biologique par conservation sont en fait utilisés par la plupart des agriculteurs) mais des exemples simples consistant en l'utilisation de mélanges spécifiques pour implanter des bandes fleuries en grande culture constitueraient sans doute des cas d'étude pertinents. Des projets de ce type sont en cours sur plusieurs cultures, notamment la betterave dans le cadre du plan national de Recherche et Innovation « vers des solutions opérationnelles contre la jaunisse de la betterave sucrière ».

La lutte autocide est également une méthode dont les formes et les modalités d'usage sont variées. Elle comporte notamment l'usage de mâles stériles (qui s'accouplent avec les femelles naturelles et interfèrent donc avec leur reproduction), l'usage d'individus incompatibles ou avirulents (dont l'accouplement avec les individus naturels va engendrer, là encore, une descendance stérile ou avirulente), le remplacement des populations naturelles par des populations causant moins de dommages aux cultures, etc. (Gould, 2008). L'application de ces méthodes a d'ailleurs été revisitée récemment avec les nouvelles capacités d'édition du génome et de *gene drive*, basé sur l'utilisation de matériel génétique se transmettant et se diffusant massivement

dans les populations cibles de génération en génération. Ceci ouvre des possibilités de contrôle des bioagresseurs particulièrement puissantes, mais provoque aussi des inquiétudes sur leurs impacts et des débats complexes d'éthique (Legros *et al.*, 2021). La lutte autocide peut donc consister à lancer des programmes d'éradication, à durée limitée et dans le but d'un contrôle pérenne, comme dans le cas de l'éradication de la lucilie bouchère (*Cochliomyia hominivorax*) dans plusieurs pays d'Amérique du Nord et d'Amérique centrale durant la deuxième moitié du XX^{e} siècle (Pérez-Staples *et al.*, 2021). Elle peut aussi prendre la forme de l'utilisation récurrente de lâchers d'individus produits en masse en conditions industrielles, dont l'objectif est de maintenir la population cible de bioagresseurs à des niveaux de densités très bas. Un exemple emblématique de cette stratégie est le succès de la régulation des populations du carpocapse de la pomme en Colombie-Britannique au Canada, dont les populations sont extrêmement bien régulées par un programme collectif de lâcher de mâles stériles sur l'ensemble d'une vallée de production (Thistlewood et Judd, 2019). Les défis de recherche et innovation pour la lutte autocide présentent à la fois des aspects à court et à long terme. À court terme, il s'agit de mettre en place des organisations et infrastructures permettant de tirer profit des technologies déjà au point, car malgré les succès répétés à l'étranger, les programmes de lutte autocide ont été largement ignorés dans le contexte français. Les raisons de cette absence d'activité sur la technique de l'insecte stérile (TIS) n'ont pas été scientifiquement étudiées et objectivées. Cependant, il semble que le problème soit de nature organisationnelle : les modèles d'affaires des acteurs actuels du secteur privé du biocontrôle sont tournés vers la production et la vente de produits. Intégrer une activité de coordination territoriale et de services associés à la vente d'insectes stériles est sans doute vu comme trop complexe ou couteux par ces acteurs. Par ailleurs, l'État, qui dans certains pays a pris en charge la majeure partie des investissements pour lancer des programmes de TIS de grande envergure, n'est pour l'instant pas intervenu dans le cas français. Il convient donc de se questionner sur les actions à lancer pour produire des preuves de concept et insérer cette méthode dans le panel d'outils disponibles pour les filières françaises. Cet objectif à court terme s'accompagne de nécessaires recherches en gestion de l'innovation, en sociologie, ainsi qu'en biologie pour optimiser et adapter les méthodes de production et de lâcher dans le contexte français. Parmi les cas d'étude sur des méthodes matures, les cas des programmes de TIS contre le carpocapse du pommier et contre la mouche des fruits (*Ceratitis capitata*), ont donné d'excellents résultats à l'étranger. Au Canada, le programme OKSIR mené en Colombie-Britannique a, par exemple, permis de maintenir 80 % à 95 % des vergers sous les seuils de dégâts, tout en divisant par cinq l'usage d'insecticides entre 1998 et 2004 (Bloem *et al.*, 2007). À plus long terme, la lutte autocide ouvre également de nombreuses questions de recherche. Elle est surtout connue en France sous la forme de lâchers d'insectes stérilisés par des rayons X, mais la lutte autocide est susceptible d'utiliser de nombreuses technologies basées sur la connaissance de la biologie et de la génomique des bioagresseurs (macroorganismes mais aussi microorganismes). Des projets récents s'intéressent notamment aux possibilités d'utilisation d'hybridation entre des populations plus ou moins phytopathogènes, à l'utilisation d'endosymbiontes comme facteurs d'incompatibilité entre les individus pour précipiter des populations cibles dans des vortex d'extinction.

Les médiateurs chimiques (pour le moment principalement des phéromones sexuelles utilisées pour désorienter ou attirer et piéger les ravageurs), actuellement utilisés comme des produits commerciaux classiques, méritent également d'être mentionnés ici comme un défi prégnant de déploiement dans des systèmes sans pesticides. En effet, bien qu'utilisables comme des intrants à l'échelle de la parcelle, ils n'expriment leur plein potentiel que lorsqu'utilisés de façon coordonnée à l'échelle d'une zone géographique entière. Cela induit un besoin d'outils et de mesures favorisant l'action collective, ainsi que des technologies facilitant leur utilisation optimale (pour les placer au bon endroit, au bon moment, dans les quantités adaptées pour présenter une efficience optimale). Les médiateurs chimiques sont par ailleurs très sous-utilisés par rapport à leur potentiel (en termes de nombre d'usages ou de surfaces couvertes) et seront amenés à se diversifier. La grande majorité des médiateurs chimiques correspond actuellement à des phéromones sexuelles (le plus souvent des femelles) destinées à attirer ou désorienter les mâles, mais les recherches à venir contribueront à étoffer le panel de techniques disponibles : utilisation des kairomones (odeurs provenant d'espèces autres que celle visée), de molécules volatiles bloquant les systèmes de perception des odeurs chez les organismes cibles, etc. Parmi les cas emblématiques de déploiement à décupler dans cette catégorie, nous citerons par exemple l'utilisation des phéromones pour la confusion sexuelle du carpocapse du pommier (*Cydia pomonella*) et de la tordeuse de la grappe (*Lobesia botrana*), deux méthodes reconnues pour leur efficacité et rentrées dans la routine de nombreux agriculteurs. Si l'utilisation de ces méthodes ne représente en France qu'environ 10 % des surfaces de pommiers et vignes, il est à noter qu'elle est parfois nettement plus forte. Au Chili par exemple, suite à l'invasion biologique récente par *Lobesia botrana*, l'État, via le *Servicio Agricola y Ganadero* (SAG), organise un monitoring et une lutte obligatoire depuis 2016 contre ce ravageur dans le cadre d'un plan national. En pratique, le SAG partage le coût d'achat des diffuseurs de phéromones avec les agriculteurs et les accompagne, sur une surface d'environ 115 000 hectares, soit environ 50 % des surfaces des cultures concernées (vignes principalement, mais aussi pruniers et myrtilliers)[10].

Les méthodes visant à induire l'immunité (SDP par exemple) doivent aussi faire l'objet de recherches pour fiabiliser leur efficacité et optimiser leur déploiement. En premier lieu, leur utilisation doit prendre en compte l'environnement à l'échelle de la parcelle (climat, pratiques culturales) car elles agissent sur la capacité de la plante à mettre en place ses défenses (Walters *et al.*, 2013). Une meilleure connaissance de l'influence des conditions climatiques permettrait de mieux préconiser les applications et d'éviter des traitements voués à l'échec. De même, évaluer les interactions, positives comme négatives, avec d'autres interventions agissant sur la physiologie de la culture dans la fenêtre d'utilisation des SDP, paraît essentielle pour éviter d'envoyer des messages contradictoires à la plante. Ceci nécessitera sans doute de trouver un compromis entre immunité et productivité, la course à cette dernière favorisant parfois tellement le bioagresseur que toute tentative d'induction des défenses de la plante restera illusoire (voir par exemple le rôle ambivalent de l'azote (Mur *et al.*, 2017)). Un second domaine de recherche, lié à la gestion de l'immunité des plantes par le biocontrôle, concerne la génétique. La sélection a sans doute progressivement réduit l'arsenal des barrières physiques et chimiques des espèces cultivées car sources de caractères

10. Sources : www.sag.gob.cl, www.odepa.gob.cl

négatifs en termes de goût ou de digestibilité par exemple (Alseekh *et al.*, 2021). Réintroduire de la diversité métabolique dans les variétés cultivées tout en conservant des produits agricoles et alimentaires de qualité acceptable est un autre compromis à rechercher pour améliorer l'immunité des cultures par sélection génétique. Une voie de recherche innovante serait d'orienter cette sélection vers des variétés plus aptes à répondre à des traitements de type SDP. Il peut s'agir d'améliorer les mécanismes de perception de ces stimuli extérieurs, sous réserve qu'on les connaisse, mais également la diversité des défenses que la plante peut induire. Le caractère transitoire de cette induction pourrait être la solution au nécessaire compromis évoqué précédemment. Optimiser l'immunité d'une culture en pratique passe donc par une démarche très intégrée et nécessaire pour favoriser les interactions biologiques au sein de la plante elle-même et va bien au-delà d'une simple substitution des pesticides par des produits à action SDP. C'est le concept d'immunologie agroécologique emprunté au domaine animale (Sadd et Schmid-Hempel, 2009). Il vise à comprendre et favoriser les interactions positives pour optimiser la réponse immunitaire en mobilisant des pratiques/méthodes/outils/produits de différentes natures mais toutes écologiques. Les recherches autour de ce concept sont soutenues dans le contexte français dans deux projets récemment initiés ; d'une part le RMT Bestim[11], réseau financé par le ministère de l'Agriculture et regroupant les acteurs de la recherche, du développement et de l'enseignement sur l'ensemble des filières, et d'autre part, le projet CAP ZERO PHYTO du PPR « Cultiver et Protéger Autrement », plus ciblé sur le pommier et la tomate (encadré 5.8). Concernant les possibles cas d'étude de déploiement de méthodes actuellement matures, basées sur la gestion de l'immunité de la plante, on retrouve plusieurs produits SDP (microorganismes ou substances naturelles comme les phosphonates) qui sont actuellement utilisés et font l'objet de fiche-actions dans le dispositif CEPP (encadré 1.11) pour plusieurs cultures en France.

À retenir

En réorientant l'attention, les ressources et les priorités de recherche et innovations vers les leviers de protection agroécologique des cultures, fixer à la recherche un cap zéro pesticide catalyse trois types de défis dans le champ d'application du biocontrôle. Le premier est l'investissement de fond sur des domaines de recherches encore exploratoires et à fort potentiel, comme l'étude du fonctionnement du microbiote des plantes en vue de leur gestion pour la santé des plantes. Le deuxième concerne la production de connaissances et outils pour l'optimisation et le déploiement des stratégies de biocontrôle, défi particulièrement pluridisciplinaire (mettant en jeu des recherches dans les domaines de la biologie, du numérique, de la robotique, de la gestion de l'innovation, etc.). Pour relever ce défi, il parait important de tirer profit de l'essor de filières engagées dans des démarches de mise au point de production sans pesticides, représentant des espaces de co-innovation où sont relaxées les contraintes implicitement posées par l'usage de pesticides (systèmes de culture basés sur l'usage de pesticides, réseau d'acteurs adaptés à l'usage d'intrants, agroéquipements, etc.). Le troisième, issu du constat que le retrait d'intrants chimiques à large spectre nécessitera

11. https://www.gis-relance-agronomique.fr/GIS-UMT-RMT/Les-RMT/BESTIM

de s'appuyer sur des combinaisons de méthodes, porte sur la recherche et l'innovation qui devront revisiter les cadres conceptuels et les approches d'intégration des différents types de biocontrôle et des autres leviers. Nous avons cité ici l'exemple du concept de l'immunité agroécologique qui place la plante cultivée au centre du système de protection des cultures et considère l'immunité au sens large.

⏩ De l'importance d'une diversification des modèles d'affaires dans le secteur du biocontrôle

Parvenir à des systèmes de culture zéro pesticide implique non seulement de changer les pratiques de culture, mais aussi de repenser les systèmes socio-économiques qui ont accompagné le développement de l'essor des pesticides de synthèse. L'intensification de la production agricole et l'avènement d'un système productiviste reposant sur des semences hybrides et l'utilisation croissante de pesticides ont été rendus possibles par la création de réseaux de parties prenantes permettant l'élaboration, l'amélioration, le test et la mise à disposition de ces intrants. Un point central évoqué précédemment est que l'organisation socio-économique particulière qui se met en place, dans laquelle les intrants sont des produits aux spécificités globales plutôt que localisées et aux effets génériques plutôt que spécifiques à certaines cultures ou maladies, n'est pas la seule possible. La transformation des pratiques implique donc de penser une autre organisation socio-économique du domaine, qui peut passer par le développement de produits différents mais aussi de services. Ces modifications impliquent une transformation des réseaux d'acteurs associés et la mise en œuvre de modèles d'affaires innovants entraînant *in fine* le renouvellement des chaînes de valeurs.

L'agriculture : un maillon dans une chaîne de valeur globale

L'innovation en agriculture est pensée aujourd'hui dans un cadre élaboré à partir des années 1950, période au cours de laquelle ont été créées les structures et les parties prenantes actuelles dont le critère commun est la croissance des rendements. La construction du système français est bien décrite par Mendras (1992). Elle remonte aux années 1930 à travers la mise en place du réseau de Chambres d'agriculture et la création du métier de conseiller agricole. Au sortir de la Seconde Guerre mondiale, le mouvement s'intensifie car la crise alimentaire implique de trouver des solutions pour augmenter la production agricole. L'amélioration de la productivité passera par l'introduction de nouvelles techniques (Chapitre 1). Les tests à grande échelle sont rendus possibles par la création, en 1946, de l'Institut national de la recherche agronomique (INRA) tandis que leur diffusion rapide et uniforme sera facilitée par la création, toujours en 1946, de la Fédération nationale des syndicats d'exploitants agricoles (FNSEA), rapidement suivie de celle d'instituts techniques agricoles, puis du réseau de lycées agricoles. Ce mouvement se fait au détriment des savoirs paysans et de la territorialisation des activités agricoles. Dans les années 1950, les premières formes de réglementations de la mise sur le marché des pesticides apparaissent. Cette mise en perspective de l'évolution du

secteur montre que le système, dans sa forme actuelle, relève d'une construction et d'une politique volontariste, qui participe de la mise en place d'une chaîne de valeur complexe, où la quantité produite et l'augmentation du rendement sont les principaux critères de coordination des acteurs (Porter, 2008). Ainsi, au cours de la seconde moitié du XX^{e} siècle, l'agriculture est passée d'une constellation d'activités territoriales à une activité répartie globalement avec des éléments imbriqués selon des objectifs de normalisation des produits, d'optimisation des rendements, et de réduction des coûts. Cette chaîne de valeur globale est caractérisée par la définition des prix au niveau mondial et une division du travail par pays (Gibbon, 2001). Ce concept – élaboré à partir de l'observation de l'agrobusiness – permet de caractériser aujourd'hui l'innovation en agriculture et la coordination de ses parties prenantes, y compris les entreprises agroalimentaires. L'imbrication des différents niveaux de cette chaîne de valeur peut être illustrée par les recherches sur les semences. Par l'introduction de modification génétiques, elles font la promesse de « réduire les coûts de production agricole ou d'améliorer le rendement des cultures », tout en améliorant la qualité pour s'adapter à la chaîne d'approvisionnement, en particulier aux acteurs de la transformation (Vanhaverbeke et Cloodt, 2006). L'innovation et la recherche dans ce domaine intègrent donc des contraintes économiques, et pas uniquement agronomiques. Cette vision des systèmes de production et de l'innovation, propre aux nations économiquement dominantes, est restrictive lorsqu'il s'agit de considérer l'impact durable des organisations (Boons et Lüdeke-Freund, 2013). Elle reste pourtant centrale dans la manière que l'on a de considérer la production alimentaire. Les produits et techniques de biocontrôle dont les propriétés sont systémiques permettent de repenser l'articulation de systèmes à différentes échelles par le truchement d'une transformation des modèles d'affaires à l'œuvre.

Les modèles d'affaires du biocontrôle : des leviers de transformation

Le domaine agricole est complexe et intégré, et les modèles d'affaires actuels y sont la somme de multiples compromis ; cela rend d'autant plus difficile le défi actuel de repenser ces modes de coordination. Nous avons introduit le concept de « chaîne de valeur globale ». Il permet de souligner un premier axe de transformation nécessaire. Alors que l'agriculture était jusqu'au XX^{e} siècle un domaine extrêmement dépendant du sol et du climat, avec la révolution verte elle en est partiellement détachée (encadré 1.4). Une organisation de l'agriculture est mise en place où les parties prenantes sont regroupées par culture au sein de filières, le savoir est spécialisé et constitué pour optimiser la production de chaque culture indépendamment des autres. Or, la régulation biologique pose des questions, telles que le suivi des populations de ravageurs, lié à une aire géographique précise, parfois transversal à plusieurs cultures. La gestion des régulations biologiques demande une coordination territoriale dont les structures n'existent pas aujourd'hui. Il y a une nécessité d'innovations organisationnelles qui est donc d'autant plus difficile aujourd'hui que les paramètres à partir desquels l'agriculture est pensée sont ceux de l'agriculture conventionnelle.

Pour dépasser cette limite nous proposons d'introduire la notion de modèle d'affaires. Comme le soulignent Schaltegger *et al.* (2016, p.5), la recherche sur les modèles

d'affaires a le potentiel d'ouvrir de nouvelles perspectives sur la transition écologique car elle « met en évidence la logique de création de valeur d'une organisation et ses effets et permet potentiellement de nouvelles formes de gouvernance telles que les coopératives, le partenariat public-privé ou les entreprises sociales, contribuant ainsi à transcender les modèles étroits à but lucratif et de maximisation du profit »

Cette notion permet de lever des hypothèses fortes sur le fonctionnement des organisations (Massa *et al.*, 2017) et constitue un moyen d'accompagner le changement par l'innovation organisationnelle (Demil *et al.*, 2018). Les modèles d'affaires peuvent être considérés comme une représentation de la façon dont une organisation crée et distribue la valeur, et comme un outil pour penser ce système (Massa *et al.*, 2017). Le modèle d'affaires est donc un concept précieux pour étudier les entreprises innovantes de biocontrôle et pour accompagner les transformations organisationnelles durables d'une chaîne de valeur complexe, point central de la transition agroécologique que peuvent accompagner techniques et produits de biocontrôle. La notion de modèle d'affaires est intimement liée à celle de chaîne de valeur. Elle permet de se placer à différents niveaux et d'étudier les interactions et les mécanismes à l'œuvre entre les différentes parties d'un système lors de l'introduction d'innovations, plutôt que d'étudier les innovations une par une. Les solutions comme la lutte intégrée ou la lutte biologique, tout comme les produits et techniques de biocontrôle, sont des innovations de processus ou de produits à caractère systémique qui impliquent de penser les changements de manière holistique. D'où la nécessité de repenser les collaborations et les échelles favorables au bon fonctionnement des modes de culture permettant d'atteindre l'objectif zéro pesticide.

Parmi les cadres théoriques pour penser un modèle d'affaires, l'approche RCOV (Demil et Lecocq, 2010) implique quatre composantes : les ressources (R) et compétences (C) disponibles, la structure organisationnelle (O), intégrant le processus d'activité (chaîne de valeur) et le réseau de valeur (les relations avec les parties prenantes externes), et enfin la proposition de valeur (V) délivrée à une diversité d'usagers (dont les consommateurs, les fournisseurs, les concurrents), qui est d'autant plus grande que les chaînes de valeurs sont complexes.

Le cas du biocontrôle est particulier puisque les *pure players* de cette industrie revendiquent une proposition de valeur calquée sur le modèle des pesticides et fondée sur leurs propriétés (Boutet, 2021). Le réseau de valeur revendiqué demeure celui défini par le système en place. Aucune innovation organisationnelle[12] n'est sérieusement envisagée lorsqu'il s'agit de penser les modes de valuation (proposition de valeur) et l'articulation avec les parties prenantes externes (réseau de valeur) pour une diffusion des techniques et produits de biocontrôle auprès d'un public élargi. Les exemples développés dans l'encadré 4.3 montrent la diversité de modèles d'affaires possibles quand il est question de lutte biologique, en particulier la proposition de valeur et son réseau de valeur.

12. Se dit d'une innovation organisationnelle une transformation dans le mode de réalisation d'une activité. À titre d'exemple, l'entreprise DELL a innové dans son domaine en proposant de faire des ordinateurs correspondant aux demandes précises de consommateurs individuels plutôt que de proposer des modèles définis d'ordinateurs. Cela a été rendu possible par une innovation organisationnelle portant sur la réorganisation de la chaîne logistique associée à la mise en place d'un puissant système de gestion intégré.

Encadré 4.3. Diversité de modèles d'affaires pour développer la lutte biologique

Différents modèles d'affaires, liés à différentes chaînes de valeurs, ont été mis en place pour développer la lutte biologique.

La lutte classique

C'est un modèle d'affaires peu attractif pour une entreprise à but lucratif puisqu'elle vise l'installation de long terme d'une population d'auxiliaires sans service futur. La régulation réussie du *Cynips* du châtaigner permet d'identifier les marqueurs d'un modèle d'affaires de lutte biologique (Borowiec *et al.*, 2018). La proposition de valeur est de limiter la présence du *Cynips* pour assurer la poursuite d'activité sans pertes substantives de revenu et pour écarter la menace d'une reconversion des producteurs. Le réseau de valeur associe acteurs privés et publics assurant une coordination à plusieurs niveaux. Ces acteurs sont issus de (i) la recherche dans plusieurs pays pour suivre l'introduction et ses conséquences ; (ii) l'accompagnement et la coordination par les organisations professionnelles, comme les centres techniques et les FREDON (Fédérations départementales de lutte contre les organismes nuisibles) dans plusieurs régions. Les retombées ont permis de réaliser la proposition de valeur initiale mais aussi de créer des connaissances sur la mise en œuvre de la lutte classique et d'initier des réseaux de coordinations et des nouvelles manières de faire.

La lutte autocide

Le projet CeraTIS (financement Écophyto 2020-2023) expérimente la TIS pour lutter contre la mouche *Ceratitis Capitata* sur production de fruits dans la vallée de Vescovato en Corse. La proposition de valeur vise le contrôle des ravageurs qui résistent entre les saisons puisque des réservoirs subsistent d'une culture fruitière à l'autre. Producteurs et distributeurs sont concernés au premier chef. Le réseau de valeur initial repose sur les instituts techniques et de recherche, ainsi que sur la station expérimentale locale. Toutefois, pour une implantation de la technique à long terme, le projet vise la mobilisation de parties prenantes politiques, et d'autres, pouvant avoir un intérêt à réduire l'apport de pesticides : associations de riverains, associations environnementales, centres hôteliers ou offices de tourisme. Dans ce cas précis, le caractère touristique de l'île est un levier pour accompagner l'installation d'un modèle d'affaires de biocontrôle territorialisé.

La lutte inondative

Le projet BIDIME (ANR Écophyto Maturation 2020-2023) est une expérimentation de lâchers de plusieurs espèces de micro-guêpes du genre *Trichogramma* en serre sur PPAM (plantes à parfum, aromatiques et médicinales) dans le territoire grassois. La proposition de valeur consiste ici à fournir un moyen de lutte à un secteur de niche à forte valeur ajoutée pour lequel peu, voire pas de solution n'est disponible. Le réseau de valeur est ici un peu structuré autour d'une association de producteurs très active (Les Fleurs d'Exception du Pays de Grasse) ayant développé des actions de recherches et de lobbying depuis 20 ans. L'idée est ici d'investir plus de parties prenantes. À l'échelle du territoire, il s'agit de mobiliser la puissance publique pour valoriser l'agroécologie comme un marqueur territorial et explorer la question d'emplois potentiels par la production locale d'auxiliaires. À l'échelle nationale, le projet vise l'intéressement de parties prenantes de l'aval de la chaîne de valeur, notamment les enseignes du luxe, acheteurs de la production. Dans ce cas, l'image de marque et la qualité des produits constituent des leviers pertinents.

Aborder la question en termes de modèle d'affaires amène donc non seulement à repenser les coordinations entre acteurs agricoles, mais également à poser plus largement la question des parties prenantes impliquées, y compris hors du périmètre agricole. Ces exemples montrent qu'*in fine*, la valeur produite réside non seulement dans la régulation biologique, qui limite des pertes économiques, mais aussi dans la création de connaissances et la découverte de modalités de coordination multi-acteurs et territorialisées. Des pistes existent donc, en termes de bénéfices environnementaux et sociaux, par la résilience des territoires, mais encore faut-il que le rapprochement ait lieu avec les acteurs – privés comme publics – potentiellement intéressés à ces dimensions. Deux exemples de TIS montrent que plusieurs configurations sont possibles pour la mise en œuvre d'une même technique. L'installation sur un territoire de la TIS pour lutter contre le carpocapse de la pomme au Canada (projet OKSIR), en Colombie-Britannique, a permis de largement limiter les pesticides à l'échelle d'une région, et de développer une identité régionale plus écologique. Ceci a eu lieu en impliquant des parties prenantes publiques et privées très variées, en particulier des citoyens, et en créant un intérêt général sur la question de la transformation agroécologique (SIR, 2021). Toujours au Canada, sur d'autres cultures, un consortium privé propose des services d'identifications, puis une mise en œuvre de la TIS (PRISME, 2021). L'activité repose sur un réseau de partenaires privés (centres techniques, universités, etc.) et publics (service d'État et collectivités, etc.), ainsi que d'adhérents (organisation de producteurs) qui bénéficient des différents services à leur demande (recherche et développement, mise en œuvre, suivi).

Dans les deux cas, il s'agit de penser la diffusion de produits et techniques de biocontrôle selon les caractéristiques territoriales, les filières et les réseaux disponibles. Cela devient donc le fait de réseaux d'acteurs collaboratifs, et non celui d'acteurs économiques isolés et omnipotents. Ces deux exemples montrent qu'il existe différentes manières de faire bien pour parvenir à la mise en œuvre de stratégies zéro pesticide à partir d'une même technique. Les modèles d'affaires mis en œuvre expriment cette diversité : dans le premier cas, le territoire est particulièrement moteur, les organisations locales ont été associées ; dans le second cas, une structure *ad hoc* s'adresse à plusieurs territoires et valorise les partenariats. Cette diversité s'exprime aussi par des gouvernances différentes dans lesquelles la prise de décision est engagée de diverses manières. L'accompagnement via des politiques publiques pour augmenter la diversité des modèles d'affaires pourrait notamment consister à la promotion de structures organisationnelles permettant cette diversité ; certaines sont déjà existantes comme les coopératives, mais de nouvelles formes de structures pourraient aussi être développées.

À retenir

Depuis la révolution verte, un modèle de production s'est mis en place, dont l'implicite est l'usage d'intrants chimiques. Un objectif zéro pesticide suppose de repenser les modèles d'affaires agricoles actuels. Pour soutenir cet effort nécessaire d'innovation organisationnelle, nous mettons l'accent sur trois dimensions essentielles : (1) des échelles pertinentes pour le suivi des populations de bioagresseurs doivent être pensées au-delà de la parcelle ou de l'exploitation ; (2) des coordinations avec

des nouvelles parties prenantes, qui ne sont pas actuellement identifiées comme « acteurs agricoles », doivent être mises en place, incluant des acteurs en amont ou en aval de la chaîne logistique, des associations écologiques et citoyennes ou étatiques, voire les pouvoirs publics territoriaux ou nationaux ; (3) des critères autres que la seule efficacité productive doivent être développés comme par exemple le gain de biodiversité, ou la qualité paysagère. Pour ce faire, il est nécessaire que des recherches soient conduites de manière collaborative afin de construire des mesures et des indicateurs à la fois objectifs et communs, et ainsi élargir ce qui est entendu comme ayant de la valeur.

⏩ Les services de diagnostic, de prévision et d'aide à la décision au centre des futurs stratégies et modèles d'affaires de biocontrôle ?

Le diagnostic et l'aide à la décision sont évidemment clés pour l'essor du biocontrôle

Plus tôt dans ce chapitre et dans cet ouvrage, nous avons dressé deux constats clés pour le questionnement sur l'avenir du biocontrôle. Le premier constat est que les systèmes de culture dominants, optimisant l'usage des pesticides, rendent relativement peu prioritaires la gestion des équilibres biologiques, le suivi fin des populations de bioagresseurs et d'auxiliaires et la prédiction de leurs dynamiques. Des traitements chimiques préventifs et calendaires, une utilisation de seuils de déclenchement relativement grossiers, le pouvoir curatif massif et la rémanence des pesticides contrôlent en effet le plus souvent les épidémies de bioagresseurs. Le second constat est que le biocontrôle nécessite de fortes capacités de diagnostic et prévision, d'une part pour être positionné au bon endroit, au bon moment et de la bonne façon[13], et d'autre part pour que le système de culture présente une résilience face aux bioagresseurs (et ne soit donc pas principalement dépendant d'intrants à fort pouvoir curatif et à forte rémanence dans l'environnement).

Nous le verrons dans le chapitre 7, ce besoin de diagnostic et de pilotage est commun à la plupart des leviers de l'agroécologie et de nombreuses pistes prometteuses sont actuellement à l'étude à l'échelle des exploitations. Nous souhaitons ici nous attarder sur les spécificités du biocontrôle, dont le large périmètre allant de l'utilisation efficiente d'intrants à la gestion des paysages et les modes d'action très divers, rendent particulièrement prégnant le problème de la combinaison et de l'articulation des différentes méthodes, voire la prise en compte de l'ensemble de l'itinéraire technique. Nous souhaitons également soulever les problématiques de l'identification des besoins réels des opérateurs de terrain, tout comme celle des modes d'organisations permettant de répondre à ces besoins, via la mise à disposition d'outils pour différents acteurs et à différentes échelles.

13. La problématique du positionnement n'est pas propre au biocontrôle puisqu'elle a été un focus d'innovation majeur pour les pesticides, mais elle est encore plus prégnante pour les intrants de biocontrôle.

Gérer les régulations biologiques et utiliser de façon efficiente les intrants de biocontrôle nécessite idéalement une batterie d'outils de diagnostic et prédiction, pour :
– suivre et prédire les densités de populations de bioagresseurs ;
– suivre et prédire les densités d'organismes auxiliaires des cultures ;
– connaître l'état de la plante (et plus généralement du phytobiome, c'est-à-dire la plante, son microbiote et leurs interactions) dans son environnement spécifique ;
– déterminer, à partir des informations précédentes, quand et où des actions spécifiques de gestion sont réellement nécessaires.

Si cette affirmation paraît plutôt évidente, la traduire en priorités d'innovation et de déploiement s'avère cependant complexe. Tout d'abord, de nombreux outils, qu'il s'agisse de méthodes de diagnostic ou des OAD ont été développés au fil des ans, mais ils sont surtout pensés pour un usage à l'échelle de la parcelle et spécifiquement pour un objectif précis (pour l'usage d'un intrant en particulier). La diversité des modes d'action des produits de biocontrôle, la prise en compte de la plante comme partenaire actif de sa protection et le développement d'autres méthodes ou leviers agroécologiques (méthodes prophylactiques mais aussi mélange d'espèces, y compris plantes de service, etc.) soulèvent le besoin de réfléchir à la construction d'OAD globaux. Ces outils doivent permettre de gérer les compromis nécessaires entre bioagresseurs et espèces végétales, entre méthodes de biocontrôle (au sens large) ou encore entre productivité et protection. Ils doivent également permettre de positionner les interventions (de toute nature) les unes par rapport aux autres dans les périodes de risque d'épidémie de bioagresseurs. Concernant plus spécifiquement les interventions de stimulation de défense des plantes, elles doivent cibler un état physiologique réceptif, conditionné comme on l'a vu par de nombreux facteurs. De tels OAD devront donc intégrer des indicateurs de cet état physiologique pour pouvoir orienter les traitements de biocontrôle vers des méthodes SDP, ou au contraire vers d'autres méthodes à action plus directe envers les bioagresseurs selon le statut de réceptivité de la culture. L'autre défi est également d'intégrer dans les OAD une dimension spatiale, pour aller jusqu'à des outils permettant de raisonner et décider à l'échelle de paysage composés de diverses exploitations, cultures et éléments paysagers non cultivés.

Le défi du développement et du déploiement des outils au service du biocontrôle n'est pas seulement technologique

S'il paraît probable que les avancées technologiques vont permettre relativement rapidement de développer une diversité d'outils (voir par exemple l'encadré 6.2 sur les capteurs olfactifs), plusieurs questions épineuses se posent concernant leur évolution et leur utilisation. Comment organiser le déploiement dans l'espace des outils de diagnostic ? À l'image des prévisions météorologiques qui nécessitent de prendre en compte de nombreux facteurs en interaction, parviendra-t-on à formuler des prévisions épidémiologiques et de régulation biologique suffisamment fiables et à suffisamment long terme (d'une saison à l'autre par exemple) pour entrer dans la pratique ? Est-il réaliste d'intégrer autant de types d'informations et de prédictions dans des OAD ? Comment combiner les analyses effectuées à différentes échelles (épidémiologiques à l'échelle d'un pays, dynamique des populations à l'échelle d'un

paysage ou d'une parcelle, etc.) pour aboutir à des prévisions pertinentes pour l'opérateur de terrain ?

Un autre élément clé pour le déploiement concerne la qualification des réels besoins des acteurs vis-à-vis de ces outils, et le mode de réponse à ces besoins. Face à l'explosion attendue en termes de nombre d'outils disponibles, qu'il s'agisse de méthodes simples de suivi ou d'OAD complexes intégrant de nombreux paramètres, comment se positionneront les actuels et futurs acteurs du monde agricole ? Comment les choisir (et avec quels partenaires) et prioriser les travaux de recherche et innovation visant à les développer et les combiner ? Le fait que de nombreux outils actuellement disponibles soient peu ou pas utilisés en routine (ou restent proches du terrain de la recherche) rappelle que toute invention technologique paraissant répondre à un besoin sur le principe ne rencontrera pas toujours dans les faits un réel besoin insatisfait des acteurs. Ceci peut être dû à un rapport coût/bénéfice incompatible avec les attentes, ou à une complexité en décalage par rapport à l'intérêt qu'expriment les possibles utilisateurs. La co-innovation entre acteurs de la recherche et acteurs de terrain est mentionnée depuis des années comme indispensable dans la plupart des appels à projets de recherche et innovation. Il faut cependant rappeler à quel point l'identification et la caractérisation des besoins, associés à la co-innovation des filières engagées dans des stratégies agroécologiques, sera essentielle pour la réussite du biocontrôle et des outils accompagnant son déploiement.

Une fois les besoins identifiés, les questions clés suivantes concernent le mode d'exploitation et de mise à disposition de ces outils accompagnant l'intégration du biocontrôle. Sous quelle forme seront-ils disponibles (services, produits, etc.), et comment seront-ils intégrés dans les modèles d'affaires des acteurs ? Sur ces questions, à titre d'exemple, quatre scénarios non mutuellement exclusifs peuvent être cités :
– Le premier scénario correspond à des entreprises historiques du biocontrôle commercialisant des intrants de biocontrôle (organismes en particulier), qui ont naturellement intégré au fil du temps des services de monitoring et d'accompagnement direct aux producteurs. Néanmoins, ces services sont le plus souvent directement liés à l'utilisation de leur produit (par exemple basés sur des pièges permettant de suivre les populations de ravageurs et décider du meilleur moment d'usage des intrants de biocontrôle). Ces services se sont récemment étoffés avec des dispositifs de plus en plus élaborés (par exemple, des diffuseurs automatisés et programmés ou des capteurs connectés, utilisés pour l'optimisation de l'usage de la confusion sexuelle ou encore des anti-limaces de biocontrôle). D'autres entreprises ont intégré à leur offre globale de biocontrôle des services de monitoring et cartographie dynamique en ligne des bioagresseurs[14]. On peut imaginer une intégration croissante de tels outils dans le panel d'activité des entreprises actuelles de biocontrôle.
– Le deuxième scénario observé depuis plusieurs années est le développement de nouvelles entreprises, spécialisées dans le numérique (internet des objets, aide à la décision, télédétection, monitoring, etc.), et proches des collectifs de producteurs, qui mettent à disposition des ensembles d'outils sous forme de services. Ce type d'entreprise est déjà commun pour l'optimisation des systèmes de semis et d'irrigation, mais pourrait se développer avec l'essor de stratégies durables de protection des plantes.

14. https://colbics.eu/Main-Results/Decisions-support-tools-for-the-monitoring-of-arthropod-pests-in-Chile

– Un troisième scénario est une appropriation massive de ces outils par les acteurs à caractère coopératif et collectif (associations de producteurs, coopératives agricoles, coopératives d'utilisation de matériel agricole, sociétés coopératives d'intérêt collectif, etc.). Ce scénario semble actuellement relativement peu développé en France, mais ces acteurs pourraient jouer un rôle clé dans la coordination des acteurs à l'échelle de zones géographiques plus ou moins vastes en fonction de leur aire d'influence.
– Enfin, de nombreux outils peuvent tout à fait être mis à disposition des acteurs via des services publics. Si cette forme de mise à disposition d'outils paraît tout à fait logique et légitime puisque de nombreux outils ont vocation à faciliter la coordination de différents types d'acteurs et de gérer un bien commun, son adoption dépend fortement des doctrines des États et collectivités territoriales en matière d'accompagnement public des acteurs privés. En France, la position de l'État sur ce point ne semble pas tout à fait tranchée. Les services de l'État sont présents localement dans les zones agricoles, participent activement à la biosurveillance, mais leur rôle dans l'exploitation ou l'utilisation d'outils et services de diagnostic et d'aide à la décision paraît relativement instable. Un exemple de cette instabilité concerne les bulletins de santé des végétaux (BSV), créés en 2009, qui présentent un très fort potentiel pour coordonner les acteurs à une échelle territoriale. Alors qu'ils pourraient intégrer des données variées provenant d'une diversité d'acteurs et d'outils de diagnostic, la dynamique de développement et la pérennité même des BSV ont régulièrement fait l'objet de débats au sein des pouvoirs publics, visiblement centrés sur la question de leur financement et la volonté de diversifier ce dernier.

À retenir

Tout comme l'ensemble des stratégies à la base de l'agroécologie, l'utilisation satisfaisante des méthodes de biocontrôle est fortement dépendante d'outils permettant ou facilitant (i) la détection et la quantification des densités de populations d'organismes bioagresseurs ou d'auxiliaires des cultures, (ii) la prévision de leurs dynamiques spatio-temporelles et (iii) l'aide à la décision concernant la gestion des régulations naturelles ou les interventions au champ.

L'essor et l'utilisation pertinente et parcimonieuse de ces outils correspondent bien sûr à un défi technique considérable, en matière de technologie de détection, de modélisation, d'automatisation, ou encore d'intégration et analyse de données. L'investissement en recherche nécessaire pour la mise au point de tels outils est considérable, tant l'état de l'art est encore peu avancé, notamment en termes de capacité de prédiction dans des systèmes complexes et sur des pas de temps compatibles avec les besoins de planification des opérateurs de terrain. Un autre enjeu est, par ailleurs, la mise en relations de données obtenues à des échelles différentes (de la plante jusqu'à des zones biogéographiques dépassant la surface d'un pays, etc.).

Cependant, le défi concernant l'accompagnement des différents types de biocontrôle via des outils de diagnostic et d'aide à la décision n'est pas uniquement une question technique ou technologique. Face à la profusion possible d'outils, un défi pour la recherche et l'innovation est aussi de se projeter dans les futures filières, les futures

aires géographiques et avec les futurs acteurs, pour caractériser de façon réaliste les besoins en matière d'outils, et proposer des modes d'organisation adaptés.

Conclusion

Le paradigme zéro pesticide proposé dans cet ouvrage a pour effet attendu une forte stimulation de la diversification des méthodes de biocontrôle, grâce à un investissement supérieur des secteurs public et privé, et à l'accélération des recherches sur des fronts de science comme l'étude du phytobiome. Ce changement de paradigme pourrait accélérer la diversification des méthodes de biocontrôle effectivement déployées dans les filières agricoles en catalysant le développement de nouvelles infrastructures, organisations d'acteurs, modèles d'affaires et outils de diagnostic et d'aide à la décision, à la fois adaptés au biocontrôle et à sa combinaison avec les autres leviers de l'agroécologie. Cet essor attendu devrait ainsi se concrétiser par une augmentation des solutions de biocontrôle effectivement disponibles et déployées, et par un équilibrage entre les solutions mises à disposition des acteurs sous forme de produits (qui représentent la majorité des méthodes mises en avant par les acteurs actuellement) et les solutions mises à disposition sous forme de services (intégrant des outils de prédiction et de pilotage des régulations naturelles) (figure 4.1).

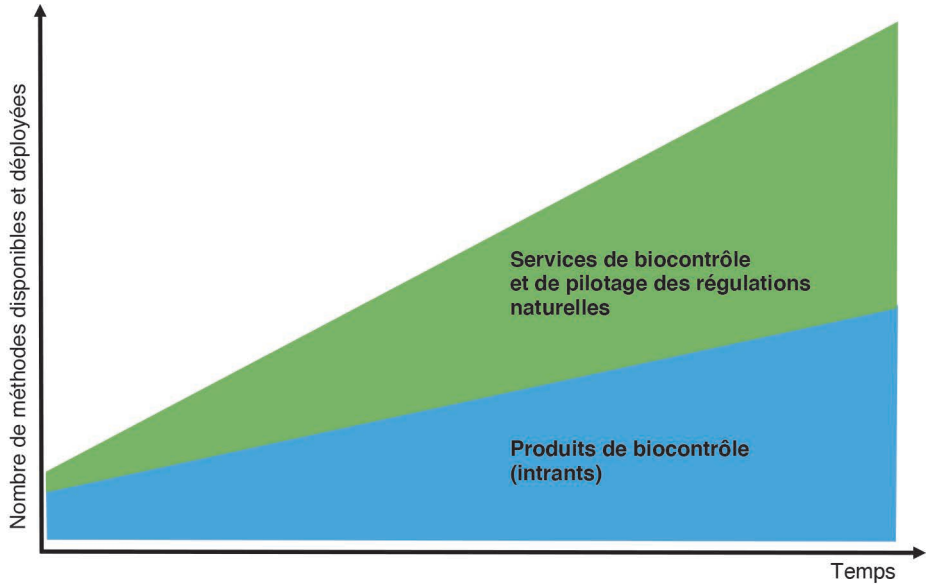

Figure 4.1. Effets attendus du paradigme zéro pesticide sur l'évolution en matière de recherche et d'innovation permettant l'essor de l'utilisation du biocontrôle : augmentation du nombre de méthodes disponibles et déployées, investissement privé et public, soutien politique et public, diversité des mécanismes biologiques mis en jeu, etc.

En termes pratiques, nous formulons les recommandations suivantes pour soutenir les fronts de recherche et d'innovation mentionnés dans ce chapitre : (i) mettre en

place des dispositifs de soutien et des actions de recherche et d'innovation sur les stratégies actuellement les plus sous-exploitées (et déviant des logiques classiques de produits), et rééquilibrer les efforts entre produits et services ; (ii) étudier les besoins, prioriser les actions et développer les stratégies de biocontrôle dans des systèmes de culture et filières durables utilisant déjà peu ou pas de pesticides. Ceci permettra de mettre au point les méthodes et outils dans des systèmes qui s'affranchissent le plus des contraintes implicites fixées par l'infrastructure héritée de l'ère des pesticides chimiques ; (iii) poursuivre le soutien aux recherches fondamentales ouvrant sur les perspectives de nouveaux modes d'action et de déploiement, comme cela a été notamment effectué dans le PPR « Cultiver et Protéger Autrement ». Ces trois types d'actions se veulent complémentaires et non exclusives vis-à-vis des dispositifs existants d'aide à la R&D privée.

Références bibliographiques

Alebeek F.A.N. van, Clevering O.A., 2005. Gebiedsplan FAB Hoeksche Waard : naar een aantrekkelijk platteland met een natuurlijke omgeving als probleemoplosser voor het agrarisch bedrijf, Lelystad, PPO AGV, 42 p.

Alseekh S., Scossa F., Wen W., Luo J., Yan J., Beleggia R., *et al.*, 2021. Domestication of crop metabolomes: desired and unintended consequences, *Trends in Plant Science*, 26(6):650-661. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.02.005

Bale J.S., van Lenteren J.C., Bigler F., 2008. Biological control and sustainable food production, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492):761-776. https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2182

Barratt B.I.P., Moran V.C., Bigler F., van Lenteren J.C., 2018. The status of biological control and recommendations for improving uptake for the future, *BioControl*, 63(1):155-167. https://doi.org/10.1007/s10526-017-9831-y

Barret M., Buée M., Mougel C., Vacher C., 2020. Le microbiote des plantes : diversité, transmission et fonction, *in* Fauvergue X., Rusch A., Barret M., Bardin M., Jacquin-Joly E., Malausa T., Lannou C. (éd.), *Biocontrôle : éléments pour une protection agroécologique des cultures*, Versailles, Editions Quae, p. 135-141. https://hal.inrae.fr/hal-03319624

Boons F., Lüdeke-Freund F., 2013. Business models for sustainable innovation: state-of-the-art and steps towards a research agenda, J*ournal of Cleaner Production*, 459-19. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.007

Borowiec N., Thaon M., Brancaccio L., Cailleret B., Ris N., Vercken E., 2018. Early population dynamics in classical biological control: establishment of the exotic parasitoid Torymus sinensis and control of its target pest, the chestnut gall wasp Dryocosmus kuriphilus, in France, *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 166(5):367-379. https://doi.org/10.1111/eea.12660

Boutet M., 2021. The curious case of the vanishing values: when value chain crashes value proposition of new agriculture product, in PROS, Rhodes. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03046189

Buitink J., Douzals J.-P., Duliege E., Lebeau F., Marchi M., 2020. Quelles technologies pour le déploiement du biocontrôle ?, *in* Fauvergue X., Rusch A., Barret M., Bardin M., Jacquin-Joly E., Malausa T., Lannou C. (éd.), *Biocontrôle : éléments pour une protection agroécologique des cultures*, Versailles, Editions Quae, p. 275-287. https://hal.inrae.fr/hal-02904672

Charles J.G., Sandanayaka W.R.M., Walker J.T.S., Shaw P.W., Chhagan A., Cole L.M., *et al.*, 2019. Establishment and seasonal activity in New Zealand of Mastrus ridens, a gregarious ectoparasitoid of codling moth Cydia pomonella, *BioControl*, 64(3):291-301. https://doi.org/10.1007/s10526-019-09939-z

Demil B., Lecocq X., 2010. Business model evolution: in search of dynamic consistency, *Long Range Planning*, 43(2-3):227-246. https://doi.org/10.1016/j.lrp.2010.02.004

Demil B., Lecocq X., Warnier V., 2018. "Business model thinking", business ecosystems and platforms: the new perspective on the environment of the organization, *M@n@gement*, Vol. 21(4):1213-1228. https://doi.org/10.3917/mana.214.1213

Eilenberg J., Hajek A., Lomer C., 2001. Suggestions for unifying the terminology in biological control, *BioControl*, 46(4):387-400. https://doi.org/10.1023/A:1014193329979

Gibbon P., 2001. Upgrading primary production: a global commodity chain approach, *World Development*, 29(2):345-363. https://doi.org/10.1016/S0305-750X(00)00093-0

Glass R., 2012. Biological control in the greenhouses of Almería and challenges for a sustainable intensive production, *Outlooks on Pest Management*, 23(6):276-279. https://doi.org/10.1564/23dec11

Gould F., 2008. Broadening the application of evolutionarily based genetic pest management, *Evolution*, 62(2):500-510. https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2007.00298.x

Herth A., Le Maire B., 2011. Le bio-contrôle pour la protection des cultures : 15 recommandations pour soutenir les technologies vertes, Rapport parlementaire auprès du Premier ministre.

INRAE, 2021. DEEP IMPACT. https://www6.inrae.fr/cultiver-proteger-autrement/Les-Projets/DEEP-IMPACT

Kenis M., Hurley B.P., Hajek A.E., Cock M.J.W., 2017. Classical biological control of insect pests of trees: facts and figures, *Biological Invasions*, 19(11):3401-3417. https://doi.org/10.1007/s10530-017-1414-4

Legros M., Marshall J.M., Macfadyen S., Hayes K.R., Sheppard A., Barrett L.G., 2021. Gene drive strategies of pest control in agricultural systems: challenges and opportunities, *Evolutionary Applications*, 001-17. https://doi.org/10.1111/eva.13285

Massa L., Tucci C.L., Afuah A., 2017. A critical assessment of business model research, *Academy of Management Annals*, 11(1):73-104. https://doi.org/10.5465/annals.2014.0072

Massart S., Martinez-Medina M., Jijakli M.H., 2015. Biological control in the microbiome era: challenges and opportunities, *Biological Control*, 8998-108. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2015.06.003

Mendras H., 1992. La fin des paysans ; suivi d'une réflexion sur la fin des paysans vingt ans après, Arles, Actes Sud, 446 p.

Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2021. Qu'est-ce que le biocontrôle ?,

Muneret L., Canard E., Rusch A., 2020. Ecologie des communautés, réseaux trophiques et régulation naturelle, *in* Fauvergue X., Rusch A., Barret M., Bardin M., Jacquin-Joly E., Malausa T., Lannou C. (éd.), *Biocontrôle : éléments pour une protection agroécologique des cultures*, Versailles, Editions Quae, p. 91-107. https://hal.inrae.fr/hal-03319634

Mur L.A.J., Simpson C., Kumari A., Gupta A.K., Gupta K.J., 2017. Moving nitrogen to the centre of plant defence against pathogens, *Annals of Botany*, 119(5):703-709. https://doi.org/10.1093/aob/mcw179

Naranjo S., Frisvold G.B., Ellsworth P., 2019. Economic value of arthropod biological control, in Onstad D.W., Crain P. (éd.), *The Economics of Integrated Pest Management of Insects*, CABI, p. 48-95.

Paulin M.J., Rutgers M., de Nijs T., Hendriks A.J., Koopman K.R., Van Buul T., *et al.*, 2020. Integration of local knowledge and data for spatially quantifying ecosystem services in the Hoeksche Waard, the Netherlands, *Ecological Modelling*, 438109331. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109331

Pérez-Staples D., Díaz-Fleischer F., Montoya P., 2021. The sterile insect technique: success and perspectives in the neotropics, *Neotropical Entomology*, 50(2):172-185. https://doi.org/10.1007/s13744-020-00817-3

Porter M.E., 2008. Competitive advantage: creating and sustaining superior performance, New York, Simon and Schuster, 519 p.

PRISME, 2021. PRISME des gens de terrain, PRISME Consortium,

Sadd B.M., Schmid-Hempel P., 2009. PERSPECTIVE: Principles of ecological immunology, *Evolutionary Applications*, 2(1):113-121. https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2008.00057.x

Sanchez C., Gallego J.R., Gamez M., Cabello T., 2014. Intensive Biological Control in Spanish Greenhouses: Problems of the Success, *International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering*, 8(10):1123-1127. https://doi.org/10.5281/zenodo.1096489

Schaltegger S., Hansen E.G., Lüdeke-Freund F., 2016. Business models for sustainability: origins, present research, and future avenues, *Organization & Environment*, 29(1):3-10. https://doi.org/10.1177/1086026615599806

Shade A., Jacques M.-A., Barret M., 2017. Ecological patterns of seed microbiome diversity, transmission, and assembly, *Current Opinion in Microbiology*, 3715-22. https://doi.org/10.1016/j.mib.2017.03.010

SIR, 2021. OKSIR Mission & Vision

Steingröver E.G., Geertsema W., van Wingerden W.K.R.E., 2010. Designing agricultural landscapes for natural pest control: a transdisciplinary approach in the Hoeksche Waard (The Netherlands), *Landscape Ecology*, 25(6):825-838. https://doi.org/10.1007/s10980-010-9489-7

Thistlewood H.M.A., Judd G.J.R., 2019. Twenty-five years of research experience with the sterile insect technique and area-wide management of codling moth, Cydia pomonella (L.), in Canada, *Insects*, 10(9):292. https://doi.org/10.3390/insects10090292

Vanhaverbeke W., Cloodt M., 2006. Open innovation in value networks, *in* Chesbrough H., Vanhaverbeke W., West J. (éd.), *Open innovation: researching a new paradigm*, Oxford, UK, Oxford University Press, p. 258-281.

van Lenteren J.C., 2012. The state of commercial augmentative biological control: plenty of natural enemies, but a frustrating lack of uptake, *BioControl*, 57(1):1-20. https://doi.org/10.1007/s10526-011-9395-1

van Lenteren J.C., Bolckmans K., Köhl J., Ravensberg W.J., Urbaneja A., 2018. Biological control using invertebrates and microorganisms: plenty of new opportunities, *BioControl*, 63(1):39-59. https://doi.org/10.1007/s10526-017-9801-4

Villemaine R., Compagnone C., Falconnet C., 2021. The social construction of alternatives to pesticide use: a study of biocontrol in Burgundian viticulture, *Sociologia Ruralis*, 61(1):74-95. https://doi.org/10.1111/soru.12320

Walters D.R., Ratsep J., Havis N.D., 2013. Controlling crop diseases using induced resistance: challenges for the future, *Journal of Experimental Botany*, 64(5):1263-1280. https://doi.org/10.1093/jxb/ert026

Chapitre 5

Développer des espèces et des variétés permettant la reconception des systèmes de culture

Anne Laperche, Mélanie Jubault, Maria Manzanares-Dauleux, Matthieu Carof, Edith Le Cadre

Introduction

De la domestication aux notions d'espèce cultivée et de variété

Les espèces végétales cultivées actuellement sont pour la plupart issues de la domestication par l'Homme au Néolithique, d'ancêtres dits sauvages. La domestication consiste à fixer un certain nombre de gènes impliqués dans le contrôle de caractères favorisant l'utilisation et la culture par les humains (augmentation de la taille de grains, limitation de la déhiscence pour faciliter la récolte, limitation du nombre de ramifications pour une floraison et une maturité plus groupée, etc.). Ce processus initial sélectif, pendant lequel les humains influencent la dispersion et la reproduction d'une autre espèce, est accompagné d'une baisse drastique de diversité génétique pour l'espèce nouvellement domestiquée, notamment due à la rapidité du processus (syndrome de domestication). En effet, seul un nombre limité d'individus sauvages étant à l'origine de l'espèce cultivée, cette domestication s'accompagne d'une forte réduction de la diversité génétique présente dans le compartiment cultivé en comparaison de celle présente dans le compartiment sauvage. Depuis le Néolithique, un nombre relativement restreint d'espèces cultivées ont vu le jour et se sont répandues au gré des migrations et/ou échanges intercontinentaux,

comme par exemple lors de la migration des premiers cultivateurs hors du croissant fertile ou de la découverte du Nouveau Monde par Christophe Colomb important la tomate, le haricot, le maïs… en Europe. La base génétique des populations cultivées, après une première réduction liée à la domestication, tend ensuite à se réenrichir au gré du temps, de l'apparition des mutations spontanées (la fréquence de mutation naturelle d'un gène est d'environ de 10^{-6} par génération), des flux entre les populations de plantes et enfin de la diversité des agroécosystèmes dans lesquels elles évoluent en lien avec les échanges et mouvements de l'Histoire. La découverte au XIXe siècle de la génétique mendélienne (redécouverte des lois de Mendel en 1900 par Hugo de Vries, Carl Correns et Erich von Tschermak-Seysenegg) puis de la structure de l'ADN (Watson et Crick, 1953) a ensuite accéléré le progrès génétique, défini comme le gain pour un caractère donné dans la population sélectionnée par rapport à la moyenne de la population initiale.

Le terme « variété » est le plus souvent consacré dans le monde agricole pour définir à l'intérieur d'une espèce végétale une population artificielle, constituée d'individus proches génétiquement, présentant des caractéristiques agronomiques définies, et qui est considérée comme reproductible eu égard à son aptitude à être reproduit de manière conforme. Ces variétés sont inscrites au sein d'un catalogue, ce qui permet leur commercialisation. La sélection végétale a pour objectif de créer de nouvelles variétés adaptées aux besoins des agriculteurs, des transformateurs et des consommateurs. Pratiquée dès les premiers temps de l'agriculture, les techniques et schémas de sélection n'ont cessé de s'enrichir accélérant la création de nouvelles variétés et le progrès génétique. Parmi les plantes cultivées, le blé tendre (*Triticum aestivum*) est un cas d'école (Venske *et al.*, 2019). Les premières variétés semées par les agriculteurs, ou variétés locales, ou encore « blés de pays », correspondaient à des populations d'individus présentant des caractéristiques communes (précocité par exemple) mais présentant encore une diversité génétique à l'intérieur de ces populations (ce qui correspond à la définition actuelle de « variété population »). Ces variétés étaient maintenues par les agriculteurs, une partie de la récolte servant de semences pour la culture suivante. À partir d'environ 1850, le métier d'obtenteur se spécialise et ces variétés sont progressivement remplacées par des variétés dites « lignées pures » pour lesquelles tous les individus sont génétiquement identiques et dont les caractères sont conservés d'une génération à l'autre (la première variété de blé issue de croisements contrôlés est Dattel, inscrite en 1884). Puis, à partir des années 1945, de nouveaux géniteurs sont utilisés pour obtenir des variétés à fort potentiel de rendement largement distribuées dans le monde entier dans le cadre de la révolution verte, plus résistantes à la verse grâce à l'incorporation de gènes de nanisme et de modification de la sensibilité à la photopériode (ce qui valut le prix Nobel de la paix à Norman Borlaug en 1970 pour ses travaux ayant contribué à lutter contre la faim dans le monde). Dès lors, les variétés à haut potentiel, cultivées en peuplement monospécifique, se sont largement répandues mais au détriment d'une diversité génétique des espaces cultivés, et ce combiné à une spécialisation des territoires réduisant les espèces présentes dans l'assolement et la rotation. Progressivement, de nouveaux enjeux, notamment écologiques et environnementaux, ont conduit à introduire de nouveaux critères de sélection dans les schémas de sélection en particulier pour réduire l'utilisation de fertilisants et de pesticides en recherchant pour ces derniers la résistance et la tolérance aux bioagresseurs.

Concernant la lutte contre les maladies, la recherche des gènes de résistance chez les plantes a d'abord porté sur les mécanismes de reconnaissance de l'agent pathogène (gènes *R*). Ces gènes de résistance totale ont ensuite été introduits dans des variétés pour limiter l'utilisation de pesticides (Gururani *et al.*, 2012), mais rapidement ces variétés ont été confrontées au contournement de ces résistances par les agents pathogènes (encadré 5.1), diminuant leur efficacité. La durabilité des gènes de résistance et la diversification des mécanismes de résistance restent à l'heure actuelle un enjeu majeur de la création variétale.

Encadré 5.1. Éviter le contournement des résistances : un concept clé pour une agriculture sans pesticides

Les agents pathogènes établissent des relations intimes et complexes avec les plantes hôtes pour obtenir les nutriments nécessaires à leur croissance et leur développement. L'évolution des plantes s'est donc accompagnée d'une évolution du cortège de microorganismes et autres organismes tant bénéfiques que pathogènes. En retour, les plantes ont mis en place un ensemble de processus leur conférant la capacité à résister aux infections.

Depuis environ 80 ans, la création de nouvelles variétés résistantes permettant l'amélioration des rendements a été privilégiée au moyen de la sélection de variétés présentant un ou plusieurs gènes majeurs de résistance (gènes *R*). La présence, dans une population, d'individus résistants limite la reproduction de l'agent pathogène visé par le ou les gènes de la nouvelle variété. En retour, la présence de ces individus résistants exerce une pression de sélection sur les populations pathogènes favorisant l'émergence de nouveaux variants pouvant contourner le ou les gènes de résistance de la plante. Cette course à l'armement, ou « théorie de la Reine rouge » (van Valen, 1973), est une des théories mobilisables pour expliquer pourquoi un organisme évolue constamment avec son environnement. Ces processus évolutifs, comme le mutualisme entre la plante et des organismes bénéfiques, peuvent également être à l'origine de mécanismes de défense. La vitesse de contournement de la résistance conférée par des gènes *R* est souvent rapide. Généralement en deux à cinq ans, la résistance d'une espèce est contournée (Gasselin et Clément, 2006).

Dès 1995, Michel Griffon pose les bases d'une nouvelle approche de l'agriculture vers une révolution « doublement verte » qui donne un nouveau cadre à la sélection variétale et qui a depuis évolué avec la progression des pratiques agroécologiques. La sélection variétale est un levier majeur pour y contribuer. Elle doit donc désormais être multifactorielle intégrant dès lors les objectifs de durabilité environnementale, économique et socialement juste, notamment en prenant en compte les processus écologiques des espèces et des milieux dans lesquelles elles sont cultivées. Il s'agit donc d'un profond renouvellement de la sélection végétale nécessitant une prise en compte des mécanismes d'adaptation et d'interaction de la plante avec son environnement biotique et abiotique. Or, si historiquement les différents critères étaient intégrés dans un génotype unique, d'autres possibilités sont à prendre en compte pour répondre à ces nouveaux enjeux. Ainsi, la diversification par le mélange d'espèces ou le mélange de variétés est une piste prometteuse pour le développement de systèmes agroécologiques, mais nécessite de disposer de variétés adaptées ayant un bon comportement en

mélange (adaptabilité dans un contexte de compétition plante/plante) (Finckh, 2008). Ces derniers critères ne sont pour l'instant que peu abordés par les programmes de sélection bien que la filière « semence » ait désormais une réflexion active avec les organismes nationaux de recherche, dont l'INRAE, en ce sens.

Le choix de la variété dans des systèmes de culture à zéro pesticide

L'atteinte des objectifs de production d'un système de culture repose en partie sur les différentes variétés accessibles aux agriculteurs (encadré 5.2). En effet, la première étape d'un itinéraire technique d'une culture donnée est le choix de la variété, duquel dépendra nombre de choix techniques ultérieurs, en particulier parce que la capacité des plantes à valoriser les ressources du milieu ou à se défendre vis-à-vis des bioagresseurs diffère entre variétés. Le choix de celle-ci est donc crucial et nécessite une anticipation et une prise de risque par l'agriculteur, qui intègre dans son processus de décision des critères dictés par des caractéristiques propres à son système de production : le milieu biophysique de son exploitation, la place de la culture dans la rotation, les débouchés de sa production, etc. Dans la lutte contre les bioagresseurs, le levier génétique ne se résume évidemment pas au seul choix variétal ; il concerne également le choix des espèces assolées et la manière de les combiner dans le temps (comme la succession des espèces sur une même parcelle) et dans l'espace (comme l'association d'espèces).

Comme cet ouvrage le présente, l'objectif d'une agriculture zéro pesticide incite à l'identification des meilleures combinaisons de leviers existants selon les échelles et contextes agricoles. La création variétale est un des atouts pour cette ambition, mais c'est aussi un de ses verrous actuels car elle réinterroge non seulement la recherche disciplinaire mais également le dialogue interdisciplinaire pour intégrer les mécanismes complexes d'interactions entre le peuplement végétal et son environnement biotique et abiotique. L'objectif d'une agriculture zéro pesticide interroge également (i) les critères d'évaluation des espèces et variétés inscrites au catalogue et (ii) l'adaptation de la chaine de transformation pour tenir compte de ces nouvelles variétés. Par conséquent, il est essentiel de renforcer le dialogue interdisciplinaire et inter organisationnel lors des différentes étapes de la création variétale (voir p. 160-169).

Encadré 5.2. Qu'est-ce que l'inscription au catalogue ?

Depuis 1932, un catalogue des espèces et variétés officiel créé par l'État permet de répertorier les caractéristiques de chaque variété afin que l'utilisateur final puisse choisir la plus adéquate en fonction de ses besoins. Légalement, toute personne ou organisation peut inscrire une nouvelle variété. Cependant, pour être reconnue comme nouvelle variété, un ensemble de critères doivent être remplis. Ce sont les tests DHS (distinction, homogénéité, stabilité) auxquels s'ajoutent les tests VATE (valeur agronomique, technologique et environnementale) pour les espèces de grande culture, fourragères et gazons. Les tests VATE permettent de comparer les différentes variétés candidates à l'inscription pour des caractères tels que le rendement, la résistance aux maladies et ravageurs et

…

…

la qualité des produits. L'objectif du catalogue est donc d'apporter une sécurité à l'utilisateur de la semence sur les caractéristiques de celle-ci, notamment au regard de ses qualités distinctives. Toute inscription doit être approuvée par les services de l'État sur la base d'un avis consultatif du Comité technique permanent de la sélection. Plusieurs « listes » existent au sein du catalogue permettant à la fois de recenser des variétés à destination commerciale agricole, mais aussi des variétés légumières menacées d'érosion génétique ou sans valeur commerciale intrinsèque (comme par exemple les variétés anciennes). Les critères d'inscription au catalogue ne sont pas figés mais évoluent dans le temps. Par exemple, le Grenelle de l'environnement de 2007 a permis d'introduire des critères environnementaux, ou de préparer l'inscription de variétés adaptées à l'AB et permettent aux pouvoirs publics d'orienter le progrès génétique. Les variétés inscrites sur le catalogue national sont intégrées au catalogue européen et peuvent dès lors être cultivées dans l'ensemble de l'Europe. Les caractéristiques de DHS sont également utilisées pour assurer la protection intellectuelle de la variété via la délivrance d'un COV, droit *sui generis* établi par la Convention de Paris de 1961 et qui exclut la protection des obtentions végétales par le droit des brevets.

⏩ Quels défis pour l'amélioration des plantes dans une agriculture sans pesticides ?

Valoriser la diversité génétique des variétés et les interactions plante-plante comme levier contre les agents pathogènes, les ravageurs, les adventices

Le développement d'une agriculture sans pesticides nécessite de repenser les systèmes de culture et les itinéraires techniques, et donc le rôle ou les apports attendus des futures variétés. Dans ce nouveau contexte, la régulation des populations de bioagresseurs repose principalement sur la gestion et l'optimisation des régulations biologiques et écologiques à différentes échelles spatiales (parcelle, exploitation agricole, territoire), elles-mêmes largement dépendantes du niveau de diversité présent au champ. Dès lors, le choix de la variété est un levier permettant d'influencer la diversité génétique au sein d'une parcelle et/ou d'une exploitation. Ces variétés doivent alors être pensées pour s'inscrire dans un cadre agroécologique, c'est-à-dire en valorisant les interactions biologiques, dont les interactions plante-plante. Le schéma majoritaire actuellement est celui de cultures monospécifiques et monovariétales reposant sur des variétés homogènes (lignées pures, clones, hybrides F1). Il nécessite d'être revu puisque les variétés de demain seront cultivées dans des systèmes optimisant la diversité génétique, c'est-à-dire cultivées en mélange, que ce soit avec d'autres espèces (comme les associations céréales-légumineuses ou comme c'est déjà largement le cas pour les prairies temporaires) ou bien en mélanges variétaux à l'échelle intra spécifique. Dans les deux cas, les variétés retenues devront présenter des caractéristiques intrinsèques intéressantes (par exemple de bons niveaux de résistance aux bioagresseurs), mais aussi de bonnes capacités d'aptitude au mélange.

Considérons en premier lieu l'échelle intraspécifique. À cette échelle, il est raisonnable de penser que dans un contexte de cortèges de bioagresseurs incertain, il est peu probable qu'une seule variété puisse présenter l'ensemble des caractères favorables d'adaptation. Le mélange variétal apparait dès lors comme une solution prometteuse pour combiner différents caractères favorables au sein d'un même peuplement. Dans les mélanges variétaux, la présence de plusieurs variétés peut ainsi accroître la résistance aux agents pathogènes. En effet, chaque variété apporte des gènes de résistance différents et diminue la pression de sélection vis-à-vis des souches pathogènes à l'échelle de la parcelle cultivée. En outre, mélanger des variétés permet aussi de cumuler des effets modifiant la dynamique des populations des agents pathogènes en limitant la dispersion des spores par effet *splash* (Vidal *et al.*, 2018), avec par exemple des hauteurs différentes de plantes ou en modifiant le microclimat. Chez le blé tendre, en l'absence de protection fongique, la culture de variétés en mélange s'est avérée plus performante que la moyenne des variétés constituant le mélange prises individuellement. Chez le colza, un mélange variétal 95/5, avec seulement 5 % d'une variété très précoce, permet de lutter efficacement contre les dégâts liés aux méligèthes. Les associations de cultures, sont également un levier important d'adaptation à une agriculture zéro pesticide, notamment pour limiter et réguler par effet dilution ou barrière, les dégâts d'insectes ou de limaces, le développement des adventices ainsi que le développement des maladies. En outre, les associations de cultures, plus hétérogènes dans le temps et dans l'espace, favorisent l'établissement d'une biodiversité associée dans la parcelle cultivée permettant la fourniture de plusieurs services écosystémiques. À titre d'exemple, 25 % des surfaces de colza cultivées en AB sont des colzas associés à une légumineuse (principalement pour lutter contre les dégâts d'insectes à l'automne), et 12 % des surfaces de blé étaient cultivées en mélange en 2020.

Le défi pour les sélectionneurs réside donc dans la capacité à évaluer et sélectionner les futures variétés pour leur valeur en propre mais aussi pour leur capacité à être mélangées et à optimiser les interactions entre plantes voisines au sein de la parcelle cultivée (Annicchiarico *et al.*, 2019). Dans un premier temps, des démarches empiriques peuvent être mises en œuvre, mais à terme, la connaissance fine des processus génétiques et écologiques impliqués permettra de cibler des nouveaux traits de sélection, correspondant à des services complémentaires et optimisés dans les nouvelles variétés-composantes proposées au mélange. Dans des environnements de plus en plus incertains, il devient plus difficile de prédire quelle sera la meilleure variété, de même qu'il est compliqué de pouvoir cumuler tous les caractères favorables dans une seule variété, et ce en raison de compromis entre traits impliqués dans l'adaptation. L'adaptation locale du matériel végétal résidera, en partie, dans les interactions positives entre les différentes variétés et/ou espèces implantées simultanément dans la même parcelle. Le type d'interaction plante-plante dans l'espace et dans le temps via la partition de niches (complémentarité) ou la facilitation, concernent par exemple l'accès aux ressources minérales et hydriques (exploration du sol par le système racinaire, recrutement du microbiote de la rhizosphère, efficacité d'utilisation des nutriments : azote, phosphore, etc.), la résistance/tolérance par rapport à différents agents pathogènes, l'utilisation de la ressource lumineuse (Díaz et Cabido, 2001 ; Hinsinger *et al.*, 2011). Or, les interactions plante-plante sont contexte-dépendantes, c'est à dire fortement conditionnées par le niveau de ressources (eau,

azote, etc.) définissant un niveau de stress abiotique perçu. Cette modification des interactions plante-plante est théorisée par la théorie du gradient de stress (Stefan *et al.*, 2021). Néanmoins, la complémentarité recherchée reste déterminée par la diversité génétique des mélanges. Construire un mélange optimisé conduit donc à cibler les principaux traits pour le système de production visé, puis à identifier les composantes (variétés ou espèces) dont les traits sont différents et complémentaires (par exemple en jouant sur la précocité, la profondeur d'enracinement, les mécanismes de résistance aux maladies, l'architecture aérienne, etc.). Il s'agit aussi ici de favoriser une sélection pour l'hétérogénéité (augmenter la variance) (Litrico et Violle, 2015). L'enjeu est aussi technique car il faut pouvoir décrire et phénotyper ces caractères complexes pour un grand nombre de génotypes, tout en rendant compte du comportement au champ et en mélange. Ces questionnements correspondent à des thématiques de recherche émergentes et prometteuses en cherchant à optimiser l'aptitude aux mélanges spécifiques ou interspécifiques, comme dans le cadre des projets MOBIDIV sur le blé tendre (encadré 5.3), ou SPECIFICS pour les légumineuses (encadré 3.2). Ils explorent également de nouveaux traits fonctionnels, comme l'interaction entre la plante et son microbiote racinaire, notamment pour améliorer la résistance du colza et du blé à des stress biotiques (projet DEEP IMPACT, encadré 4.2).

Encadré 5.3. Le projet de recherche MOBIDIV : mobiliser et sélectionner la diversité cultivée intra et interspécifique pour un changement systémique vers une agriculture sans pesticides (PPR CPA – 2020/2026)

La diversité intra-parcelle est un levier majeur pour atteindre une agriculture sans pesticides car elle permet des régulations uniques et essentielles à travers les interactions entre les plantes. Cependant, les mécanismes causaux d'interaction plante-plante sont encore mal compris. Par ailleurs, la sélection de mélanges de variétés et d'espèces implique un changement important dans les méthodes et l'organisation du secteur des semences. Dans ce cadre, MOBIDIV a pour objectif de produire et diffuser les connaissances scientifiques pour une amélioration des plantes dédiée à la diversification intra-parcelle.

Un premier objectif du projet est d'identifier les dynamiques de diversification en France et leurs déterminants technico et socio-économiques, et d'étudier les pratiques de diversification intra-parcelle chez certains agriculteurs. Deuxièmement, les mécanismes des interactions plante-plante favorisant le contrôle des bioagresseurs sont étudiés par des approches d'écologie fonctionnelle et de génétique couplées à des modèles. Ces mécanismes sont mobilisés dans des essais au champ pour concevoir des gradients de diversité génétique et fonctionnelle et évaluer leurs impacts sur l'incidence et l'adaptation des bioagresseurs, ainsi que sur les services écosystémiques. Troisièmement, des méthodes génétiques et statistiques novatrices sont mises en œuvre pour permettre de construire des schémas de sélection et d'évaluation de mélanges. En parallèle, des approches participatives, permettant de coconcevoir et sélectionner un large éventail de mélanges, de variétés et de populations, et d'évaluer leur adaptation aux contextes locaux sont mises en œuvre. Enfin, des scénarios sont élaborés pour adapter les standards de marché, ainsi que l'organisation et le financement de la recherche et du conseil agricole dans un objectif de diversification des cultures (INRAE, 2021b).

La durabilité de la résistance au regard de la connaissance de la biologie des bioagresseurs

Les connaissances acquises au cours des dernières décennies sur les bases moléculaires de la pathogenèse et les interactions plantes-agents pathogènes ont contribué au développement de stratégies de sélection dans le but d'améliorer la résistance des espèces cultivées aux maladies. Les sélectionneurs se sont longtemps appuyés sur l'utilisation de résistances sous contrôle monogénique du fait de leurs effets forts et de leur facilité d'exploitation en sélection. Ces résistances reposent sur la présence de gènes de résistance appelés gènes *R* (*R-genes*) qui codent généralement pour des récepteurs immunitaires reconnaissant directement ou indirectement des molécules de l'agent pathogène et déclenchant des réponses de défense fortes et rapides chez la plante (encadré 5.4). Cependant, les mutations et les changements de virulence dans les populations d'agents pathogènes rendent l'efficacité de ces gènes *R* – spécifiques à une souche de l'agent pathogène – de courte durée. Contrairement au niveau élevé de résistance conféré par les gènes *R*, la résistance contrôlée par des loci à effet quantitatif (QTL, pour *quantitative trait loci*) et mineur est considérée comme plus durable et n'est généralement pas spécifique de la souche de l'agent pathogène. Cependant, du fait de leur faible effet, il est nécessaire, pour atteindre un niveau de résistance élevé, de cumuler plusieurs QTL au sein d'un même génotype ou de les combiner aux résistances monogéniques contrôlées par les gènes *R*. Ainsi, le pyramidage (association de gènes *R* et/ou de QTL au sein d'une même variété), avec des spectres de résistance ou des modes d'action complémentaires, peut produire des effets additifs et synergiques sur le niveau et le spectre de résistance. Bien que la combinaison de gènes *R* et de QTL dans le même fonds génétique soit efficace pour le contrôle des maladies, l'intégration de ces deux types de résistance dans un cultivar élite est techniquement difficile, notamment du fait de la méconnaissance des gènes sous-jacents aux QTL et de leurs interactions avec le fonds génétique et l'environnement.

Encadré 5.4. Deux types de défenses chez les plantes : constitutives et induites

Les plantes disposent d'un arsenal défensif afin de se protéger contre leurs bioagresseurs. On distingue deux types de stratégies de défense, l'une passive ou constitutive et une autre dite active ou induite en réponse à la présence d'un bioagresseur. La résistance constitutive correspond aux moyens de défense passifs de la plante de type barrière, comme l'épaisseur des parois cellulaires ou les cuticules cireuses. La résistance induite apparaît lorsque, sous l'influence du stimulus inducteur produit par la reconnaissance du bioagresseur, un signal mobile est généré et transporté vers d'autres parties de la plante où il renforce les mécanismes qui fonctionnent normalement pour limiter l'infection, la croissance, la multiplication et la propagation des champignons, bactéries et virus.

Ainsi, lors du pyramidage de gènes *R* et/ou de QTL, un gène *R* peut masquer les effets des autres loci de résistance et le fond génétique des variétés peut affecter le phénotype de résistance. Les effets des combinaisons des différents gènes *R* et de QTL ne sont donc pas prévisibles et doivent être testés dans différents fonds génétiques avant d'être utilisés dans les programmes de sélection. Des études plus approfondies des

mécanismes qui sous-tendent les effets synergiques ou antagonistes des différentes combinaisons de gènes ou QTL de résistance et de fonds génétiques, fourniraient de nouvelles informations essentielles pour la sélection de résistances durables à large spectre. D'autres pistes de recherche sont également à l'étude comme l'identification des gènes de résistance qui « équilibrent » le compromis entre résistance et rendement (Deng *et al.*, 2017 ; Wang *et al.*, 2018), ou limitent l'effet négatif des protéines de défense sur la croissance des plantes (Xu *et al.*, 2017).

D'autre part, l'interaction entre les plantes et les microorganismes pathogènes est fortement influencée par de multiples facteurs environnementaux tels que la température, l'humidité, la lumière et les nutriments. Le stress nutritionnel causé par un excès ou une carence en nutriments (azote, phosphate, fer, cuivre, etc.) peut affecter la réponse de la plante à l'infection par un agent pathogène et modifier ainsi le résultat de l'interaction. Le stade de la plante et la présence d'organes reproducteurs qui vont consommer beaucoup de nutriments peuvent donc modifier l'interaction entre plantes et microorganismes pathogènes. L'impact du stress nutritionnel sur la résistance aux maladies est difficile à prévoir, car les résultats diffèrent fortement selon l'identité des partenaires en interaction (hôte et pathogène). Du point de vue de la plante hôte, la complexité de l'interaction entre la nutrition et le développement de la maladie est liée aux différentes combinaisons des loci de résistance présentes dans chaque génotype de plante et à la réactivité de chacun des loci de résistance (*R* ou QTL) à la contrainte. Par exemple, la disponibilité de l'azote a un effet sur le métabolisme primaire et secondaire de la plante qui, à son tour, peut affecter les réponses de défense de l'hôte. Tout en favorisant la croissance de la plante, un apport élevé d'azote peut entraîner une diminution de la formation de lignine et une réduction de l'épaisseur de la paroi cellulaire secondaire, qui constitue la barrière physique de la plante contre les infections par des agents pathogènes. Un génotype de colza sensible à la hernie des crucifères en conditions non-limitantes peut ainsi s'avérer résistant en conditions d'azote réduites (Laperche *et al.*, 2017). Du point de vue de l'agent pathogène, la pathogénicité des champignons par exemple peut être affectée par la disponibilité de l'azote. La sensibilité induite par l'azote à la pyriculariose du riz est associée à l'induction de gènes du riz impliqués dans le recyclage de l'azote et à une augmentation de la pathogénicité de *Magnaporthe oryzae* (Huang *et al.*, 2017). Contrairement à ce qui est observé chez le riz, la fertilisation azotée réduit la gravité des maladies causées par *Verticillium* spp. chez les espèces de *Solanum*, ce qui indique qu'aucun modèle générique ne peut décrire le rôle de l'azote dans une interaction donnée (Veresoglou *et al.*, 2013). En ce qui concerne la nutrition en phosphate, des preuves émergentes soutiennent l'existence d'une diaphonie entre le mécanisme de signalisation de la privation de phosphate et les réponses immunitaires chez les plantes. Cependant, notre connaissance des interactions entre les mécanismes d'adaptation des plantes à l'excès de phosphate et l'immunité est encore limitée. Le déterminisme génétique contrôlant la résistance aux maladies peut ainsi être fortement modifié en fonction des pratiques culturales. Pourtant, même si lors de l'inscription des variétés au catalogue une attention particulière est désormais apportée à l'adaptation de la variété aux conditions environnementales et de culture, notamment son efficience vis-à-vis de l'eau et l'azote (évaluation VATE), la sélection des variétés résistantes se fait actuellement majoritairement

en conditions de culture non-limitantes qui ne sont pas celles attendues dans des systèmes agroécologiques.

Concernant les insectes nuisibles, la recherche de résistance aux insectes de la plante s'est jusqu'à présent concentrée sur l'identification des principaux gènes de résistance (gènes *R*) et à des interactions simples gène pour gène alors qu'en réalité elle est susceptible d'être polygénique et d'impliquer de multiples gènes ou voies, similaires à ce qui est observé pour la résistance aux agents pathogènes. Bien que la défense au travers de caractères morphologiques (augmentation du nombre de trichomes, sclérophyllie, dépôt de latex, etc.) soit principalement utilisée par les plantes contre les insectes nuisibles, la défense biochimique est considérée comme plus efficace car elle affecte directement la croissance et le développement des insectes. Par ailleurs, la résistance induite en réponse à l'attaque des insectes herbivores rend les plantes hôtes phénotypiquement plastiques et les tissus végétaux moins nutritifs, ce qui en fait un choix alimentaire moins attrayant et pratiquement insipide pour les insectes nuisibles. Cependant, divers insectes peuvent tolérer ou détoxifier certains métabolites secondaires des plantes, et certaines espèces d'insectes utilisent les composés secondaires des plantes comme indicateurs nécessaires à l'alimentation ou à la ponte (Schoonhoven *et al.*, 2005). En outre, il existe de nombreuses preuves que de nombreux insectes phytophages ont coévolué avec le profil des métabolites secondaires de leurs plantes hôtes (Futuyma et Agrawal, 2009), complexifiant la conception et la gestion de la résistance des cultures basée sur la chimie des métabolites secondaires.

Beaucoup d'espèces cultivées présentent une synthèse de métabolites secondaires et une toxicité pour les animaux très réduite par rapport aux espèces végétales sauvages apparentées. Ainsi, la domestication de la tomate (*Lycopersicon esculentum*) s'est accompagnée de la perte de deux gènes (*zFPP* et *ShZIS*) codant des enzymes qui synthétisent le sesquiterpène 7-épizingibérène. La tomate cultivée présente une meilleure protection vis-à-vis de trois espèces d'insectes, suite à l'introgression de ces gènes à partir d'une espèce de tomate sauvage. Certains taxons végétaux ont toutefois conservé leur toxicité suite à la domestication. Par exemple, le tubercule de la pomme de terre est riche en glycoalcaloïdes, le tubercule du manioc contient des glycosides cyanogènes et de nombreuses espèces de légumineuses contiennent des alcaloïdes. Il a été avancé que la domestication de certaines cultures incluait une sélection pour la toxicité, à savoir que les toxines confèrent une protection contre les prédateurs, y compris les insectes, mais sont inactivées par la cuisson et d'autres traitements avant la consommation humaine (McKey *et al.*, 2010).

D'autre part, et si l'interaction entre légumineuses et rhizobium est connue et utilisée depuis plusieurs siècles, il existe désormais des preuves irréfutables que la nutrition, la fonction immunitaire et le bien-être général des plantes et des animaux dépendent des activités des communautés microbiennes présentes sur leurs surfaces et dans leurs tissus, et ceci pour l'ensemble des espèces (encadré 5.8). Les interactions avec les microorganismes revêtent une importance particulière pour les interactions plantes-insectes, car il est prouvé que les communautés microbiennes des plantes, y compris les endophytes fongiques et les champignons mycorhiziens, peuvent influencer l'herbivorie et que la gamme de plantes hôtes de certains insectes est façonnée par leur microbiome (Casteel et Hansen, 2014). Bien que la plupart des recherches menées à ce jour se soient concentrées presque exclusivement sur les

fondements de l'impact microbien sur les interactions plantes-insectes, les possibilités de protection des cultures sont de plus en plus envisagées. Des travaux récents montrent que le microbiote du sol module l'expression de la hernie des crucifères chez le colza, via la régulation des transcriptomes de la plante hôte et du bioagresseur simultanément (Daval *et al.*, 2020).

Sélectionner en prenant en compte l'impact à long terme

L'intégration d'objectifs sociétaux ou environnementaux en amélioration des plantes nécessite d'intégrer d'autres services écosystémiques que la production comme la réduction de l'érosion, le stockage du carbone ou la qualité de l'eau (Brummer *et al.*, 2011). Dans cet objectif, il est nécessaire d'intégrer des concepts écologiques d'interaction plante-environnement modulés par les microorganismes (Gopal et Gupta, 2016). À titre d'exemple, la création variétale peut être mobilisée pour contribuer au maintien dans le sol d'un microbiome dans lequel les plantes peuvent recruter des organismes leur permettant de mieux se défendre vis à vis d'agents pathogènes ou de ravageurs mais également d'améliorer leur nutrition (Hunter *et al.*, 2014). Le fonctionnement de la rhizosphère, la zone de sol soumise à l'activité des racines, est une interface majeure entre la plante et son milieu (Carof *et al.*, 2018) et la capacité des plantes à recruter et à se maintenir dans cet environnement est crucial pour une agriculture zéro pesticide (encadré 5.5).

Encadré 5.5. Le défi d'une sélection variétale multi objectifs intégrant productivité et maintien des services écosystémiques via la biodiversité associée et cultivée

Le choix de l'espèce et du génotype induit des effets notables sur le fonctionnement de l'agroécosystème. Les multiples attentes sociétales et environnementales imposent de prendre en compte plusieurs critères de sélection qui remettent en cause le principe d'un génotype unique couvrant l'ensemble des objectifs assignés à une espèce cultivée. Les pratiques agricoles et l'adaptation à l'environnement local doivent donc être caractérisés aux échelles adéquates pour leurs effets sur l'établissement des relations plantes-organismes afin de rationaliser l'effort de sélection. D'autres critères d'évaluation des espèces cultivées en conditions limitantes doivent par ailleurs être introduits dans les schémas de sélection car la résistance aux bioagresseurs est aussi associée à l'état nutritionnel des plantes. Par conséquent, l'exacerbation du potentiel des relations plante-microbiome (projet DEEP IMPACT, encadré 4.2) est à encourager.

De récents travaux ont montré qu'un ensemble de microorganismes mutualistes de la rhizosphère pouvaient induire des mécanismes de défense des plantes. Le terme résistance induite est un terme générique recouvrant un ensemble de mécanismes biologiques et chimiques qui protègent les plantes d'une possible attaque par des bioagresseurs. Plus largement, une réflexion sur les boucles de rétroaction entre les plantes et le sol pourrait fournir un nouveau cadre des critères à introduire en création variétale. Ces boucles de rétroaction sont en partie modulées par les communautés microbiennes du sol. En effet, les communautés microbiennes du sol réagissent avec l'espèce et le génotype des plantes par deux voies principales. La première voie est

induite directement par les systèmes racinaires au travers de la rhizodéposition[15], et plus largement par les modifications induites par le système racinaire. La deuxième voie est induite par les effets des litières et résidus de cultures. Ainsi, les plantes peuvent induire des modifications du fonctionnement du sol au travers des communautés microbiennes par ces deux voies. Après disparition des plantes causales, l'effet induit peut persister longtemps dans le sol et affecter les communautés de pathogènes. Cet effet « d'héritage écologique » est donc relié aux traits fonctionnels des plantes. Ceux-ci déterminent la capacité des plantes à modifier en retour les ressources du sol et la dynamique des communautés microbiennes du sol, mais également à répondre à ces changements (Baxendale *et al.*, 2014). La prise en compte de ces interactions devrait s'insérer dans une logique de définition des règles de succession des cultures afin d'agir en synergie avec la diversification des productions végétales (Peralta *et al.*, 2018). Par conséquent, il serait intéressant d'intégrer ces dynamiques pluriannuelles dans les schémas de sélection afin d'influencer le microbiome des sols de manière à obtenir des effets de rétroaction positifs. Proche du concept de rotation des agronomes, ces boucles de rétroactions ne peuvent ignorer l'effet des pratiques agricoles telles que le travail du sol pour maintenir un microbiome du sol, car le risque qu'un seul événement modifie de manière critique celui-ci est possible (Kraut-Cohen *et al.*, 2020). Un dialogue accru entre les généticiens, les agronomes et les écologues est indispensable pour intégrer le pas de temps long dans une réflexion plus large du poids du choix des espèces végétales dans la rotation.

À retenir

Il est indispensable de repenser les variétés et leur obtention au regard de nouveaux critères posés par une agriculture zéro pesticide. Toutefois, les autres objectifs, comme la promotion de la biodiversité du sol ou la limitation des fuites d'azote par une bonne efficience d'utilisation, doivent rester également à l'esprit des programmes de création variétale. Pour cela, une recherche fondamentale sur les mécanismes de résistance et des liens entre la diversité végétale et la dynamique des ressources, ainsi que la stabilité des agroécosystèmes constitue un défi pour les sélectionneurs car multipliant les objectifs assignés aux espèces cultivées.

⏩ Pistes pour conduire les nouveaux programmes de sélection

Intérêt des ressources génétiques comme réservoir de gènes de résistance et d'adaptation

Quels que soient les moyens technologiques mis à disposition du sélectionneur (outils de biologie moléculaire, sélection génomique, etc.), le progrès génétique et la réussite d'un programme de sélection, notamment à long terme, dépendent toujours de

15. La rhizodéposition est la sécrétion de composés organiques directement dans le sol par les racines des plantes.

la diversité génétique disponible (la fameuse équation du sélectionneur). La gestion de la diversité génétique, en plus d'être un enjeu en soi, est donc aussi un enjeu pour permettre le progrès génétique et l'innovation variétale. Maintenir et conserver la diversité génétique des espèces cultivées consiste alors à maintenir un réservoir de gènes et d'allèles source d'amélioration des futurs programmes de sélection. Cette diversité est présente au sein des collections de « ressources génétiques ». Pour une espèce cultivée donnée, les ressources génétiques consistent en du « matériel végétal contenant des unités fonctionnelles de l'hérédité et ayant une valeur effective ou potentielle » (Convention sur la diversité biologique, Sommet de Rio, 1992). Elles correspondent à des anciennes variétés de pays, des espèces sauvages apparentées, ainsi que des accessions présentes dans toutes les zones géographiques où est cultivée l'espèce à l'échelle de la planète. Dès 1926, le biologiste russe Nikolaï Vavilov avait fait le lien entre la répartition géographique de la diversité génétique et l'histoire évolutive des plantes cultivées (Harris, 1990). Il avait pu mettre en évidence différents centres d'origine où la diversité génétique était maximale et où la domestication des espèces cultivées à partir de leur ancêtre sauvage avait eu lieu. Ces observations soulignaient l'intérêt de ces régions à forte diversité, notamment comme réservoir de gènes impliqués dans l'adaptation. Parmi ces centres on peut noter le centre mexicain (maïs, haricot), le centre du Moyen-Orient (blé, seigle, melon) et le centre méditerranéen (choux). Collecter, maintenir et caractériser ces ressources génétiques est primordial pour conserver la capacité d'innovation et proposer des nouvelles variétés adaptées à une large gamme de contraintes déjà connues (résistances aux cortèges de maladies et parasites), ou encore partiellement inconnues (impact du changement climatique).

Deux formes principales de conservation existent pour ces ressources. La gestion *ex situ*, où les plantes/graines sont conservées en dehors de leur habitat d'origine et la gestion *in situ* où les plantes sont maintenues dans leur (agro-)écosystème. Pour la plupart des espèces, des collections *ex situ* existent. Elles correspondent en général à des lots de graines conservées au congélateur et régénérées tous les 10 à 20 ans de manière à conserver un taux de germination élevé. L'exemple le plus connu de ces banques de gènes est surement la réserve mondiale de semences du Svalbard en Norvège, mais de telles collections existent dans la plupart des pays. En France, elles sont gérées dans des centres de ressources biologiques organisés en réseau. Pour optimiser l'utilisation de ces ressources, il est nécessaire de pouvoir les caractériser et les organiser. La gestion *in situ* est plus lourde à mettre en place, car elle nécessite de maintenir les (agro-)écosystèmes dans lesquels évoluent les espèces cible. Cependant, elle a aussi des avantages puisque, que cela soit dans les fermes ou dans des écosystèmes naturels (pour les ressources génétiques forestières ou les espèces sauvages apparentées aux espèces cultivées), les accessions maintenues *in situ* continuent de coévoluer avec leur milieu biotique et abiotique et maintiennent leur potentiel adaptatif (adaptation aux contraintes abiotiques et/ou biotiques nouvelles). L'hypothèse scientifique sous-jacente est qu'en maintenant une pression évolutive sur ces ressources génétiques, on maintient des gènes d'adaptation intéressants pour enrichir de futurs programmes de sélection.

Cette hypothèse a été valorisée dans le cadre de programmes de gestion dynamique où des variétés hétérogènes sont maintenues au champ et évoluent sans pression

forte de sélection humaine au cours des générations et des environnements dans lesquelles elles sont implantées. Cela permet à ces variétés hétérogènes, ou « populations évolutives » d'évoluer en fonction du contexte local (impact sur les allèles présents aux gènes de précocité, besoins en froid, etc.) (Rhoné *et al.*, 2008). Chez le blé, ce concept de gestion dynamique a été ensuite développé dans le cadre de programmes de sélection participative où des variétés évolutives se sont révélées être plus stables dans le temps (entre saisons climatiques) et entre les environnements, que les variétés commerciales (Goldringer *et al.*, 2020 ; van Frank *et al.*, 2020). Cette gestion dynamique de la diversité génétique permet donc à la fois de conserver des gènes d'adaptation dans la population et de maintenir de la diversité génétique dans les champs en lien avec la production de services écosystémiques.

L'amélioration d'une espèce cultivée repose en premier lieu sur l'exploration et l'utilisation de la diversité naturelle au sein de l'espèce. Outre cette variabilité intraspécifique, plus ou moins importante selon les espèces, le sélectionneur peut également enrichir le réservoir d'allèles favorables en réalisant des croisements avec les espèces apparentées. Même si les hybridations interspécifiques, classiquement réalisées chez de nombreuses espèces cultivées, permettent d'enrichir la diversité génétique exploitable en sélection par recombinaison homéologue, elles sont parfois restreintes par des problèmes d'incompatibilité entre espèces ou tout simplement par l'absence de diversité chez les espèces apparentées pour le caractère d'intérêt. Outre le sauvetage d'embryons, de nouvelles pistes sont actuellement explorées afin de lever les barrières reproductrices entre espèces. Ainsi, il est possible de lever le blocage mis en place dans l'endosperme lors de croisements interspécifiques via la manipulation des mécanismes épigénétiques de la plante (Schatlowski *et al.*, 2014). Enfin, face à l'absence de diversité génétique intra- et inter-espèces, le sélectionneur dispose de biotechnologies d'édition de génomes pour générer de la nouvelle diversité génétique telles que la mutagénèse « classique » non ciblée (chimique ou par radiations physiques), et plus récemment la mutagénèse dirigée (par l'utilisation de *site-directed nuclease* (SDN) du type CRISPR/Cas9 (*clustered regularly interspaced palindromic repeats* / CRISPR *associated protein 9*) par exemple).

Outils et méthodes pour prendre en compte ces nouveaux enjeux dans les programmes de sélection

À la vue des différents enjeux présentés précédemment, concevoir les variétés de demain consiste à mettre à disposition des agriculteurs des variétés :
– avec un fort potentiel d'adaptation, et ce d'autant plus que les environnements dans lesquels elles vont évoluer seront de plus en plus contraints et fluctuants ;
– produisant plusieurs services écosystémiques en plus du service de production alimentaire (maintien de la diversité biologique, qualité des sols, insectes pollinisateurs, gestion des populations de bioagresseurs, etc.) ;
– cultivées dans des peuplements complexes (couverts associés, mélanges variétaux, systèmes agroforestiers, etc.).

L'identification des gènes contrôlant les caractères d'intérêt cités nécessite de disposer d'outils de phénotypage adaptés pour cibler les traits d'intérêt et de

méthodes d'analyse génétique adaptées. Enfin, les nouvelles techniques d'édition du génome permettent d'envisager d'autres voies de création variétale dont il convient d'examiner les implications potentielles.

Meilleure connaissance et caractérisation du milieu et des plantes/peuplements pour cibler les traits d'intérêt

La réponse des plantes à des stress (biotiques et abiotiques) seuls ou en combinaison est un enjeu d'importance pour la sélection. Être capable de caractériser cette réponse de manière fiable, résolutive et à haut débit est un véritable challenge. En effet, le chercheur ou le sélectionneur, pour optimiser ses choix, doit être capable de cibler précisément ces traits, de mettre en évidence des différences entre génotypes parfois faibles (notamment comparées aux différences entre espèces le plus souvent étudiées), pour un grand nombre de plantes et de manière reproductible. Les défis sont donc doubles. Il s'agit tout d'abord de pouvoir piloter des stress de manière à reproduire les mêmes conditions d'évaluation (pilotage des fertilisations, de l'alimentation hydrique, des conditions de lumière ou de température, de pressions de maladies, etc.) et ensuite de pouvoir, à travers le phénotype mesuré, accéder aux traits et ce pour un grand nombre d'individus. Cette dernière décennie a vu le développement de nombreuses plateformes de phénotypage haut débit, et ce grâce au développement des technologies du numérique et la mise à disposition de nombreux capteurs ayant permis l'automatisation et le pilotage des conditions expérimentales en serre. À titre d'exemple, on peut citer différentes plateformes du projet Phenome dont la plateforme PhénoArch de Montpellier qui permet de piloter finement les conditions hydriques et d'imiter différents scénarios de stress dans lesquels les plantes pourront être évaluées. L'accès à des plantes individuelles (et à leurs organes) obtenues dans ces conditions très contrôlées permet ensuite de les caractériser finement que ce soit à l'aide de variables décrivant le fonctionnement de la plante entière et des variables permettant d'accéder à des phénotypes à l'échelle de l'organe ou de la cellule grâce aux outils de profilage haut débit. Ces outils incluent la métabolomique, la protéomique, ou la caractérisation fine de flux (comme les échanges gazeux ou les flux métaboliques dans la plante, voir Blein-Nicolas *et al.* [2020] pour un exemple d'utilisation). Ces plateformes permettent en outre de phénotyper des plantes au cours d'un parcours de stress (et pas uniquement d'un état final par exemple) mais également d'accéder à l'ensemble des compartiments de la plante, y compris le compartiment racinaire (plateforme 4PMI de Dijon, Jeudy *et al.*, 2016). Ces plateformes sont essentielles pour accéder à l'ensemble des racines ainsi qu'à son architecture car le type, la morphologie et les variables descriptives de l'architecture racinaire sont particulièrement importantes pour l'adaptation des variétés à des conditions de très faibles intrants ou de culture sans pesticides car reliées à l'absorption de l'eau et des éléments nutritifs par le système racinaire, le recrutement des organismes bénéfiques notamment au travers du processus d'exsudation. Les démarches de culturomique qui visent à isoler et identifier les différents microorganismes d'un échantillon complètent ensuite cette description car elles pourraient permettre de cribler des génotypes pour leur capacité à interagir avec le microbiote de la rhizosphère de manière contrôlée (projet DEEP IMPACT, encadré 4.2).

Il est essentiel de combiner ces démarches de description fine du comportement des plantes en interaction avec leur milieu biotique et abiotique avec les comportements réels observés au champ ou en phénotypage haut débit. Le développement des capteurs embarqués (capteurs multispectraux, caméras RGB, LiDAR, etc.) et des différents vecteurs (drone, phénomobile, systèmes portables, etc.), ainsi que le développement des sondes et de capteurs (température, statut hydrique, rayonnement) sont complémentaires car le phénotypage au champ doit combiner à la fois le peuplement végétal et l'environnement. Les prélèvements de sol et les analyses chimiques et physiques correspondantes (texture du sol, quantité d'azote dans les différents horizons, etc.) restent nécessaires pour décrire finement l'environnement.

Appréhender le déterminisme génétique des caractères d'intérêt

Précédemment, nous avons souligné l'intérêt de nouveaux traits, encore peu considérés actuellement, pour des programmes d'amélioration des plantes. Les intégrer plus facilement dans les programmes de sélection dépend souvent de la capacité à les relier à des biomarqueurs facilement accessibles à haut débit et fiables quelles que soient les conditions environnementales. Les biomarqueurs les plus souvent utilisés sont les marqueurs moléculaires, comme les marqueurs SNP (*single-nucleotide polymorphism*), ou plus récemment des données spectrales (spectre NIRS, *near-infrared spectroscopy*). Par ailleurs, des ressources génomiques sont maintenant largement disponibles pour un grand nombre d'espèces cultivées et plus uniquement pour les espèces majeures. Cet accès facilité au génome ainsi qu'aux endophénotypes associés (transcriptome, protéome, métabolome, etc.) a permis un gain de précision dans l'analyse des régions génomiques impliquées dans le contrôle des caractères d'intérêt. Ainsi, il est désormais possible d'accéder de manière plus fine au déterminisme génétique de caractères complexes (contrôlés par un grand nombre de gènes ou QTL à effets faibles), dont l'expression fluctue en fonction de l'environnement ou du fonds génétique. La méthodologie d'identification des régions génomiques d'intérêt par génétique d'association a largement profité de ces avancées, puisqu'elle s'avère très efficace quand un grand nombre de génotypes (plusieurs centaines) peuvent être phénotypés et génotypés à haut débit. Disposer de biomarqueurs à proximité des régions génomiques d'intérêt est donc un outil précieux pour le sélectionneur puisque le matériel végétal de ces programmes peut alors être criblé à des stades très jeunes (dès l'apparition des premières feuilles) et ainsi réduire le temps entre générations. En outre, il est également possible d'augmenter le nombre d'individus criblés. Ces démarches de génétique d'association ont aussi été couplées à des méthodologies de caractérisation environnementale (notamment au sein de larges réseaux d'expérimentation) pour pouvoir cibler les déterminants génétiques impliqués dans l'adaptation, la stabilité et les interactions génotype-environnement (Bustos-Korts *et al.*, 2019), caractères dont la pertinence pour les systèmes agroécologiques a été soulignée précédemment.

Adapter/Changer les schémas de sélection

Les schémas et les méthodes de sélection doivent être repensés, en prenant en compte l'évolution rapide des méthodes et des outils (phénotypage, génomique)

ainsi que le spectre des espèces végétales considérées. La diversification des systèmes de culture aura vraisemblablement pour conséquence d'augmenter le nombre d'espèces travaillées, et ce pour optimiser différents services (contrôler les maladies telluriques et les ravageurs, valorisation de certaines espèces dans les stratégies de push-pull, intérêt d'espèces pérennes pour les systèmes en agroforesterie, induire des boucles de rétroaction entre les plantes et le sol bénéfiques, etc.). Pour une espèce donnée, la culture en mélange d'espèces ou de variétés, ainsi que l'intérêt du maintien d'une certaine diversité génétique à l'intérieur des variétés, posent la question de la gestion et du maintien de la diversité génétique à la fois au cours du processus de sélection (sélection créatrice), mais aussi au cours de la multiplication des semences ou des plants distribués aux producteurs (sélection conservatrice). Les schémas de sélection actuels sont principalement basés sur des types variétaux présentant peu d'hétérogénéité génétique (lignée pure, hybrides F1, clones). D'un autre côté, des populations végétales soumises uniquement à la sélection naturelle sans pilotage du progrès génétique ne pourront pas non plus répondre aux enjeux. En effet, le risque que la sélection naturelle privilégie des génotypes avec un meilleur fitness au détriment de leur valeur agroécologique est important. Ainsi, il convient de classer les pistes d'adaptation des schémas de sélection. Ces pistes couvrent à la fois (i) des aspects de conception (place de la gestion de la variabilité génétique et du *pre-breeding*), (ii) la définition des critères de sélection et les nouveaux traits à considérer, (iii) les outils disponibles, ainsi que (iv) des aspects liés à l'inscription, la post-inscription et la multiplication des semences et des plants.

Les ressources génétiques constituent un réservoir important de gènes d'adaptation et de résistance mais dont la valorisation dans les programmes de sélection peut s'avérer complexe, notamment en raison de l'éloignement entre ces génotypes et les variétés élites des obtenteurs. Les introduire de manière efficace dans des programmes de sélection (*pre-breeding*) nécessite de prendre en compte l'interaction de ces gènes avec le fonds génétique (« est-ce que l'effet de ces gènes sera maintenu ou identique quand ils seront transférés dans un fonds génétique élite ? »), ainsi que la possibilité d'introduire ces gènes de manière ciblée en optimisant la recombinaison génétique, de manière à ne pas introduire de manière concomitante des caractères défavorables. Ces étapes sont cruciales, et ce d'autant plus que les schémas de sélection pour l'agroécologie vont avoir à gérer un niveau de diversité génétique supérieur aux schémas actuels, à la fois au début des plans de croisement, mais aussi tout au long du processus de sélection.

Les critères de sélection sont aussi réinterrogés par l'agroécologie. Proposer de nouvelles variétés ne pourra plus uniquement reposer sur le choix de génotypes présentant la meilleure performance moyenne en peuplement homogène. Ainsi des critères ont été proposés pour estimer l'aptitude au mélange en se basant sur les caractères d'aptitude à la combinaison utilisés dans les schémas de sélection des variétés hybrides F1 (Forst, 2018). Cependant, l'estimation de ces aptitudes repose sur la réalisation d'un nombre important de combinaisons de mélanges et peut constituer une limite à l'utilisation de ce critère. D'autres critères sont aussi proposés pour optimiser les assemblages des différentes composantes d'un mélange, notamment en se basant sur la complémentarité des gammes de variances explorées par chaque composante du mélange. L'objectif est de proposer *in fine* un potentiel

d'adaptation optimisé au sein du mélange (Litrico et Violle, 2015). Enfin, on peut aussi relever l'importance de prendre en compte une sélection pour de multiples objectifs qui devra considérer plusieurs caractères de manière simultanée et hiérarchisée. Certains *trade-off* entre traits cibles pourront être limités en utilisant des mélanges variétaux (Barot *et al.*, 2017), mais la construction des idéotypes devra tout de même être repensée en fonction des combinaisons de traits cible selon les attentes en matière de services écosystémiques à maximiser et des disservices à limiter. La nature des traits de sélection eux-mêmes est amenée à évoluer. En effet, il est important de pouvoir considérer dans les programmes de sélection des traits fonctionnels garants de la complémentarité de niches des différentes composantes de la variété ou du mélange (se référer alors aux enjeux relatifs au phénotypage soulevés p. 164) avec la difficulté de prendre en compte les traits de manière simultanée et de considérer les corrélations (positives ou négatives) entre ces caractères.

Les sélectionneurs disposent d'outils permettant d'accélérer les cycles de sélection et d'en faire baisser les coûts. Ainsi, la sélection génomique et la sélection phénomique, dont l'objectif est de prédire la valeur phénotypique du ou des traits ciblés en utilisant des données de génotypage (ou des données spectrales) haut débit sont particulièrement intéressantes puisqu'elles permettent de prédire le phénotype de caractères dont le déterminisme génétique est complexe (Meuwissen *et al.*, 2001 ; Rincent *et al.*, 2018). De plus, des développements de ces méthodes sont en cours pour mieux prendre en compte les interactions entre le génotype et l'environnement, ainsi que plusieurs traits de manière simultanée, ce qui rejoint la réflexion sur l'évolution des critères de sélection (Gillberg *et al.*, 2019 ; Moeinizade *et al.*, 2020).

L'édition du génome offre de nouvelles possibilités pour surmonter les limites de la sélection conventionnelle (encadré 5.6). En plus de générer de nouveaux allèles au gène cible, celui-ci peut être directement modifié dans les variétés élites, permettant de raccourcir fortement la durée de sélection en évitant les générations de rétrocroisements réalisées classiquement après l'hybridation entre le génotype donneur et la variété élite. Au-delà de la création de nouveaux allèles conférant une résistance aux bioagresseurs, la technologie CRISPR/Cas9 peut également être utile dans le processus de pyramidage des gènes de résistance (Borrelli *et al.*, 2018). De plus, la technologie CRISPR/Cas9 permet d'éviter la perte locale de diversité liée au « *linkage drag* » qui peut avoir des impacts potentiellement négatifs sur les performances agronomiques. En outre, en ciblant les homologues des gènes dits de domestication, il est désormais possible d'introduire rapidement des espèces orphelines (semi-domestiquées et sauvages par exemple) au cœur des systèmes de culture (Wolter *et al.*, 2019), contribuant à la diversification des systèmes de culture. La diversité génétique présente dans les espèces sauvages ou les variétés non cultivées peut alors être utilisée comme source d'allèles, et ainsi d'élargir le *pool* de diversité génétique disponible pour l'espèce d'intérêt. Cependant l'édition du génome ne peut se faire sans une excellente caractérisation du ou des gènes contrôlant le caractère d'intérêt et du génome de l'espèce. Enfin, si l'utilisation de cette biotechnologie peut s'avérer intéressante pour des caractères sous contrôle oligo ou monogénique, elle semble plus difficile à mettre en œuvre pour des caractères complexes sous contrôle polygénique ou dans des espèces polyploïdes.

Encadré 5.6. Les nouvelles techniques d'édition du génome « *new (plant) breeding techniques* »

En 2007, un groupe de travail mandaté par la Commission européenne a identifié huit techniques de sélection des plantes appelées N(P)BT (*new (plant) breeding techniques*) dont l'inclusion ou non dans le champ d'application de la directive européenne 2001/18/CE du 12 mars 2001, relative à la dissémination volontaire d'OGM dans l'environnement, n'est à l'heure actuelle pas encore clairement définie. Ces huit biotechnologies (Lusser *et al.*, 2012) ont en commun de permettre l'affranchissement de certaines limitations existantes en sélection classique, en vue de produire des plantes avec les caractéristiques souhaitées de manière plus rapide et précise. Certaines de ces techniques sont anciennes mais d'autres sont plus récentes comme celles liées à la technologie CRISPR/Cas9 appartenant à la famille des techniques de nucléases dirigées SDN. Quatre familles de nucléases dirigées sont, ou ont été, utilisées : les méganucléases, les ZFN (*zinc finger nuclease*), les TALEN (*transcription activator-like effector nuclease*) et dernièrement les nucléases de type CRISPR/Cas9. Les nucléases dirigées SDN, les NBT les plus étudiées actuellement, font intervenir des enzymes, les nucléases, possédant la capacité de couper les deux brins de l'ADN au niveau d'une région précise prédéfinie. La coupure, détectée par le système de surveillance cellulaire endogène sera réparée grâce au système de recombinaison non-homologue NHEJ (*non-homologous end joining*). Ce système est sujet à erreur, ce qui fait que des nucléotides peuvent être ajoutés, non-remplacés, voire supprimés (de un à quelques dizaines de nucléotides), générant de fait des insertions/délétions et donc des mutations au niveau de la séquence cible. Il en résulte donc une séquence imparfaitement réparée (et donc mutée) et différente de la séquence initiale. Le système HDR (*homology-directed repair*) de recombinaison homologue peut également réparer cette coupure de l'ADN en insérant au site de clivage une autre séquence (un autre allèle) présentant des motifs homologues.

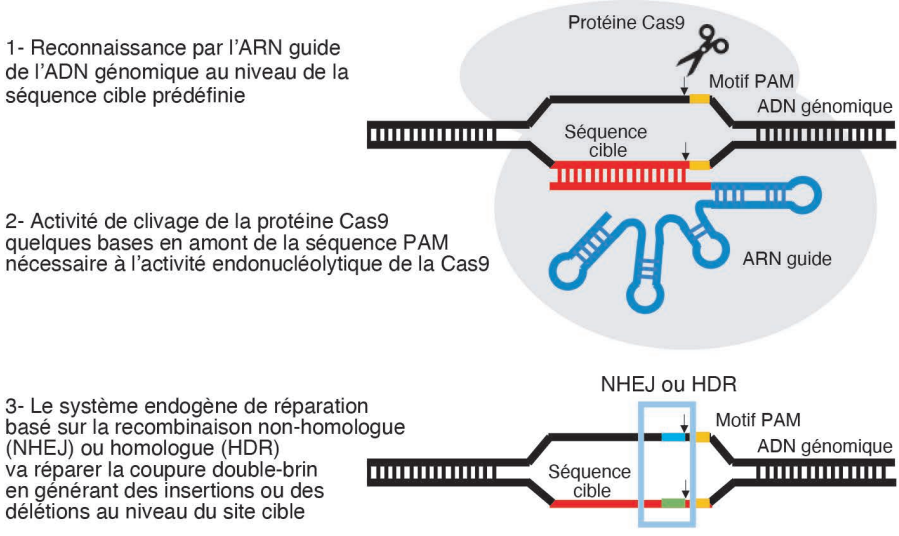

Figure 5.1. Fonctionnement du système CRISPR/Cas9 pour l'édition du génome

…

…

Les nucléases de type CRISPR/Cas9 qui sont des enzymes naturelles du système immunitaire bactérien pour combattre les infections virales sont actuellement les plus utilisées. Elles sont composées d'une nucléase protéique de type Cas9 et d'un guide ARN. Les nucléases dirigées, notamment CRISPR, peuvent être adaptées pour d'autres applications moléculaires que l'édition du génome *stricto sensu*. L'activité nucléasique des SDN peut ainsi être supprimée ou remplacée par une autre activité enzymatique afin d'autoriser des actions ciblées sur les génomes. Les SDN modifiées peuvent ainsi être utilisées pour moduler l'expression de gènes en inactivant ou en activant leur transcription ou en modifiant les marques épigénétiques et donc la structure de la chromatine au site ciblé.

Enfin, le processus d'évaluation, d'inscription et de diffusion de l'innovation variétale est aussi questionnée par une demande d'agriculture zéro pesticide. L'évaluation, lors de l'inscription et dans les réseaux post-inscription, prend en compte certains critères comme des critères environnementaux et des comportements de résistance par rapport aux principales maladies. Une section « plantes de services » du Comité technique permanent de la sélection, permet aussi d'inscrire des variétés valorisées pour d'autres services que celui de production et qui mettent en avant les régulations biologiques pour rendre différents services. Cette section, d'abord centrée sur les cultures intermédiaires piège à nitrates (CIPAN) s'est ensuite ouverte à d'autres services et d'autres cultures comme les espèces compagnes, et est le lieu où la demande pour ces nouveaux services se formalise. De plus, pour les espèces agricoles, les futures variétés sont évaluées avec des itinéraires techniques à faibles niveaux d'intrants ou en AB. Cependant la notion d'adaptation locale reste encore mal estimée et donc peu prise en compte dans les décisions d'inscription. Un enjeu de l'inscription et de la multiplication réside donc dans la possibilité de décrire, de multiplier et de proposer aux agriculteurs des variétés présentant un niveau plus important de diversité génétique. Des évolutions de la réglementation européenne (règlement UE n°2018/848) vont permettre la commercialisation de « matériel hétérogène biologique » pour l'AB à partir de janvier 2022, ce qui devrait en partie répondre à la demande de certains producteurs. Enfin, il ne faut pas sous-estimer les impacts de ces nouveaux schémas de sélection sur la phase de multiplication de semences. L'adaptation locale des variétés, leur potentielle hétérogénéité, accompagnées vraisemblablement d'un nombre beaucoup plus important de variétés auront des répercussions sur les conditions de multiplication, de protection intellectuelle de l'innovation et sur le modèle économique associé. C'est en partie en réponse à ces questionnements que des réseaux de sélection participative ont émergé (encadré 5.9). Cette vision complémentaire pourrait à terme nourrir également les réflexions sur l'évolution des schémas de sélection plus « classiques ».

Enfin, l'adaptation des variétés dépend aussi de l'objet « semence » comme vecteur de l'innovation, et il ne faut pas oublier de réfléchir la variété en complément des innovations qui peuvent être apportées par la semence elle-même. Ainsi le développement de technologies des semences et la réflexion de microbiote bénéfique à associer aux semences sont aussi des pistes importantes de réflexion, notamment contre les fontes de semis (encadré 5.7).

Encadré 5.7. Le projet de recherche SUCSEED : mettre fin à l'utilisation des pesticides sur les semences et proposer des solutions alternatives (PPR CPA – 2020/2026)

Les semences jouent un rôle central dans notre système agricole : elles sont au cœur de notre production alimentaire et de nos échanges commerciaux dans un marché de plus en plus globalisé. Dans ce contexte, garantir une qualité sanitaire élevée des semences est crucial pour prévenir l'émergence de maladies et sécuriser la production alimentaire. Le projet SUCSEED repose sur la nécessité d'identifier et de développer des solutions innovantes à la protection des semences via des approches naturelles, efficaces et écoresponsables. Ce projet vise à faire de la semence un acteur central de la gestion de la santé des plantes en se concentrant sur deux problèmes phytosanitaires majeurs : les pathogènes transmis aux et par les semences, et les fontes de semis qui correspondent à l'absence de germination/émergence des graines causée par des pathogènes. Ces recherches sont conduites sur quatre espèces végétales d'intérêt agronomique : blé, tomate, haricot commun et colza, et leurs agents pathogènes majeurs respectifs. Pour identifier des solutions alternatives aux pesticides, SUCSEED propose trois leviers d'action : l'amélioration des défenses des semences, le pilotage du microbiote des semences et la modification du microenvironnement des graines en germination. Les solutions novatrices obtenues via ces trois leviers seront formulées à l'aide d'approches technologiques adaptées aux semences et déployées sur un large éventail de génotypes et de conditions environnementales afin de valider leur efficacité potentielle et leur commercialisation (INRAE, 2021c).

À retenir

La création et la sélection variétale sont à la croisée de différents enjeux. Les outils et méthodes soutenant l'adaptation des schémas de sélection variétale pour les multiples objectifs sont un de ces enjeux. La préservation des ressources génétiques est également au cœur de cette dynamique. Ainsi, une dynamique nouvelle est en œuvre avec des interdépendances (développement des outils et sélection par exemple) nécessitant des investissements humains et financiers sur l'ensemble du processus de création et sélection variétale.

⏩ Intégration des nouvelles variétés dans les systèmes de culture

En préambule de cette partie, il convient de rappeler que le choix des variétés et des modes de conduite qui en découlent, est décidé par les agriculteurs en fonction de leurs objectifs de production. La création d'une variété nécessitant une dizaine d'années dans les schémas de sélection actuels, il est essentiel dès à présent d'imaginer les systèmes en transition et futurs afin de proposer aux sélectionneurs des critères à introduire dans les schémas de sélection. Dans cet objectif, l'utilisation d'indicateurs à la parcelle peut aider à la définition des critères de sélection (voir section p. 164-169). Ces indicateurs sont des données facilement interprétables que les sélectionneurs, mais plus particulièrement les agriculteurs, pourront

utiliser pour comprendre l'interaction entre les plantes et leur environnement. Par exemple, les indicateurs de la qualité physique, biologique ou chimique du sol sont aujourd'hui nombreux et servent à décrire finement le fonctionnement du sol non influencé par les zones d'intense activité biologique comme la rhizosphère. Or, l'interface sol-plante (la rhizosphère) est une des voies d'entrée des agents pathogènes et bioagresseurs telluriques, mais également le siège du recrutement d'organismes bénéfiques pouvant induire des réactions immunitaires chez la plante. Bien que de grandes avancées ont eu lieu pour caractériser le fonctionnement de la rhizosphère, la dynamique et la diversité des processus en jeu, ainsi que la dépendance au génotype, rendent délicate une détermination causale entre la variété introduite dans le système de culture et les performances des plantes en peuplement dans un milieu donné. En effet, le recrutement d'organismes dépend du microbiome du sol, lui-même évoluant sous les pratiques agricoles, le type de sol, le climat et les espèces végétales introduites au cours de la succession culturale. En outre, si tant est que des relations causales soient estimables, l'obtention d'un échantillon de rhizosphère en conditions de plein champ reste très délicate car dépendant du type de sol, de son humidité au moment du prélèvement et des racines sur lesquelles il est obtenu. Par conséquent, il est possible d'observer des différences de performances sans qu'il soit possible de distinguer ce qui est propre à la variété ou aux effets des pratiques agricoles, qui influencent en retour les processus relevant de la rhizosphère en lien avec la santé des plantes. Ce manque d'information sur ce compartiment est donc un frein possible à l'adoption de ces nouvelles variétés en limitant la prise de décision mais également à la conception de systèmes de culture permettant l'expression pleine et entière des potentialités de ces nouvelles variétés. À titre d'exemple, le programme INRAE ResDur (résistances aux principales maladies fongiques de la vigne), a permis la création de quatre nouvelles variétés (Artaban, Floreal, Vidoc, et Voltis). Cependant, ces nouvelles variétés doivent encore trouver leur place dans les systèmes viticoles où la notion de terroir est issue d'une tradition et d'efforts d'adaptation des itinéraires techniques aux cépages et conditions pédoclimatiques de production. Un moyen de contourner cet écueil est de réunir dans des ateliers de co-conception de systèmes de culture, les sélectionneurs pouvant expliquer les mécanismes en œuvre à optimiser par les pratiques, afin de bénéficier de leur expertise sur les variétés nouvelles prévues à l'agenda d'une agriculture zéro pesticide.

Encadré 5.8. Le projet de recherche CAP ZERO PHYTO : adaptation du concept d'immunité écologique à la protection des cultures (PPR CPA – 2020/2026)

La capacité des plantes à utiliser leur propre système immunitaire pour lutter contre les maladies et ravageurs est au cœur du projet CAP ZERO PHYTO. L'objectif est en effet de proposer de nouvelles stratégies de protection des cultures basées sur l'utilisation combinée de leviers immunitaires destinés à moduler les mécanismes de défense des cultures. Le concept d'immunité écologique, défini pour les animaux, sera adapté : les bases physio-moléculaires des réponses immunitaires sont considérées dans un contexte plus large d'écologie et d'adaptation, en caractérisant les interactions entre leviers immunitaires et en étudiant les sources de variabilité. Six leviers immunitaires sont explorés seuls et en combinaison :

…

…

résistance génétique, plantes de service, solutions de biocontrôle avec une action SDP, flashs d'UV-C, stress mécanique et apport d'azote. Pour cela, le pommier et la tomate, avec leurs principaux bioagresseurs, sont d'abord utilisés comme cultures modèles du fait de leurs IFT importants. Le projet est réalisé en concertation avec les acteurs professionnels afin de s'assurer de la pertinence et de la faisabilité des stratégies proposées. Une tâche spécifique est dédiée à la diffusion des résultats dans les formations académiques afin de former la prochaine génération à des pratiques agricoles durables et écologiques (INRAE, 2021a).

Plus largement, l'introduction de nouvelles variétés requiert également de disposer de nouvelles références (sur la fertilisation, sur le travail du sol, sur l'aptitude aux mélanges, etc.) pour la conduite technique des nouvelles variétés et de faire la démonstration de leur mise en place afin de faciliter leur adoption. Il convient également d'intégrer les boucles de rétroaction (*plant-soil feedback*) dans la succession des cultures et donc d'intégrer une dimension temporelle longue (voir la section p. 159-160), et donc les écologues. Les démarches participatives incluant l'utilisateur final (encadré 5.9) sont inspirantes de ce point de vue. De nouveaux critères de décision dans le choix des espèces et des variétés peuvent également être envisagés. En effet, face au risque de maladies, la résistance peut devenir un critère premier par rapport à celui de la productivité car celle-ci est plus incertaine face à l'absence de solutions de traitement. Par ailleurs, les nouvelles variétés pourraient enrichir *per se* la diversification des cultures en permettant l'introduction de nouvelles espèces dans l'assolement et la rotation, si par exemple une réduction du nombre de degrés jours est envisageable dans ces nouveaux schémas de sélection.

Encadré 5.9. La place des approches participatives en sélection innovante pour une agriculture zéro pesticide

Les approches participatives permettent de favoriser l'adoption de nouvelles technologies, notamment dans les environnements peu représentés. On définit par sélection participative une approche de création variétale par laquelle des agriculteurs et des chercheurs créent des espèces en fonction des besoins exprimés par les agriculteurs n'ayant pas été satisfaits par les semences produites de manière conventionnelle. Ainsi, la création variétale impliquant des agriculteurs engagés favorise l'adoption de nouvelles variétés. Les approches participatives requièrent une méthodologie rigoureuse et partagée entre les acteurs des programmes de sélection et de création variétale. Le succès de ces méthodes repose donc sur la communication entre les différents acteurs, et sur la définition de protocoles rigoureux. Le processus de sélection étant très dépendant de l'environnement (pédoclimatique et économique), une approche décentralisée est donc essentielle afin qu'à la fois les critères de rendement, de stabilité et de préférences des utilisateurs finaux, à savoir les agriculteurs, soient intégrés. Par ailleurs, l'échange de graines, le maintien de variétés anciennes, et l'adoption d'un plus grand nombre de variétés par les agriculteurs permettent de préserver la biodiversité cultivée, et peuvent concourir à préserver les ressources génétiques *in situ*. Ainsi, les approches participatives peuvent contribuer à une sélection innovante pour une agriculture zéro pesticide.

À retenir

L'introduction de nouvelles variétés répondant au défi d'une agriculture zéro pesticide conduit à une réflexion plus globale du système de culture et de l'itinéraire technique, qui nécessite de réussir la communication entre les différents acteurs impliqués dans le processus de création variétale, des écologues et les utilisateurs finaux lors des ateliers de co-conception.

⏩ Conclusion

L'amélioration variétale est indispensable pour une agriculture zéro pesticide car les variétés dont on dispose actuellement n'ont pas été sélectionnées pour ce type de conduite. Les réflexions apportées par ce chapitre révèlent l'ampleur du défi afin de disposer de nouvelles variétés adaptées à ces systèmes de culture zéro pesticide. Or, ces enjeux ne peuvent se concevoir indépendamment du changement climatique imposant des stress abiotiques, et susceptible d'influencer les cortèges de pathogènes et bioagresseurs, voire l'émergence de nouveaux cortèges. Alors comment faire de la création variétale face à ces multiples enjeux ? Il est crucial de favoriser dès à présent les recherches en génétique visant à définir et intégrer de nouveaux critères afin d'atteindre l'objectif ambitieux d'une agriculture zéro pesticide, qui implique l'ensemble des acteurs de la filière semence. Or, ce n'est pas seulement une filière qu'il convient d'interpeller mais l'ensemble des acteurs agricoles, car l'itinéraire technique des cultures doit également être repensé en fonction des attentes portées sur les variétés. En ce sens, les stratégies de sélection intégrant les approches participatives peuvent être complémentaires aux autres approches, mais c'est l'ensemble des approches qui doivent être mobilisées face au défi posé d'une agriculture zéro pesticide. En effet, les avancées les plus récentes de la recherche fondamentale ont révolutionné la création variétale en donnant accès à des informations indispensables pour caractériser la réponse des plantes à leur environnement biotique et abiotique, et identifier les meilleurs candidats, mais l'ensemble des acteurs de la filière semence doit se mobiliser notamment pour préserver les ressources génétiques. Néanmoins, le pas de temps de la création variétale (une dizaine d'années avec les méthodes actuelles) renvoie également à la question de la formation de sélectionneurs pouvant intégrer dès à présent ces questions complexes.

⏩ Références bibliographiques

Annicchiarico P., Collins R.P., De Ron A.M., Firmat C., Litrico I., Hauggaard-Nielsen H., 2019. Do we need specific breeding for legume-based mixtures?, *Advances in Agronomy*, 157:141-215. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.04.001

Barot S., Allard V., Cantarel A., Enjalbert J., Gauffreteau A., Goldringer I. *et al.*, 2017. Designing mixtures of varieties for multifunctional agriculture with the help of ecology. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 37 (13). https://doi.org/10.1007/s13593-017-0418-x

Baxendale C., Orwin K.H., Poly F., Pommier T., Bardgett R.D., 2014. Are plant-soil feedback responses explained by plant traits?, *New Phytologist*, 204(2) :408-423. https://doi.org/10.1111/nph.12915

Blein-Nicolas M., Negro S.S., Balliau T., Welcker C., Cabrera-Bosquet L., Nicolas S.D. *et al.*, 2020. A systems genetics approach reveals environment-dependent associations between SNPs, protein coexpression, and drought-related traits in maize, *Genome Research*, 30(11) :1593-1604. https://doi.org/10.1101/gr.255224.119

Borrelli V.M.G., Brambilla V., Rogowsky P., Marocco A., Lanubile A., 2018. The enhancement of plant disease resistance using CRISPR/Cas9 technology, *Frontiers in Plant Science*, 9:1245. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01245

Brummer E.C., Barber W.T., Collier S.M., Cox T.S., Johnson R., Murray S.C. *et al.*, 2011. Plant breeding for harmony between agriculture and the environment, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(10) :561-568. https://doi.org/10.1890/100225

Bustos-Korts D., Malosetti M., Chenu K., Chapman S., Boer M.P., Zheng B., van Eeuwijk F.A., 2019. From QTLs to adaptation landscapes: using genotype-to-phenotype models to characterize G×E over time, *Frontiers in Plant Science*, 10:1540. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01540

Carof M., Laperche A., Cannavo P., Menasseri S., Godinot O., Julbault M. *et al.*, 2018. Valorisation des interactions plante-sol pour la nutrition et la santé des plantes, *Innovations Agronomiques*, 69 :71-82. https://doi.org/10.15454/D8RT59

Casteel C.L., Hansen A.K., 2014. Evaluating insect-microbiomes at the plant-insect interface, *Journal of Chemical Ecology*, 40(7) :836-847. https://doi.org/10.1007/s10886-014-0475-4

Daval S., Gazengel K., Belcour A., Linglin J., Guillerm-Erckelboudt A., Sarniguet A. *et al.*, 2020. Soil microbiota influences clubroot disease by modulating *Plasmodiophora brassicae* and *Brassica napus* transcriptomes, *Microbial Biotechnology*, 13(5) :1648-1672. https://doi.org/10.1111/1751-7915.13634

Deng Y., Zhai K., Xie Z., Yang D., Zhu X., Liu J. *et al.*, 2017. Epigenetic regulation of antagonistic receptors confers rice blast resistance with yield balance, *Science*, 355(6328) :962-965. https://doi.org/10.1126/science.aai8898

Díaz S., Cabido M., 2001. Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes, *Trends in Ecology & Evolution*, 16(11) :646-655. https://doi.org/10.1016/S0169-5347(01)02283-2

Finckh M.R., 2008. Integration of breeding and technology into diversification strategies for disease control in modern agriculture, *European Journal of Plant Pathology*, 121(3) :399-409. https://doi.org/10.1007/s10658-008-9273-6

Forst E., 2018. *Développement de méthodes d'estimation de l'aptitude au mélange pour la prédiction des performances et la sélection de mélanges variétaux chez le blé tendre, et co-conception d'idéotypes de mélanges adaptés à l'agriculture biologique*, thèse de doctorat, spécialité Génétique des plantes, Université Paris Saclay (COmUE), Paris, 281 p. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02114929

Futuyma D.J., Agrawal A.A., 2009. Macroevolution and the biological diversity of plants and herbivores, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(43) :18054-18061. https://doi.org/10.1073/pnas.0904106106

Gasselin P., Clément O., 2006. Quelles variétés et semences pour des agricultures paysannes durables ?, *Dossier de l'environnement de l'INRA*, 30 (186).

Gillberg J., Marttinen P., Mamitsuka H., Kaski S., 2019. Modelling G×E with historical weather information improves genomic prediction in new environments, *Bioinformatics*, 35(20) :4045-4052. https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btz197

Goldringer I., van Frank G., Bouvier d'Yvoire C., Forst E., Galic N., Garnault M. *et al.*, 2020. Agronomic evaluation of bread wheat varieties from participatory breeding: a combination of performance and robustness, *Sustainability*, 12(1) :128. https://doi.org/10.3390/su12010128

Gopal M., Gupta A., 2016. Microbiome selection could spur next-generation plant breeding strategies, *Frontiers in Microbiology*, 7:1971. https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01971

Gururani M.A., Venkatesh J., Upadhyaya C.P., Nookaraju A., Pandey S.K., Park S.W., 2012. Plant disease resistance genes: current status and future directions, *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 78:51-65. https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2012.01.002

Harris D.R., 1990. Vavilov's concept of centres of origin of cultivated plants: its genesis and its influence on the study of agricultural origins, *Biological Journal of the Linnean Society*, 39(1) :7-16. https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.1990.tb01608.x

Hinsinger P., Betencourt E., Bernard L., Brauman A., Plassard C., Shen J.*et al.*, 2011. P for two, sharing a scarce resource: soil phosphorus acquisition in the rhizosphere of intercropped species, *Plant Physiology*, 156(3) :1078-1086. https://doi.org/10.1104/pp.111.175331

Huang H., Nguyen Thi Thu T., He X., Gravot A., Bernillon S., Ballini E., Morel J.-B., 2017. Increase of fungal pathogenicity and role of plant glutamine in Nitrogen-Induced Susceptibility (NIS) to rice blast, *Frontiers in Plant Science*, 8:265 https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00265

Hunter P.J., Teakle G., Bending G.D., 2014. Root traits and microbial community interactions in relation to phosphorus availability and acquisition, with particular reference to Brassica, *Frontiers in Plant Science*, 5:27. https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00027

INRAE, 2021a. CAP ZERO PHYTO. https://www6.inrae.fr/cultiver-proteger-autrement/Les-Projets/CAPZEROPHYTO

INRAE, 2021b. MOBIDIV. https://www6.inrae.fr/cultiver-proteger-autrement/Les-Projets/MOBIDIV

INRAE, 2021c. SUCSEED. https://www6.inrae.fr/cultiver-proteger-autrement/Les-Projets/SUCSEED

Jeudy C., Adrian M., Baussard C., Bernard C., Bernaud E., Bourion V. *et al.*, 2016. RhizoTubes as a new tool for high throughput imaging of plant root development and architecture: test, comparison with pot grown plants and validation, *Plant Methods*, 12(1) :31. https://doi.org/10.1186/s13007-016-0131-9

Kraut-Cohen J., Zolti A., Shaltiel-Harpaz L., Argaman E., Rabinovich R., Green S.J., Minz D., 2020. Effects of tillage practices on soil microbiome and agricultural parameters, *Science of The Total Environment*, 705:135791. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135791

Laperche A., Aigu Y., Jubault M., Ollier M., Guichard S., Glory P. *et al.*, 2017. Clubroot resistance QTL are modulated by nitrogen input in *Brassica napus*, *Theoretical and Applied Genetics*, 130(4) :669-684. https://doi.org/10.1007/s00122-016-2842-8

Litrico I., Violle C., 2015. Diversity in plant breeding: a new conceptual framework, *Trends in Plant Science*, 20(10) :604-613. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.07.007

Lusser M., Parisi C., Plan D., Rodríguez-Cerezo E., 2012. Deployment of new biotechnologies in plant breeding, *Nature Biotechnology*, 30(3) :231-239. https://doi.org/10.1038/nbt.2142

McKey D., Cavagnaro T.R., Cliff J., Gleadow R., 2010. Chemical ecology in coupled human and natural systems: people, manioc, multitrophic interactions and global change, *Chemoecology*, 20(2) :109-133. https://doi.org/10.1007/s00049-010-0047-1

Meuwissen T.H.E., Hayes B.J., Goddard M.E., 2001. Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps, *Genetics*, 157(4) :1819-1829. https://doi.org/10.1093/genetics/157.4.1819

Moeinizade S., Kusmec A., Hu G., Wang L., Schnable P.S., 2020. Multi-trait genomic selection methods for crop improvement, *Genetics*, 215(4) :931-945. https://doi.org/10.1534/genetics.120.303305

Peralta A.L., Sun Y., McDaniel M.D., Lennon J.T., 2018. Crop rotational diversity increases disease suppressive capacity of soil microbiomes, *Ecosphere*, 9(5) :e02235 https://doi.org/10.1002/ecs2.2235

Rhoné B., Remoué C., Galic N., Goldringer I., Bonnin I., 2008. Insight into the genetic bases of climatic adaptation in experimentally evolving wheat populations, *Molecular Ecology*, 17(3) :930-943. https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2007.03619.x

Rincent R., Charpentier J.-P., Faivre-Rampant P., Paux E., Le Gouis J., Bastien C., Segura V., 2018. Phenomic Selection Is a Low-Cost and High-Throughput Method Based on Indirect Predictions: Proof of Concept on Wheat and Poplar, *G3 Genes|Genomes|Genetics*, 8(12) :3961-3972. https://doi.org/10.1534/g3.118.200760

Schatlowski N., Wolff P., Santos-González J., Schoft V., Siretskiy A., Scott R. *et al.*, 2014. Hypomethylated Pollen Bypasses the Interploidy Hybridization Barrier in Arabidopsis, *The Plant Cell*, 26(9) :3556-3568. https://doi.org/10.1105/tpc.114.130120

Schoonhoven L.M., Loon B.V., Loon J.J.A. van, Dicke M., 2005. *Insect-Plant Biology*, Oxford, OUP Oxford, 441 p.

Stefan L., Engbersen N., Schöb C., 2021. Crop–weed relationships are context-dependent and cannot fully explain the positive effects of intercropping on yield, *Ecological Applications*, 31(4) :e02311. https://doi.org/10.1002/eap.2311

van Frank G., Rivière P., Pin S., Baltassat R., Berthellot J.-F., Caizergues F. *et al.*, 2020. Genetic diversity and stability of performance of wheat population varieties developed by participatory breeding, *Sustainability*, 12(1) :384. https://doi.org/10.3390/su12010384

van Valen L., 1973. A new evolutionary law, *Evolutionary Theory*, 1:11-30.

Venske E., dos Santos R.S., Busanello C., Gustafson P., Costa de Oliveira A., 2019. Bread wheat: a role model for plant domestication and breeding, *Hereditas*, 156(1) :16. https://doi.org/10.1186/s41065-019-0093-9

Veresoglou S.D., Barto E.K., Menexes G., Rillig M.C., 2013. Fertilization affects severity of disease caused by fungal plant pathogens, *Plant Pathology*, 62(5) :961-969. https://doi.org/10.1111/ppa.12014

Vidal T., Gigot C., de Vallavieille-Pope C., Huber L., Saint-Jean S., 2018. Contrasting plant height can improve the control of rain-borne diseases in wheat cultivar mixture: modelling splash dispersal in 3-D canopies, *Annals of Botany*, 121(7) :1299-1308. https://doi.org/10.1093/aob/mcy024

Wang J., Zhou L., Shi H., Chern M., Yu H., Yi H. *et al.*, 2018. A single transcription factor promotes both yield and immunity in rice, *Science*, 361(6406) :1026-1028. https://doi.org/10.1126/science.aat7675

Watson J.D., Crick F.H.C., 1953. Molecular structure of nucleic acids: a structure for deoxyribose nucleic acid, *Nature*, 171(4356) :737-738. https://doi.org/10.1038/171737a0

Wolter F., Schindele P., Puchta H., 2019. Plant breeding at the speed of light: the power of CRISPR/Cas to generate directed genetic diversity at multiple sites, *BMC Plant Biology*, 19(1) :176. https://doi.org/10.1186/s12870-019-1775-1

Xu G., Yuan M., Ai C., Liu L., Zhuang E., Karapetyan S. *et al.*, 2017. uORF-mediated translation allows engineered plant disease resistance without fitness costs, *Nature*, 545(7655) :491-494. https://doi.org/10.1038/nature22372

Chapitre 6

Mobiliser les agroéquipements et le numérique pour des systèmes de culture sans pesticides

Xavier Reboud, Laurent Bedoussac, Vincent Cellier, Stéphane Cordeau, Sylvain Delzon, Melen Leclerc, Julia Jouan

Les agroéquipements et le numérique sont des leviers essentiels pour développer des systèmes de culture sans pesticides. Des innovations en matière de précision d'exécution et d'adaptabilité des équipements sont attendues. En parallèle, le développement des capteurs va permettre d'améliorer la surveillance des bioagresseurs, mais également celle de l'ensemble du système de culture et de son environnement. Les capteurs, associés aux nouvelles technologies de l'information, pourront également contribuer à l'émergence de filières sans pesticides et facilitant la traçabilité du champ à l'assiette. Des questions vont néanmoins se poser quant à l'utilisation des nombreuses données collectées et du coût potentiellement élevé de ces nouveaux équipements.

⏩ Précision, autonomie et adaptabilité : les clés pour des agroéquipements au service de systèmes de culture sans pesticides

Quels besoins pour les systèmes de culture sans pesticides ?

Les agroéquipements correspondent aux machines utilisées dans la production agricole. Pour les productions végétales, de nombreux agroéquipements sont disponibles, depuis les outils de traction jusqu'aux équipements de récolte et de manutention, en passant par les outils de travail du sol ou d'irrigation. En France, ce secteur très

dynamique investit entre six et sept milliards d'euros chaque année en agroéquipement pour les productions animales et végétales (Axema, 2020). La conception des agroéquipements et leur utilisation sur le terrain représentent une dimension importante de la transition vers la fin de l'utilisation des pesticides en accompagnant notamment la diversification des cultures et la transformation en profondeur des pratiques vers une valorisation plus grande des processus naturels. Actuellement, différents systèmes de culture sans pesticides sont testés au sein de dispositifs expérimentaux comme CA-SYS[16] ou Rés0Pest[17]. Dans ce dernier, les expérimentateurs ont conçu des successions culturales en mobilisant des partenaires locaux (instituts techniques, chercheurs, conseillers agricoles, agriculteurs, etc.) autour d'un cahier des charges commun. La lutte contre les adventices s'est vite avérée être la préoccupation récurrente principale des expérimentateurs et, dans ce domaine, les innovations en matière d'agroéquipements représentent un levier important, avec le développement de bineuses de grande largeur et disposant d'un guidage laser ou par caméra. Ces deux éléments permettent d'accélérer les débits de chantier. Ces équipements sont aujourd'hui fréquents pour les cultures à grands écartements comme le maïs, le tournesol, la betterave et même le colza. Le développement de moulinets qui agissent sur le rang tout en préservant les jeunes plantules de la culture de rente a également constitué une innovation significative. Des besoins nouveaux sont apparus pour des outils plus efficaces pour le binage à faible écartement (15 centimètres) des céréales, mais aussi pour le désherbage sous le rang en viticulture et arboriculture. À cela s'ajoutent des contraintes spécifiques au désherbage mécanique, comme des créneaux d'intervention parfois très réduits, liés aux conditions climatiques et à la nature des sols, ainsi que le besoin de solutions à faible coût pour des productions à faible valeur ajoutée, comme c'est le cas actuellement pour certaines légumineuses fourragères.

Une autre problématique rencontrée concerne la gestion des couverts, en particulier ceux qui doivent cohabiter avec la culture en place sans la concurrencer et qu'il faut pouvoir réguler par des moyens mécaniques. Des techniques très innovantes sont actuellement à l'étude comme un broyeur inter-rang développé conjointement par Arvalis – Institut du végétal et l'entreprise Eco-Mulch (figure 6.1). En assurant le broyage sans abimer le blé (Eco-Mulch et Arvalis, 2019), cet outil facilite la gestion des couverts permanents vivants, comme la luzerne ou le trèfle dans des inter-rangs de blé.

Figure 6.1. Détail d'un broyeur inter-rang Eco-Mulch (Eco-Mulch et Arvalis, 2019) (crédit : C. Huyghe)

16. https://www6.inrae.fr/plateforme-casys/
17. https://www6.inrae.fr/reseau-pic/Projets/Res0Pest

Un autre besoin bien identifié concerne les opérations de semis, en particulier des associations d'espèces (au moins deux espèces cultivées simultanément dans un même champ), car elles présentent un grand intérêt dans les systèmes de culture sans pesticides. S'appuyant sur l'expérience des agriculteurs en techniques culturales simplifiées, de nombreux constructeurs ont élaboré des machines de semis, combinant plusieurs trémies de semis permettant de semer avec précision différentes espèces, à des densités précises pour chaque espèce. Ces équipements peuvent également servir à apporter des engrais dans la raie de semis. La possibilité de faire cet apport de fertilisation localisée sur la ligne de semis est à même d'assurer le démarrage rapide de la culture, ce qui est un gage de son succès. Les machines les plus récentes permettent également de positionner précisément des graines de différentes espèces, à différentes profondeurs, lors d'un passage unique de semoir, ce qui correspond à une attente des expérimentateurs comme le soulignaient Labreuche *et al.* (2017). Par ailleurs, quand les conditions favorables à la croissance des plantes sont limitées dans le temps, il peut devenir nécessaire d'installer un couvert au sein même d'une culture déjà en place selon une approche de *relay-cropping*, ce qui nécessite de nombreux ajustements du semoir pour ne pas pénaliser la culture déjà développée. Un nombre croissant d'entreprises d'agroéquipements mettent aujourd'hui sur le marché de tels semoirs multi-trémies pour couvrir précisément ces besoins. Parallèlement au semis, des innovations sont aussi nécessaires pour récolter simultanément des graines issues des cultures associées, ainsi que pour les trier car les mélanges de graines ne peuvent généralement pas être commercialisés en l'état, en particulier pour l'alimentation humaine. Plusieurs pistes peuvent être explorées pour faciliter cette étape, comme investir dans du matériel de tri plus performant pouvant combiner plusieurs principes (trieur alvéolaire, table densimétrique, trieur optique), sachant que le coût du tri doit être mis en perspective avec celui des produits commercialisés. Les trieurs optiques, initialement réservés au triage de semences de potagères, sont aujourd'hui largement utilisés pour supprimer les impuretés dans les récoltes de légumes d'industrie et pour séparer les graines d'espèces cultivées en mélange. Une solution permettant de réduire les investissements consiste alors à mutualiser ces outils, chez l'organisme stockeur ou sur plusieurs exploitations, ce qui permet de trier de plus gros volumes ou une plus grande diversité de mélanges. Enfin, des agroéquipements reposant sur le numérique et l'utilisation des capteurs sont amenés à se développer notamment pour désherber de manière autonome ou détecter de manière précoce les adventices (voir section p. 181-182).

Concernant le biocontrôle, des innovations sont nécessaires pour que des organismes et substances de biocontrôle puissent être déployés simplement en même temps que d'autres actions (fertilisation, irrigation, désherbage, etc.) et si possible de façon flexible et ciblée en fonction des besoins. Tout d'abord, il s'agit de développer des équipements pour que l'application de tels produits ne soit plus un travail principalement manuel, comme c'est le cas actuellement. Par exemple, des drones sont dorénavant capables de déposer des capsules contenant des trichogrammes pour lutter contre la pyrale du maïs, ceci pouvant être particulièrement utile lorsque les plantes sont trop développées pour intervenir avec un tracteur sans endommager fortement la culture. L'utilisation des médiateurs chimiques, également très dépendante d'opérations manuelles, pourrait être facilitée grâce à la mise en place

de diffuseurs dédiés et connectés avec des capteurs. Enfin, certains organismes et substances utilisés en biocontrôle semblent être impactés considérablement dans les pulvérisateurs classiques : l'élaboration conjointe de produits de biocontrôle et des équipements adaptés à leur application apparait donc nécessaire.

Adaptabilité et auto-construction des agroéquipements

La plupart des agroéquipements disponibles actuellement ont été conçus de manière concomitante et cohérente avec l'évolution des systèmes de culture, des variétés, des structures d'exploitations et des paysages, conduisant à un usage plus élevé de pesticides (Jepsen *et al.*, 2015). Ainsi, les machines actuelles sont adaptées aux champs de grande taille et ont été conçues pour minimiser les besoins de main d'œuvre et optimiser l'utilisation des pesticides (à travers par exemple une précision d'application et une vitesse élevée pour intervenir aux périodes optimales). Cependant, pour bénéficier des régulations biologiques qui sont plus efficaces dans des champs de petites tailles (notamment la régulation des insectes par les auxiliaires), l'agriculture sans pesticides passera par une réduction de la taille des champs. Cela nécessitera donc de nouvelles machines, adaptées aux champs de petite taille, avec des cultures plus ou moins intriquées (les associations plurispécifiques par exemple) et ajustées aux conditions pédoclimatiques locales. Un enjeu fort en matière d'agroéquipement est donc de proposer un matériel qui peut s'adapter à une multitude d'environnements. Cette flexibilité peut être mise en place de différentes manières pouvant coexister les unes avec les autres. Pour cela, un premier axe est de concilier une chaine de production industrielle des agroéquipements limitant les coûts de revient du matériel avec une personnalisation selon les besoins exprimés des acheteurs, ce qui peut être contradictoire. On aurait donc une chaine unique pour des produits différents. Un deuxième axe concerne l'auto construction, avec notamment des agroéquipements proposés en kit et auto-construits (Joly, 2017). L'auto-construction permet alors à des agriculteurs de fabriquer leurs équipements afin de les adapter au mieux à leurs systèmes de culture et au contexte local (Salembier *et al.*, 2020). Très en phase avec l'essor des « fablabs », ces ateliers de montage ou réparation ouverts peuvent particulièrement intéresser les structures coopératives et les Cumas (coopératives d'utilisation de matériel agricole) qui ont donc un rôle important à jouer (encadré 6.1). Enfin, des machines intelligentes équipées de capteurs intégrés représentent également une solution pour faciliter l'adaptation des agroéquipements, en gérant notamment la navigation, la vitesse ou la précision de l'action (Berducat *et al.*, 2009). Dans un avenir proche, de telles machines numérisées pourront assurer d'autres autoréglages pour garantir le résultat et maintenir les performances dans un contexte changeant.

Encadré 6.1. L'Atelier paysan : une coopérative pour favoriser l'auto-construction d'agroéquipements

L'Atelier paysan est une organisation de développement agricole et rurale qui accompagne les agriculteurs dans la conception et la fabrication de machines et de bâtiments adaptés à une agroécologie paysanne. Il vise à remobiliser les agriculteurs sur les choix techniques autour de l'outil de travail afin de retrouver collec-

…

…

tivement « une souveraineté technique et une autonomie par la réappropriation des savoirs et des savoir-faire » (Gaillard, 2021). Sous statut coopératif, l'Atelier paysan s'est donné deux missions principales : (i) la recherche et développement participatif, qui comprend des activités telles que la réalisation de dessins techniques d'équipements et (ii) la diffusion de compétences et connaissances aux agriculteurs à travers des formations ou la mise à disposition en libre-accès de plans pour l'auto-construction d'agroéquipements (Salembier *et al.*, 2020).

Figure 6.2. Étoile de binage conçue à l'Atelier paysan et qui permet de désherber mécaniquement dans les rangs de vignes ; (a) modèle d'étoile de binage qui s'adapte facilement à différents supports ; (b) les étoiles en cours de fabrication lors d'une formation à l'Atelier paysan (L'Atelier paysan, 2021)

Des agroéquipements plus précis et autonomes

Les progrès en matière d'agroéquipements découleront du développement des capteurs qui, en temps réel, permettent d'acquérir différents signaux et rendent possible des actions curatives ou préventives de plus en plus précises et de manière automatique. Tout d'abord, des capteurs couplés aux agroéquipements peuvent être utilisés afin d'assurer un réglage optimum en toutes circonstances. Dans le cadre de l'application de pesticides ou de produits de biocontrôle, cela permet actuellement d'ajuster la pulvérisation à la présence ou au volume d'une cible à traiter, dans un souci d'efficience et d'une moindre utilisation (Maillot *et al.*, 2020). Des dispositifs qui assurent cette modulation sont proposés dans le commerce et ils peuvent s'adapter sur une large gamme de pulvérisateurs existants. Les agriculteurs engagés dans la transition vers des systèmes de culture sans pesticides pourront aussi bénéficier des capteurs pour accroître la précision du désherbage mécanique, par exemple en désherbant sous le rang en arboriculture ou viticulture. De plus, les progrès en matière d'intelligence artificielle permettent dès à présent de proposer des prototypes de robots autonomes qui, en fonction des informations fournies par leurs capteurs, peuvent supprimer certaines adventices, tailler un rameau et ainsi intervenir de manière précise (Jacquet *et al.*, 2018). Le développement d'une telle robotique permet de compenser un frein courant à l'utilisation d'agroéquipements autonomes à savoir leur lenteur. En effet, si l'objectif du robot est de contenir la pression parasitaire en désherbant ou éliminant uniquement les parties de plantes contaminées, alors une vitesse élevée n'est pas indispensable. Cependant, pour que ce type de technologie se diffuse, il reste à améliorer

la capacité de repérage dans l'espace du robot car les parcelles sont amenées à devenir plus complexes qu'actuellement (mélanges variétaux ou d'espèces par exemple).

Le développement de la prophylaxie mécanisée reste actuellement limité sans doute du fait de l'avantage économique à court terme que représente encore la lutte chimique. Une meilleure connexion entre les agroéquipements et le numérique va accélérer les progrès en intégrant des données externes, comme la météo, et plus largement des données pouvant servir à prendre des décisions quant aux interventions à effectuer. Il sera sans doute possible d'implémenter et déployer des systèmes autonomes intégrant différents capteurs, robots et algorithmes pour limiter la présence d'insectes nuisibles sur les plantes cultivées. Par exemple, lorsque des insectes ravageurs sont détectés, le risque de dégâts sur les plantes pourrait être limité en relâchant au bon endroit et à la bonne fréquence des phéromones répulsives, en adéquation avec le contexte local de la parcelle ou de la plante.

Les équipements autonomes permettent également d'envisager des ruptures dans les façons de concevoir et de conduire les systèmes de culture. Une illustration de cette situation est apportée par le robot FarmDroid de la société danoise FarmDroid ApS, lauréat lors des Sima Innovation Awards de 2021 (Stecomat, 2021). Ce robot est dédié au semis et au désherbage mécanique de plantes sarclées, comme la betterave. Au moment du semis, il enregistre la position de chaque graine semée. Il peut ensuite tout au long du cycle végétatif assurer le désherbage mécanique, entre les rangs, mais aussi entre les graines semées, que celles-ci aient ou non conduit à une plante en croissance. Un seul robot est en mesure de gérer 20 hectares, en totale autonomie car équipé de larges panneaux solaires. Une autre illustration est la capacité d'imaginer de nouvelles coopérations entre la machine et l'humain, en confiant à la machine les tâches répétitives et pénibles, fréquemment à la source de troubles musculo-squelettiques. Une telle coopération a été proposée par des équipes de recherche israéliennes (Bechar *et al.*, 2000 ; Vasconez *et al.*, 2019) pour la récolte de melons, où l'humain marque les melons à maturité et donc récoltables, tandis que la machine ramasse ensuite rapidement les melons marqués. À notre connaissance, il n'existe pas à ce jour de coopération similaire sur des sujets relatifs à la protection des cultures.

Le développement et la commercialisation d'agroéquipements high-tech, basés sur le numérique et les capteurs, se heurtent à leur coût qui reste actuellement élevé, du fait de l'émergence de ce secteur, mais qui devrait baisser dès lors qu'il ne s'agira plus de prototypes ou de petites séries. Des politiques volontaristes pour accompagner les entreprises qui les proposent, souvent des start-ups, associées à des aides à l'achat pour les agriculteurs ou à un engagement dans une filière à valeur ajoutée, seront sans doute nécessaires à leur utilisation à grande échelle. Mais la solution se trouve aussi dans le développement de l'achat et de l'utilisation en commun de ces nouveaux agroéquipements coûteux (y compris en entretien), ainsi que de l'auto-construction et l'entraide pour la création d'outils spécifiques adaptés aux besoins de chacun (encadré 6.1).

À retenir

Les innovations en matière d'agroéquipement seront essentielles pour développer des systèmes de culture sans pesticides, aussi bien pour produire et récolter des cultures de diversification, que pour cultiver autrement des plantes, par exemple

dans des cultures associées. Grâce aux capteurs, des actions curatives ou préventives pourront être réalisées de manière très précise et automatique. En parallèle, l'adaptabilité des agroéquipements sera un levier crucial pour mettre en place des systèmes de culture diversifiés et adaptés aux conditions pédoclimatiques locales. Cette adaptabilité pourra passer par l'utilisation de capteurs, facilitant les réglages *in situ* des agroéquipements, mais aussi par leur auto-construction au sein de collectifs d'agriculteurs. L'ensemble de ces innovations en termes de machinisme devra bien sûr être développé de manière cohérente, en prenant en compte les innovations agronomiques et le choix variétal tout en limitant les coûts associés.

⏩ Le numérique au service d'une épidémiosurveillance élargie

L'épidémiosurveillance en santé végétale vise à surveiller le développement des bioagresseurs pour mettre en place des actions préventives ou curatives à temps. Pour être efficace, quatre éléments sont à surveiller : l'hôte, les bioagresseurs, les auxiliaires et l'environnement. Le numérique peut-il permettre de renforcer cette épidémiosurveillance ? Plusieurs exemples en santé humaine, animale et végétale suggèrent que la réponse est oui, et que ce tournant a déjà été initié.

Le numérique pour accroître l'acquisition des données de surveillance

Le numérique au sens large est tout d'abord un moyen d'augmenter significativement l'acquisition des données d'épidémiosurveillance, par exemple par le biais de réseaux de capteurs. En effet, outre leur combinaison avec les agroéquipements, les capteurs peuvent aussi assurer la surveillance de l'état sanitaire des plantes cultivées et de leur environnement afin d'anticiper la présence de bioagresseurs. L'utilisation de capteurs pour l'épidémiosurveillance en agriculture n'est pas nouvelle et a déjà contribué à l'amélioration du suivi de certains paramètres clés comme la météo, mais ils prennent de plus en plus d'ampleur pour suivre :

– la végétation cultivée ou non. Le suivi non destructif de celle-ci, et en particulier des parties aériennes, s'est développé ces dernières années et a permis d'estimer la biomasse végétale, de décrire la structure tridimensionnelle du couvert végétal, ou encore de quantifier certaines réponses physiologiques sous l'effet d'un stress, comme leur flétrissement à cause d'un manque d'eau (Araus et Cairns, 2014 ; Yang *et al.*, 2021) ;

– l'environnement abiotique. Le suivi climatique étant primordial en agriculture, de nombreuses solutions sont déjà disponibles pour mesurer les principales variables climatiques dans l'air, le sol et l'eau (par exemple la température, l'humidité ou le rayonnement photosynthétique). Il existe également des capteurs pour mesurer les propriétés physico-chimiques des milieux (pH et conductance électrique notamment) ou quantifier des composés chimiques d'origine biologique ou anthropique (comme le CO_2, O_2 ou N_2O), y compris à des grandes échelles via les satellites (programme européen Copernicus) ;

– l'environnement biotique. Le suivi de cette composante de l'agroécosystème, autre que la végétation, est certainement à la fois le plus attendu et le plus compliqué. Des prototypes de solutions technologiques variées sont déjà disponibles, comme ceux capables d'identifier automatiquement des espèces à partir de leurs images (Lürig *et al.*, 2021), du son qu'elles produisent (Lima *et al.*, 2020), des odeurs qu'elles émettent (comme les phéromones), ou d'une trace moléculaire qui leur est spécifique (Cesewski et Johnson, 2020), cette dernière technologie permettant d'étendre le suivi aux microorganismes.

La mise au point de capteurs est en constante évolution et se nourrit des avancées aussi bien technologiques que biologiques (encadré 6.2). Toutefois, des recherches sur les technologies de détection automatique sont encore à mener, en particulier pour améliorer le repérage et la reconnaissance des organismes présents, ravageurs ou auxiliaires, que ce soit dans l'air mais aussi dans le sol et l'eau (Cubero *et al.*, 2020 ; Cui *et al.*, 2018). Par exemple, les capteurs basés sur les récepteurs de phéromones d'insectes sont prometteurs pour fournir une alerte précoce des insectes nuisibles envahissants (Tewari *et al.*, 2014). D'autres types de capteurs incluant une analyse moléculaire tels que les *lab-on-a-chip* pourraient constituer une option prometteuse pour détecter et analyser efficacement des maladies causées par des microorganismes (Kashyap *et al.*, 2017). Outre le suivi de différents organismes, des progrès restent à accomplir pour suivre l'état de nutrition azotée des cultures qui représente un facteur clé dans la compréhension des attaques de bioagresseurs.

Encadré 6.2. Le projet de recherche PheroSensor : des capteurs olfactifs utilisant des récepteurs phéromonaux pour détecter précocement les insectes ravageurs (PPR CPA – 2020/2026)

La surveillance des insectes reste un défi de taille pour l'épidémiosurveillance. En les détectant de manière précoce, on peut mettre en œuvre des mesures adaptées pour éviter une infestation trop importante. Les méthodes actuelles disponibles pour ce type de détection reposent sur des pièges à insecte notamment à base de phéromones (composés chimiques émis par les insectes pour attirer leurs congénères). Cependant, ces méthodes manquent parfois d'efficacité et impliquent de fréquentes interventions humaines pour le comptage et l'identification des captures. Il faut aussi activement émettre ces molécules dans l'environnement et donc, en amont, savoir les produire. Un moyen innovant de détecter les insectes serait de repérer directement leurs phéromones, alors même que ces composés sont émis en faibles quantités. Le projet PheroSensor cherche à relever ce défi en développant des capteurs bio-inspirés conçus à partir de récepteurs phéromonaux de trois espèces d'insectes. Tout d'abord, le composé majeur de ces récepteurs sera caractérisé afin de développer des capteurs biologiques sur des mouches sentinelles à durée de vie limitée. À partir de là, des récepteurs phéromonaux seront greffés sur des transducteurs diamant pour créer des capteurs physiques. Une fois utilisés sur le terrain, ces capteurs traceront les émissions de phéromones mais aussi la présence de composés émis par les plantes hôtes. Ils pourront s'avérer être un « nez » d'une grande finesse pour ouvrir sur le monde des odeurs et intégrer cette information dans les programmes d'actions en vue d'éviter les dégâts majeurs sur les cultures (INRAE, 2021a).

En parallèle des avancées sur les capteurs, des progrès importants ont été obtenus en ce qui concerne la communication sans fil et la mise en réseau des capteurs (Ojha *et al.*, 2015). Ainsi, les capteurs, qui étaient autrefois reliés à des centrales d'enregistrement filaires, sont maintenant des objets connectés sans fil qui peuvent réaliser une partie des calculs, transmettre l'information pertinente à un serveur, qui la transmettra à son tour à l'utilisateur. Le développement de l'internet des objets et des infrastructures de réseaux basse fréquence (LoRaWAN ou SigFox par exemple) et cellulaire (3-5G) est donc à présent aussi important que les capteurs eux-mêmes pour passer de l'enregistrement des données à des dispositifs de surveillance géolocalisés, permettant notamment la restitution d'informations cartographiées (Fuentes-Peñailillo *et al.*, 2021). Cette contribution croissante des infrastructures de réseaux à la digitalisation de l'agriculture illustre l'arrivée de nouveaux acteurs qui viennent bousculer les acteurs institutionnels du machinisme ou de la prévision agro-météorologique (Lakhwani *et al.*, 2019).

Les sciences participatives, citoyennes, ou collaboratives sont des sources de production de données et de connaissances de portée scientifique par des personnes non professionnelles trouvant un intérêt à surveiller l'état de santé des plantes et de l'agroécosystème (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). Il est évidemment plus facile de mobiliser des participations citoyennes sur certains sujets que sur d'autres, et l'attrait pour les ravageurs des cultures ne mobilise pas spontanément des vocations nombreuses ! Ces données collectées peuvent être assez basiques mais leur nombre et leur régularité font qu'elles rendent possible d'identifier les premiers signaux d'occurrence d'espèces sur un territoire, de détecter des bioagresseurs invasifs et d'assurer le suivi de leur développement (Ryan *et al.*, 2018). Le numérique joue un rôle central pour mettre en réseau les acteurs de cette surveillance, centraliser et restituer les données collectées mais aussi pour fournir des outils d'identification, en particulier de la reconnaissance d'images. Des initiatives de sciences participatives orientées sur la santé des plantes, en suivant par exemple des espèces invasives, ont déjà été engagées mais restent encore relativement confidentielles (Streito *et al.*, 2021). La montée en puissance de la surveillance de l'agroécosystème par ce biais passera par une poursuite de l'effort de formation des citoyens (comme les acteurs du monde agricole ou les naturalistes) sur comment et pourquoi identifier des espèces, ainsi que par un essor du partage de données qui pourront ensuite servir à améliorer la reconnaissance d'espèces par des algorithmes d'apprentissage automatique. Là aussi, un modèle économique de partage peut être à inventer, en faisant en sorte que ces données assimilées à un « bien commun » se massifient tout en restant libre d'accès.

Mobilisation des données pour comprendre, modéliser, prédire et guider

La disponibilité des données et leur mobilisation pour guider la décision restent actuellement les principaux verrous à une surveillance étendue des bioagresseurs et des agroécosystèmes dans le but d'éclairer les pratiques prophylactiques. Le numérique est un des moyens de lever ce verrou et d'augmenter considérablement la masse de données relatives au développement des plantes cultivées et de leur environnement biotique et abiotique. Il faut viser à la fois le recueil d'informations sur les bioagresseurs, mais

aussi sur les pratiques agronomiques appliquées afin de pouvoir les mettre en relation. La combinaison des informations issues de capteurs fixes, de capteurs embarqués (satellite, drone ou véhicule par exemple), des sciences participatives et de la fouille de textes rend théoriquement envisageable un suivi fin dans le temps et dans l'espace de nombreuses composantes de l'état de santé des plantes, des pratiques et de l'agroécosystème. Si à cela nous ajoutons la montée en puissance des données de séquençage, et plus largement de l'ensemble des données génomiques, nous devrions disposer à moyen terme de sources d'informations multiples, denses et de qualité. Ceci représenterait un potentiel énorme pour étendre notre compréhension des processus écologiques et de leurs déterminants, puis guider les actions correctives pour maintenir les conditions favorables limitant les interventions sur les cultures. C'est ici que les travaux de modélisation basés sur les processus et sur les données doivent intervenir pour tirer profit de ces données de surveillance. L'utilisation des modèles mécanistes présente l'avantage de fournir une compréhension qualitative du système étudié en décrivant mathématiquement les processus majeurs. Ils peuvent donc en principe servir à tester *ex ante* les pratiques de prophylaxie par simulation (Rimbaud *et al.*, 2021 ; Thompson et Brooks-Pollock, 2019). Ils ont cependant l'inconvénient d'être très exigeants en connaissances fines des processus, et peu sont actuellement capables de traiter correctement de l'impact des bioagresseurs. Ainsi, avec l'augmentation quantitative et qualitative des données, les approches statistiques prennent de plus en plus d'ampleur. Parmi elles, les méthodes d'apprentissage automatique, comme le *deep learning,* sont les plus plébiscitées pour leurs capacités prédictives, notamment pour traiter les données massives telles que les images (Jung *et al.*, 2021 ; Kirkeby *et al.*, 2021). Mais elles aussi ont des limites, notamment celle de ne pouvoir rendre compte de pratiques encore peu répandues. Tous les modèles ayant des avantages et des faiblesses, il est généralement intéressant de les combiner, par exemple pour intégrer conjointement des processus physiques et biologiques (Allen-Sader *et al.*, 2019) ou réduire les incertitudes dans les prédictions (Skelsey, 2021 ; Viboud *et al.*, 2018). Dans le cadre de l'épidémiosurveillance, ces modèles sont actuellement utilisés pour identifier les facteurs de risques (Martinetti et Soubeyrand, 2019), mais de nombreux travaux restent à conduire pour évaluer l'efficacité des mesures mises en place pour diminuer de manière directe ou indirecte le risque épidémique.

On voit que se dessine progressivement un déplacement de la cible du suivi, d'une approche concentrée sur des bioagresseurs dans l'optique de les éliminer par des traitements pesticides vers une approche plus systémique, où le bioagresseur est toujours observé mais dans le réseau des interactions biotiques auquel il contribue, dans un environnement abiotique fluctuant et incertain. Finalement, c'est bien l'agroécosystème dans sa globalité, et en partie sa fonction régulatrice, qui devient le centre d'étude. Il s'agit d'assurer une bonne santé des cultures via la santé et les capacités régulatrices de l'agrosystème, et de se donner les moyens de suivre son évolution.

Vers une épidémiosurveillance intelligente s'inscrivant dans le concept de *One Health*

Au-delà de l'acquisition et du traitement des données, le numérique peut également rendre la surveillance de la santé des plantes plus intelligente. Le

développement de l'épidémiosurveillance numérique peut tout d'abord se faire sous le paradigme des données massives : enregistrer le plus d'informations possibles avec un *a priori* limité, stocker les données et déployer des méthodes statistiques et informatiques pour en extraire une information pertinente. Cependant, cette démarche pose encore des problèmes de stockage, de souveraineté des données et de consommation d'énergie, augmentant l'empreinte environnementale du numérique (Weersink *et al.*, 2018). La collecte des données peut être rendue plus intelligente et frugale en mobilisant différentes stratégies complémentaires comme l'informatique ubiquitaire qui permet aux réseaux de capteurs de s'adapter automatiquement aux conditions locales pour acquérir les données seulement lorsque c'est pertinent, ou comme l'utilisation de méthodes statistiques pour définir le positionnement optimal des pièges à insectes sur un territoire, pour surveiller efficacement tout en minimisant les coûts (Bourhis *et al.*, 2021 ; Parisey *et al.*, 2022). Dans un futur proche, il est raisonnable d'envisager des systèmes de *push-pull* numériques autonomes en combinant de la détection automatique de bioagresseurs avec des systèmes de diffusion de molécules volatiles pour attirer les bioagresseurs en dehors des cultures et, à l'inverse, les auxiliaires dans les cultures.

Enfin, la surveillance épidémiologique est encore limitée dans l'espace, le temps et la cible car elle repose avant tout sur l'observation directe des ravageurs, à relativement court terme, dans ou à côté des champs cultivés. Or, pour une agriculture sans pesticides, la surveillance épidémiologique devrait inclure une grande diversité d'organismes, allant des parasites aux organismes auxiliaires, pour fournir des informations sur la régulation naturelle potentielle à grande échelle. Cela pourrait contribuer à prédire les risques de contamination sur l'ensemble d'un territoire (Allen-Sader *et al.*, 2019 ; Leyronas *et al.*, 2018), en intégrant les régulations au sein des réseaux d'interaction, voire raisonner des mesures de gestion à large échelle comme l'organisation spatiale des espèces et des variétés dans le paysage (Rimbaud *et al.*, 2021). De plus, le concept récent de *One Heath* affirme que la plupart des nouvelles maladies animales et humaines proviennent d'environnements naturels perturbés qui constituent des réservoirs et entretiennent des vecteurs de maladies (Cunningham *et al.*, 2017). L'extension de ce concept à la production végétale permet de dire que tout type d'invasion épidémique est informative de dérèglements plus ou moins profonds, voire irréversibles. Pour cela, il faudra suivre les facteurs de risque de prolifération des ravageurs en incluant les espaces non agricoles dans la surveillance épidémiologique (Morris *et al.*, 2021) et ainsi optimiser l'approche préventive nécessaire à la prophylaxie (encadré 6.3). De plus, il serait intéressant pour la surveillance épidémiologique des plantes, des animaux et des humains de partager au moins une partie de la technologie et des données pour comparer leurs résultats et améliorer les capacités de prévention et de prévision (Davis *et al.*, 2017). L'intégration efficace des nombreux indicateurs pouvant être calculés à partir des suivis issus des capteurs intelligents, des réseaux sociaux, des cartes numériques et de la télédétection permettrait de développer la prochaine génération de modèles épidémiologiques et de créer des outils innovants d'aide à la décision, non seulement au service des agriculteurs comme c'est le cas actuellement, mais aussi au service de l'environnement et des autres parties prenantes.

Encadré 6.3. Le projet de recherche Beyond : vers une épidémiosurveillance augmentée (PPR CPA – 2020/2026)

Le paradigme actuel de l'épidémiosurveillance (en bleu dans la figure 6.3) consiste en l'observation directe des bioagresseurs et repose sur des données spécifiques provenant d'événements à relativement court terme à proximité des champs cultivés. Le projet Beyond vise à développer un nouveau paradigme (en vert dans la figure 6.3) en englobant des échelles d'espace-temps plus larges, comme les espaces non agricoles, et en intégrant des données issues d'observations indirectes des populations de bioagresseurs. Cela inclut des données opportunistes (par exemple, des images satellites) obtenues à partir de systèmes de surveillance existants développés dans des contextes non agricoles et ne nécessitant donc pas d'investissement. D'autres types de données, telles que les données à dire d'expert, pourraient également être intégrées afin de maximiser les opportunités en termes de prophylaxie.

Pour atteindre cet objectif d'épidémiosurveillance « augmentée », le projet de recherche Beyond se base sur un travail interdisciplinaire. Une analyse comparée de stratégies d'épidémiosurveillance augmentée est conduite pour une quinzaine de systèmes agricoles représentant une gamme de cultures (arboriculture, maraîchage, vigne), de bioagresseurs (champignons, bactéries, virus), et de voies de dissémination (par les insectes, les échanges commerciaux). Ce changement de périmètre s'accompagne de nouveaux concepts sur les facteurs qui influencent l'émergence et l'évolution des bioagresseurs, ainsi que d'une nouvelle logique de prise de décision pour mettre en œuvre une prophylaxie efficace (INRAE, 2021b).

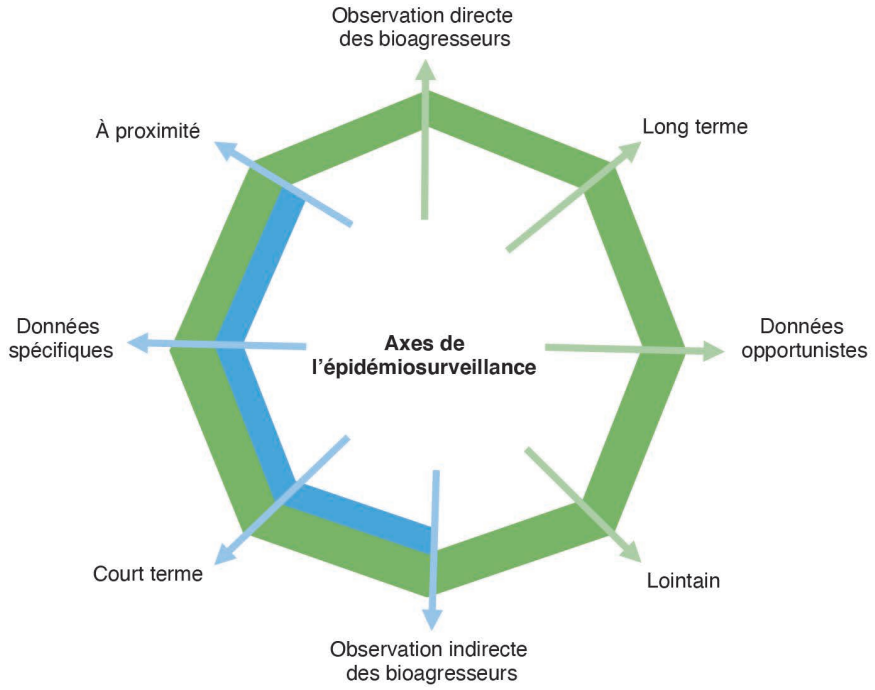

Figure 6.3. Les axes de l'épidémiosurveillance actuelle (barre bleue) à l'épidémiosurveillance élargie (barre verte) (INRAE, 2021b)

À retenir

Le numérique permettra d'augmenter l'acquisition de données pour surveiller les plantes cultivées, leurs bioagresseurs, et les auxiliaires de culture en intégrant l'ensemble de l'environnement biotique et abiotique. Pour cela, des innovations technologiques sont attendues comme les capteurs bio-inspirés, permettant de repérer la présence de certains insectes à partir de leurs phéromones. Outre les capteurs, les sciences participatives appuyées par les outils numériques représentent également un levier prometteur pour collecter des informations. Ces différentes sources de données de plus en plus massives viendront nourrir les approches de modélisation, dont celles issues de l'intelligence artificielle, pour restituer aux agriculteurs des indicateurs destinés à guider la prophylaxie. Un changement d'échelle est aussi nécessaire puisque l'épidémiosurveillance ne peut se limiter au suivi des bioagresseurs au sein des seuls systèmes de culture. En effet, c'est bien l'ensemble des agroécosystèmes, voire des écosystèmes autres qu'agricoles, qu'il faut pouvoir surveiller afin de limiter les risques de prolifération des bioagresseurs ou évaluer la fonctionnalité des processus écologiques. Ainsi, en se basant sur le concept *One Health*, la santé des plantes s'inscrit dans un schéma plus large, où l'ensemble des organismes, animaux comme végétaux, et des écosystèmes, agricoles, urbains ou naturels, partagent un rôle à jouer. Une telle épidémiosurveillance concerne un nombre important d'acteurs des territoires, très au-delà des seuls agriculteurs.

⏩ Le numérique au service du partage, de la traçabilité et de la valorisation des productions agricoles

Le développement de certaines technologies fixes et embarquées, associé aux progrès concernant le traitement des données, massives ou non, permet d'améliorer la transparence et la traçabilité des processus de production agricole (Fielke *et al.*, 2020). Par exemple, grâce à des capteurs positionnés sur les outils et un traceur GPS en cabine, l'agriculteur pourra réaliser un enregistrement en temps réel des travaux menés sur une parcelle. La saisie des opérations culturales ayant lieu automatiquement, le travail des agriculteurs s'en trouvera simplifié. De plus, les dernières innovations numériques comme les technologies *blockchain*[18] peuvent contribuer à améliorer la gestion des données des exploitations agricoles, tout en ouvrant à la certification des productions et des pratiques culturales associées pour les acteurs des filières. Vis-à-vis des systèmes sans pesticides, cette traçabilité peut avoir deux types d'avantages. Tout d'abord, elle peut faciliter les contrôles par les pouvoirs publics des intrants utilisés, limitant les coûts et les durées des inspections, aussi bien pour l'agriculteur que l'administration (OECD, 2019). Cela pourrait aussi favoriser la mise en place de subventions basées sur une très faible utilisation d'intrants. En allant plus loin, des capteurs fixes à l'intérieur ou aux abords des parcelles pourraient rendre compte de l'état de l'agroécosystème, en particulier de la biodiversité

18. La *blockchain* est une technologie de stockage et de transmission d'informations sans organe de contrôle, ce qui permet à ses utilisateurs - connectés en réseau - de partager des données sans intermédiaire.

hébergée, et permettre une rémunération de l'agriculteur en fonction des services écosystémiques produits (Zhao *et al.*, 2019).

Le deuxième avantage d'une telle traçabilité est de faciliter la mise en place de cahiers des charges liés à une labellisation. Des filières dédiées, valorisant des méthodes de production avec peu ou pas de pesticides, pourront se développer plus facilement car il sera plus aisé de vérifier les itinéraires techniques, de certifier les productions et, *in fine*, de proposer une rémunération intéressante aux producteurs (Choe *et al.*, 2009), sous réserve que les investissements spécifiques liés à l'organisation de la traçabilité soient réduits, ce qui constitue un enjeu majeur du numérique. Par exemple, un producteur engagé dans un itinéraire technique sans insecticide, sous contrat avec une entreprise agroalimentaire valorisant cette méthode de production dans ses produits commercialisés, n'aura pas besoin d'engager des frais supplémentaires pour la certification si l'ensemble de ses traitements sont suivis par des capteurs intégrés. En allant plus loin, le développement de capteurs réalisant des analyses en temps réel pourrait permettre la mesure des résultats (aucun résidu de pesticide, score de biodiversité, etc.) en complément de celle des moyens que l'on se donne pour les réaliser (pratiques sans pesticides). Cela pourrait contribuer à renforcer la confiance du consommateur et ouvrir de nouveaux segments de marché. Enfin, le numérique devrait permettre de faciliter l'organisation des agriculteurs répondant à une même exigence. En suivant l'exemple de la marque de consommateurs « C'est qui le Patron ?! », il devient possible de proposer un modèle inversé pour fixer le prix et le cahier des charges des produits agricoles à partir des souhaits des consommateurs (Renault, 2019). Les agriculteurs pourraient alors s'engager à produire des biens selon des critères précis, avec en retour, un prix de vente connu à l'avance, et en s'appuyant sur le numérique pour limiter les coûts de contrôle.

Enfin, le numérique peut être au service du partage des observations, des savoirs et des savoir-faire entre agriculteurs. Des outils collaboratifs, comme GECO (ÉcophytoPIC, 2021) sont à présent disponibles pour faciliter le partage de techniques innovantes et de savoir-faire rares : leur utilisation à grande échelle sera un moyen efficace pour démocratiser les pratiques sans pesticides. De plus, en se basant sur des outils d'épidémiosurveillance et de suivi des pratiques propres à chaque exploitation, il est possible de rendre compte du seuil de déclenchement de telle ou telle pratique alternative au sein de l'itinéraire technique. Ceci devient particulièrement intéressant si l'information produite en temps réel est partagée entre les agriculteurs, qui peuvent alors décider d'ajuster ou non leurs propres itinéraires techniques. Ainsi, ce partage accru d'information grâce au numérique permet de mobiliser des leviers de gestion des bioagresseurs au-delà de l'exploitation agricole, en facilitant l'identification de solutions techniques fonctionnant dans les autres exploitations et en favorisant leur mise en place coordonnée à l'échelle du paysage. Néanmoins, ces avancées prometteuses doivent être mises au regard de deux problématiques : le coût élevé de ces nouveaux équipements, et le sentiment généré de perte d'autonomie de décision par l'agriculteur dès lors que les équipements sont directement reliés aux capteurs.

Conclusion

Par différents aspects, les agroéquipements et le numérique apparaissent comme des leviers extrêmement pertinents à mobiliser pour suivre et améliorer l'état de santé de l'agroécosystème. Le développement des agroéquipements spécifiquement dédiés à une agriculture sans pesticides est encore largement émergent. Il offre des perspectives importantes, d'autant plus importantes qu'il sera associé et co-construit avec une évolution des systèmes de culture. Néanmoins, les coûts associés au développement des différentes technologies exposées ici restent actuellement un frein jugé important. D'une part, un changement d'orientation technologique pour les professionnels de l'agroéquipement est nécessaire afin de limiter les coûts, adapter les chaines de production, voire mutualiser les investissements pour démocratiser l'accès aux technologies de pointe. Les dynamiques de groupe favorisant l'autoconstruction des équipements représentent également une opportunité certaine : elles peuvent être mises en avant pour mutualiser les investissements tout en partageant les compétences et ainsi stimuler les innovations. D'autre part, les surcoûts potentiels liés à l'utilisation de ces technologies, qui contribuent à réduire drastiquement l'utilisation des pesticides, devront être pris en compte dans les chaines de valeur, à travers, en particulier, la création de filières dédiées valorisant les externalités positives de telles technologies et/ou le soutien de politiques publiques. Au-delà des aspects économiques, le plus gros défi pour le secteur des équipements et du numérique sera certainement de passer de l'épidémiosurveillance centrée sur les bioagresseurs à une surveillance de l'état de santé de l'agroécosystème beaucoup plus complexe, orientée vers la mobilisation de la prophylaxie. Cette extension de l'épidémiosurveillance peut conduire à inclure des espaces interstitiels et des zones naturelles et à mobiliser également d'autres acteurs tels que les services en charge de la santé vétérinaire et de la santé publique. Cela pose néanmoins la question de l'impact de potentielles interventions au sein des zones naturelles, effectuées certes dans une optique prophylactique, mais qui peuvent avoir aussi comme conséquence d'accroitre encore notre mainmise sur l'environnement.

Références bibliographiques

Allen-Sader C., Thurston W., Meyer M., Nure E., Bacha N., Alemayehu Y., *et al.*, 2019. An early warning system to predict and mitigate wheat rust diseases in Ethiopia, *Environmental Research Letters*, 14(11) :115004. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4034

Araus J.L., Cairns J.E., 2014. Field high-throughput phenotyping: the new crop breeding frontier, *Trends in plant science*, 19(1):52-61. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.09.008

Axema, 2020. *Rapport économique 2020*, Paris, Axema, 48 p.

Bechar A., Edan Y., Meyer J., Rotman M., Friedman L., 2000. Human-machine collaboration for melons detection, *ASAE Annual International Meeting*, 9-12 July 2000, Milwaukee, American Society of Agricultural Engineers, (1-7).

Berducat M., Debain C., Lenain R., Cariou C., 2009. Evolution of agricultural machinery: the third way, *7th European Conference on Precision Agriculture*, 6-8 July 2009, Wageningen, European Conference on Precision Agriculture, (363-369). https://hal.inrae.fr/hal-02592734

Bourhis Y., Bell J.R., van den Bosch F., Milne A.E., 2021. Artificial neural networks for monitoring network optimisation—a practical example using a national insect survey, *Environmental Modelling & Software*, 135:104925. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104925

Cesewski E., Johnson B.N., 2020. Electrochemical biosensors for pathogen detection, *Biosensors and Bioelectronics*, 159:112214. https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112214

Choe Y.C., Park J., Chung M., Moon J., 2009. Effect of the food traceability system for building trust: price premium and buying behavior, *Information Systems Frontiers*, 11(2) :167-179. https://doi.org/10.1007/s10796-008-9134-z

Cubero S., Marco-Noales E., Aleixos N., Barbé S., Blasco J., 2020. RobHortic: a field robot to detect pests and diseases in horticultural crops by proximal sensing, *Agriculture*, 10(7) :276. https://doi.org/10.3390/agriculture10070276

Cui S., Ling P., Zhu H., Keener H.M., 2018. Plant pest detection using an artificial nose system: a review, *Sensors*, 18(2) :378. https://doi.org/10.3390/s18020378

Cunningham A.A., Daszak P., Wood J.L.N., 2017. One Health, emerging infectious diseases and wildlife: two decades of progress?, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1725) :20160167. https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0167

Davis M.F., Rankin S.C., Schurer J.M., Cole S., Conti L., Rabinowitz P., *et al.*, 2017. Checklist for One Health epidemiological reporting of evidence (COHERE), *One Health*, 4 :14-21. https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2017.07.001

Eco-Mulch, Arvalis, 2019. *ARVALIS avec Eco-Mulch trouve une solution pour gérer les couverts vivants en bio*.

ÉcophytoPIC, 2021. *GECO, un outil du portail ÉcophytoPIC*.

Fielke S., Taylor B., Jakku E., 2020. Digitalisation of agricultural knowledge and advice networks: A state-of-the-art review, *Agricultural Systems*, 180 :102763. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102763

Fuentes-Peñailillo F., Acevedo-Opazo C., Ortega-Farías S., Rivera M., Verdugo-Vásquez N., 2021. Spatialized system to monitor vine flowering: Towards a methodology based on a low-cost wireless sensor network, *Computers and Electronics in Agriculture*, 187 :106233. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106233

Gaillard C., 2021. L'Atelier Paysan, *L'Atelier Paysan*.

Houllier F., Merilhou-Goudard J.-B., 2016. Les sciences participatives en France : Etats des lieux, bonnes pratiques et recommandations.

INRAE, 2021a. PHEROSENSOR. https://www6.inrae.fr/cultiver-proteger-autrement/Les-Projets/PHEROSENSOR

INRAE, 2021b. BEYOND. https://www6.inrae.fr/cultiver-proteger-autrement/Les-Projets/BEYOND

Jacquet F., Avrin G., Barbosa V., Boffety D., El Khoury M., Sabarly L., 2018. Le Challenge ROSE (2018–2021) : évaluation itérative d'approches de recherche parallèles pour le désherbage intra-rang, *Innovations Agronomiques*, 67 :3-15. https://doi.org/10.15454/ALHYE1

Jepsen M.R., Kuemmerle T., Müller D., Erb K., Verburg P.H., Haberl H., … Reenberg A., 2015. Transitions in European land-management regimes between 1800 and 2010, *Land Use Policy*, 49 :53-64. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.07.003

Joly P.-B., 2017. Beyond the competitiveness framework? Models of innovation revisited, *Journal of Innovation Economics Management*, 22(1) :79-96. https://doi.org/10.3917/jie.pr1.0005

Jung J., Maeda M., Chang A., Bhandari M., Ashapure A., Landivar-Bowles J., 2021. The potential of remote sensing and artificial intelligence as tools to improve the resilience of agriculture production systems, *Current Opinion in Biotechnology*, 70 :15-22. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2020.09.003

Kashyap P.L., Kumar S., Srivastava A.K., 2017. Nanodiagnostics for plant pathogens, *Environmental Chemistry Letters*, 15(1) :7-13. https://doi.org/10.1007/s10311-016-0580-4

Kirkeby C., Rydhmer K., Cook S.M., Strand A., Torrance M.T., Swain J.L., … Græsbøll K., 2021. Advances in automatic identification of flying insects using optical sensors and machine learning, *Scientific Reports*, 11(1) :1555. https://doi.org/10.1038/s41598-021-81005-0

Labreuche J., Minette S., Légère R., Brun D., 2017. Pratiques culturales adaptées pour réussir l'implantation des cultures intermédiaires, *Innovations Agronomiques*, 62 :1-16. https://doi.org/10.15454/1.517407820290758E12

Lakhwani K., Gianey H., Agarwal N., Gupta S., 2019. Development of IoT for smart agriculture: a review, *in* Rathore V.S., Worring M., Mishra D.K., Joshi A., Maheshwari S. (éd.), *Emerging Trends in Expert Applications and Security*, Singapore, Springer, 425-432. (coll. Advances in Intelligent Systems and Computing). https://doi.org/10.1007/978-981-13-2285-3_50

L'Atelier Paysan, 2021. Étoiles de boudibinage, *L'Atelier Paysan*.

Leyronas C., Morris C.E., Choufany M., Soubeyrand S., 2018. Assessing the aerial interconnectivity of distant reservoirs of Sclerotinia sclerotiorum, *Frontiers in Microbiology*, 9 :2257. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02257

Lima M.C.F., Leandro M.E.D. de A., Valero C., Coronel L.C.P., Bazzo C.O.G., 2020. Automatic detection and monitoring of insect pests—A review, *Agriculture*, 10(5) :1-24. https://doi.org/10.3390/agriculture10050161

Lürig M.D., Donoughe S., Svensson E.I., Porto A., Tsuboi M., 2021. Computer Vision, Machine Learning, and the Promise of Phenomics in Ecology and Evolutionary Biology, *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9 :148. https://doi.org/10.3389/fevo.2021.642774

Maillot T., Jones G., Vioix J.-B., Colbach N., 2020. Des technologies innovantes pour optimiser le désherbage de précision, *Innovations Agronomiques*, 81(209) :101-116. https://doi.org/10.15454/3t27-5f37

Martinetti D., Soubeyrand S., 2019. Identifying Lookouts for Epidemio-Surveillance: Application to the Emergence of Xylella fastidiosa in France, *Phytopathology®*, 109(2) :265-276. https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-18-0237-FI

Morris C.E., Géniaux G., Nédellec C., Sauvion N., Soubeyrand S., 2021. One Health concepts and challenges for surveillance, forecasting, and mitigation of plant disease beyond the traditional scope of crop production, *Plant Pathology*, 00 :1-12. https://doi.org/10.1111/ppa.13446

OECD, 2019. *Digital Opportunities for Better Agricultural Policies*, Paris, France, OECD, 234 p. https://doi.org/10.1787/571a0812-en

Ojha T., Misra S., Raghuwanshi N.S., 2015. Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges, *Computers and Electronics in Agriculture*, 118 :66-84. https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.011

Parisey N., Leclerc M., Adamczyk-Chauvat K., 2022. Optimal spatial monitoring of populations described by reaction–diffusion models. *Journal of theoretical biology*, 534:110976. https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2021.110976

Renault S., 2019. C'est qui le Patron ?! Les enjeux de la mobilisation des consom'acteurs, *Annales des Mines - Gerer et comprendre*, 138(4) :39-56. https://doi.org/10.3917/geco1.138.0039

Rimbaud L., Fabre F., Papaïx J., Moury B., Lannou C., Barrett L.G., *et al*., 2021. Models of plant resistance deployment, *Annual Review of Phytopathology*, 59(1) :125-152. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-020620-122134

Ryan S.F., Adamson N.L., Aktipis A., Andersen L.K., Austin R., Barnes L., *et al*. 2018. The role of citizen science in addressing grand challenges in food and agriculture research, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285(1891) :20181977. https://doi.org/10.1098/rspb.2018.1977

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 :102856. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102856

Skelsey P., 2021. Forecasting risk of crop disease with anomaly detection algorithms, *Phytopathology®*, 111(2) :321-332. https://doi.org/10.1094/PHYTO-05-20-0185-R

Stecomat, 2021. Farmdroid, le premier robot autonome de semis et de désherbage mécanique intégral au monde, *Stecomat*.

Streito J.-C., Chartois M., Pierre É., Dusoulier F., Armand J.-M., Gaudin J., Rossi J.-P., 2021. Citizen science and niche modeling to track and forecast the expansion of the brown marmorated stinkbug Halyomorpha halys (Stål, 1855), *Scientific Reports*, 11(1) :11421. https://doi.org/10.1038/s41598-021-90378-1

Tewari S., Leskey T.C., Nielsen A.L., Piñero J.C., Rodriguez-Saona C.R., 2014. Use of pheromones in insect pest management, with special attention to weevil pheromones, *in* Abrol D.P. (éd.), *Integrated Pest Management*, San Diego, Academic Press, 141-168. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-398529-3.00010-5

Thompson R.N., Brooks-Pollock E., 2019. Detection, forecasting and control of infectious disease epidemics: modelling outbreaks in humans, animals and plants, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 374(1775) :20190038. https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0038

Vasconez J.P., Kantor G.A., Auat Cheein F.A., 2019. Human–robot interaction in agriculture: A survey and current challenges, *Biosystems Engineering*, 179 :35-48. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.12.005

Viboud, C., Sun, K., Gaffey, R., Ajelli, M., Fumanelli, L., Merler, S., *et al*. 2018. The RAPIDD ebola forecasting challenge: Synthesis and lessons learnt. *Epidemics*, 22:13-21. https://doi.org/10.1016/j.epidem.2017.08.002

Weersink A., Fraser E., Pannell D., Duncan E., Rotz S., 2018. Opportunities and challenges for big data in agricultural and environmental analysis, *Annual Review of Resource Economics*, 10(1) :19-37. https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100516-053654

Yang P., Verhoef W., Prikaziuk E., van der Tol C., 2021. Improved retrieval of land surface biophysical variables from time series of Sentinel-3 OLCI TOA spectral observations by considering the temporal autocorrelation of surface and atmospheric properties, *Remote Sensing of Environment*, 256 :112328. https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112328

Zhao G., Liu S., Lopez C., Lu H., Elgueta S., Chen H., Boshkoska B.M., 2019. Blockchain technology in agri-food value chain management: A synthesis of applications, challenges and future research directions, *Computers in Industry*, 109 :83-99. https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.04.002

Chapitre 7

Les leviers politiques et organisationnels

Pascale Bazoche, Alain Carpentier, Adelaide Fadhuile, Fabienne Femenia, Cédric Gendre, Benoit Grimonprez, Mourad Hannachi, Florence Jacquet, Julia Jouan, Alexandre Sauquet, Julie Subervie, Sophie Thoyer

Les chapitres précédents ont montré qu'il existe aujourd'hui des connaissances et savoir-faire permettant de transformer les systèmes agricoles afin de développer de nouvelles manières de protéger les cultures contre les bioagresseurs. De nouvelles pistes de recherche visant à aller jusqu'au bout du chemin vers une agriculture sans pesticides ont également été identifiées. Mais les solutions techniques seules ne suffisent pas et, pour être adoptées par le plus grand nombre d'agriculteurs, doivent être accompagnées de solutions à la fois politiques et organisationnelles. Les solutions politiques font référence à l'ensemble des moyens dont disposent les pouvoirs publics pour soutenir l'effort de transition. Les solutions organisationnelles, quant à elles, incluent les initiatives privées qui, sans s'opposer aux initiatives publiques, émanent directement des acteurs de la transition implantés dans les territoires.

Bien entendu, les conséquences des actions envisageables sont difficiles à anticiper et à évaluer à l'avance (« *ex ante* »), parce qu'elles dépendent de nombreux facteurs exogènes, tels que l'équilibre entre productions végétales et productions animales à l'échelle nationale et à l'échelle mondiale, ou encore l'impact du changement climatique sur la production et les bioagresseurs. Prendre en compte l'influence de ces différents facteurs suppose une analyse fine des dynamiques possibles et la construction de différents scénarios. C'est d'ailleurs l'objet d'un travail de prospective en cours qui permettra d'identifier les effets de la transition vers une agriculture sans pesticides dans différents futurs possibles (encadré 7.1).

Au cours des dernières années, plusieurs types d'actions ont été mis en œuvre pour réduire l'utilisation des pesticides sur le territoire français : l'interdiction de l'usage de certains produits phytosanitaires, les aides agro-environnementales de la PAC, ou encore les programmes de démonstration et d'assistance technique dans le cadre du plan Écophyto pour la mise au point de systèmes de culture économes en pesticides. Aujourd'hui, force est de constater que ces actions n'ont pas permis d'atteindre

les objectifs environnementaux fixés par les pouvoirs publics. Il existe toutefois bien d'autres leviers, ou combinaisons de leviers, encore jamais mobilisés en France, susceptibles de déclencher une transition à grande échelle vers une agriculture sans pesticides.

Ce chapitre analyse pourquoi, malgré les efforts consentis par les pouvoirs publics pour inciter les agriculteurs à réduire l'usage des pesticides, les instruments mobilisés n'ont pas atteint le but recherché. Il présente également les innovations politiques et organisationnelles susceptibles d'être mobilisées dans un futur proche afin de corriger l'inefficacité des politiques passées ou d'en imaginer de nouvelles. Les solutions proposées dans ce qui suit sont développées sur la base de cinq recommandations :
– plus de transparence dans les options offertes aux agriculteurs qui sont les premiers acteurs de la transition,
– plus d'équité dans la répartition du coût que représente le passage à une agriculture sans pesticides,
– plus de flexibilité dans les politiques de soutien afin d'intégrer l'incertitude liée au changement de système de production,
– plus de coordination entre les agriculteurs afin d'intégrer les enjeux spatiaux,
– plus de concertation entre les acteurs pour favoriser l'élaboration d'une conception commune de la transition vers une agriculture sans pesticides.

Encadré 7.1. La Prospective 2050 : une agriculture européenne sans pesticides

La Prospective agriculture européenne sans pesticides à l'horizon 2050 est une approche visant à anticiper les changements à venir afin de définir des trajectoires de transition intégrant d'une part les relations entre les systèmes de culture, les filières, les écosystèmes et la consommation alimentaire, et d'autre part les incertitudes majeures (comme par exemple l'impact du changement climatique et l'évolution des marchés internationaux). Elle est mobilisée pour construire des scénarios d'agriculture sans pesticides pour l'UE en 2050, en répondant à deux questions :
– quelles pourraient être les différentes formes d'agriculture sans pesticides en 2050, avec quelles conséquences sur la production, l'usage des terres, le commerce et la biodiversité ?
– quelles pourraient être les différentes trajectoires vers ces formes d'agriculture sans pesticides ?

Pour cela, elle mobilise une approche systémique qui relie l'émergence de systèmes agricoles sans pesticides au devenir des systèmes alimentaires, des territoires, de la biodiversité, des politiques publiques et aux conséquences du changement climatique. La prospective comprend différentes étapes, de la définition du système d'études, à la mise en débat des scénarios, en passant par une phase de modélisation et simulation des scénarios (INRAE, 2021b).

⏩ Les politiques de développement agricole et de formation : comment donner les clés aux agriculteurs pour cultiver autrement ?

Le développement de systèmes sans pesticides suppose le développement d'un ensemble cohérent de pratiques agroécologiques qui valorisent les régulations naturelles. Cet objectif complexe implique que les acteurs du monde agricole aient des

compétences variées et des capacités de réponse aux problèmes auxquels ils sont confrontés à différentes échelles. Ainsi, les agriculteurs et leurs conseillers doivent apprendre à gérer de nouveaux systèmes de culture de plus en plus complexes, où l'imprévu et la variabilité sont la norme (Girard et Magda, 2018). Cette évolution exige une montée en compétences des agriculteurs, à travers (i) la formation initiale et continue, (ii) l'entraide par les pairs facilitant l'apprentissage par situation et (iii) une évolution du conseil agricole.

La formation initiale et continue

Actuellement, la formation des agriculteurs passe par différentes structures de l'enseignement technique agricole, voire dans des cas plus rares, par les écoles d'ingénieurs. Ces différentes formations ont en commun d'être basées sur des éventails d'enseignements monodisciplinaires (comme par exemple les sciences du végétal, la zootechnique ou l'économie). En 2018, les activités qui mobilisent des connaissances multiples, assimilables à de l'interdisciplinarité ne représentaient qu'environ 20 % des activités proposées pour l'obtention du baccalauréat professionnel et du brevet de technicien supérieur (BTS) (DGER, 2018). Néanmoins, des progrès en la matière ont été faits depuis le lancement du plan « Enseigner à produire autrement » en 2013. Certaines formations, en école d'ingénieur en particulier, sont entièrement consacrées à l'agroécologie, même si elles le sont souvent sous le prisme dominant d'une discipline en particulier, comme l'écologie par exemple. La question du « produire sans pesticides » n'est pour l'instant pas traitée en tant que telle du fait du manque de connaissances à ce sujet, hormis dans les formations portant sur l'AB. Ainsi, il semble important de questionner l'actuelle organisation de l'enseignement agricole, en s'interrogeant notamment sur la nécessité de développer des activités pédagogiques interdisciplinaires qui permettent d'accompagner les futurs agriculteurs et leurs conseillers vers la production sans pesticides. Par exemple, l'évaluation de la triple performance (économique, environnementale, sociale) de pratiques innovantes permettant de se passer de pesticides serait utile non seulement pour les faire découvrir aux étudiants, mais aussi pour prendre du recul quant à leur mise en application dans différents contextes. De plus, l'enseignement actuellement dispensé repose sur des faits parfaitement établis scientifiquement ou des méthodes éprouvées. Or, les pratiques conduisant à une forte diminution des pesticides sont émergentes, souvent issues de la pratique d'agriculteurs pionniers, et varient souvent d'une zone géographique à une autre. Il pourrait donc être souhaitable d'imaginer de nouvelles façons d'enseigner ces éléments encore en construction, en les adaptant notamment à la diversité des lieux et en s'appuyant plus sur les agriculteurs innovants (Gardiès et Hervé, 2015). Enfin, apprendre à gérer l'incertitude, à évaluer les risques et à entreprendre des transitions sont des compétences aujourd'hui essentielles pour un agriculteur. Les formations agricoles devraient leur permettre de les acquérir (DGER, 2018). Pour cela, l'utilisation de « jeux sérieux », en particulier ceux couplés à un outil de modélisation, représente une piste intéressante car ces « jeux » permettent de prendre en compte une multitude de facteurs (météo, choix d'itinéraires techniques) et de visualiser simplement leurs conséquences (Jouan *et al.*, 2020). En parallèle, la formation dite « par projets » favorise l'autonomie et la prise de décision de l'étudiant en le faisant travailler sur des problématiques concrètes.

En outre, dans le but d'accompagner la montée en compétence des agriculteurs, une politique qui consisterait à favoriser les formations supérieures par alternance à tous les niveaux pourrait être envisagée. Cela permettrait d'accompagner des jeunes peu scolaires vers une poursuite d'études plus longues, de type école d'ingénieur, et ainsi de leur faire acquérir des compétences supplémentaires, en particulier autour de la gestion des transitions et de la mise en place de stratégies globales en prenant en compte l'ensemble des contraintes techniques, environnementales et économiques auxquelles sont confrontés les agriculteurs. Enfin, un accès facilité à la formation continue de haut niveau pour les agriculteurs en simplifiant leur financement, voire même en favorisant l'accès aux services de remplacement pendant les formations, représenterait une politique intéressante.

L'entraide par les pairs facilitant l'apprentissage en situation

L'apprentissage dit « en situation », basé sur l'analyse de problématiques et d'innovations rencontrées dans des exploitations agricoles professionnelles est souvent considéré comme un enjeu important de la formation. Cette forme d'apprentissage en groupe est susceptible de développer l'entraide entre pairs, de favoriser l'adoption de nouvelles pratiques, et d'encourager les échanges sur les solutions envisageables et les difficultés potentielles de leur mise en œuvre (Garforth *et al.*, 2003). Différentes initiatives pour favoriser cet apprentissage sont déjà développées sur le terrain à partir de structures qui existent déjà comme les groupements de développement agricole (GDA) ou les centres d'études techniques agricoles (CETA). D'autres initiatives existent au sein des groupes DEPHY-Écophyto (encadré 7.2), dans les groupes d'intérêt économique et environnemental (GIEE) mis en place en 2014, ou encore à l'international dans les *farmer field schools*. Au sein de ces groupes, le rôle du conseiller est de faciliter le dialogue entre agriculteurs, d'apporter des connaissances spécifiques et de faire émerger des solutions adaptées. On parle alors de *joint experiential learning*, c'est-à-dire d'une méthode où le conseiller et l'agriculteur contribuent conjointement à l'apprentissage (Eshuis et Stuiver, 2005).

Cet apprentissage de type ascendant et participatif est loin d'être la norme aujourd'hui (Klerkx et Jansen, 2010). Son développement pourrait, par exemple, être soutenu par une politique de subvention de l'adhésion des agriculteurs et des outils à la disposition des conseillers. Ceci est d'autant plus important qu'il peut être difficile pour le conseiller d'amener le groupe à sortir des schémas classiques et des problèmes quotidiens des agriculteurs. Le risque est de rester sur un « tour de plaine » abordant des problèmes tactiques et non pas stratégiques, en particulier n'intégrant pas l'environnement extérieur à la parcelle ou les pas de temps longs (Cerf *et al.*, 2019).

Encadré 7.2. Le plan Écophyto : des objectifs très ambitieux pour des résultats décevants

Le plan Écophyto a été lancé en 2008 par le gouvernement français et plusieurs fois révisé depuis. Le plan Écophyto I (initialement appelé « plan Écophyto 2018 ») a débuté en 2008 : il visait, à échéance de 10 ans, une réduction de l'usage des pesticides de 50 % « si possible ». Ce premier plan portait donc une cible qui

…

…

nécessitait d'aller au-delà de l'optimisation des pratiques pour mettre en place une véritable reconception des systèmes de culture (Jacquet *et al.*, 2011). Pour atteindre cet objectif, il comprenait différentes actions. Tout d'abord, la mise en place du réseau DEPHY-Ferme qui rassemble encore aujourd'hui des fermes de démonstration : en 2014, on comptait environ 190 groupes d'une dizaine d'exploitations couvrant les principales productions françaises. En plus de ces exploitations professionnelles, des dispositifs expérimentaux économes en pesticides ont été créés (les dispositifs DEPHY-Expé). Le deuxième axe du plan Écophyto est constitué du réseau de surveillance biologique du territoire qui vise à observer la présence de bioagresseurs. Il donne lieu à une publication hebdomadaire, le BSV, adapté selon les régions, et qui vise à permettre aux agriculteurs et à leurs conseillers, de mieux cibler les besoins réels d'intervention. D'autres actions concernent la formation des (futurs) agriculteurs via le dispositif « Enseigner à produire autrement », la mise en place d'un certificat d'aptitude, le Certiphyto, exigé pour avoir le droit d'utiliser des pesticides, ainsi que la production et la diffusion d'outils et de connaissances sur les systèmes économes en pesticides. Ce plan intègre aussi un volet recherche sur l'IPM (voir chapitre 2), ainsi que sur les impacts environnementaux et sanitaires des pesticides. Sur la période 2009-2014, le plan Écophyto I a bénéficié d'un financement à hauteur de 361 millions d'euros, la moitié provenant de la RPD prélevée auprès des vendeurs de pesticides. Cinq ans après sa mise en œuvre, ce premier plan a été remanié car il était loin d'avoir initié la bonne trajectoire pour atteindre son objectif (– 50 % d'utilisation des pesticides), l'utilisation de pesticides ayant augmenté de 8 % pendant cette période (figure 1.11).

En 2015, le plan Écophyto II est lancé, affirmant une nouvelle fois l'objectif de réduire de moitié l'utilisation des pesticides en 10 ans. Pour cela, de nouvelles actions sont mises en place comme les CEPP (encadré 1.11) : ce dispositif impose aux vendeurs de pesticides la réalisation d'actions validées par une commission indépendante et contribuant *a priori* à une réduction de l'utilisation des pesticides. Le plan Écophyto II a également pour ambition d'engager la transition de 30 000 exploitations agricoles vers des bas niveaux d'utilisation de pesticides. Au vu des résultats toujours insuffisants en matière de réduction des pesticides, ce deuxième plan a également été remanié. En 2018, le plan Écophyto II+ est annoncé, bénéficiant de 71 millions d'euros par an. Il vise à consolider le réseau DEPHY et intègre également la problématique de la sortie du glyphosate. Dans ce cadre, de nouveaux objectifs sont identifiés : redéfinir les limites des zones non traitées (ZNT), mettre fin à l'utilisation du glyphosate avant 2021, diminuer l'utilisation des pesticides de 25 % avant 2020 et de 50 % avant 2025 (ministère de la Transition écologique et solidaire, 2018). Néanmoins, les baisses escomptées n'ont pas eu lieu pour l'instant, à l'exception de la suppression des produits jugés les plus nocifs comme les CMR 1 et 2, où une baisse significative est enregistrée essentiellement du fait du retrait massif des autorisations de mise en marché (voir chapitre 1). Le dynamisme de nombreux groupes DEPHY et les changements de pratiques qu'ils ont pu amorcer représentent tout de même une avancée certaine qu'il faudrait pouvoir généraliser à l'ensemble des agriculteurs.

Une évolution du conseil agricole

Réduire drastiquement les pesticides implique une redéfinition en profondeur du système de culture (chapitre 3). Cette reconception doit porter sur l'ensemble des pratiques, et pas seulement celles concernant directement les bioagresseurs, en

intégrant par exemple la fertilisation azotée, tout en s'assurant que les changements de pratiques ne mettront pas en péril l'équilibre économique de l'exploitation. Ici, le conseil dit « stratégique » est susceptible de jouer un rôle clé (encadré 7.3). Ce type de conseil est obligatoirement personnalisé et s'inscrit dans le long terme. À cet égard, il diffère donc des offres de conseil standardisé à bas coût, fréquentes jusqu'à aujourd'hui (Labarthe et Laurent, 2013).

Des travaux suggèrent que le développement du conseil stratégique implique une refonte du métier de conseil agricole (Cerf *et al.*, 2010 ; Guillot *et al.*, 2010). Le *back office*, qui permet d'élaborer les contenus à proposer aux agriculteurs (en mettant en place des expérimentations par exemple), devrait être renforcé, afin de fournir aux conseillers en *front office* de nombreuses références locales nécessaires à la diffusion des nouvelles pratiques. Le repérage et l'analyse de pratiques d'agriculteurs réussissant à réduire les pesticides seraient également opportuns afin de produire des connaissances diffusables. Ce travail de *back office* étant coûteux, une solution serait de créer des « pôles de compétences » sur certains territoires : en associant différents organismes de développement agricole, voire des instituts techniques, ils permettraient de fournir des preuves solides de l'efficacité des nouvelles pratiques, tout en mutualisant les coûts du conseil et en gardant l'ancrage local (Labarthe *et al.*, 2013 ; Reymond *et al.*, 2012). Ceci serait particulièrement pertinent dans le cas du biocontrôle qui souffre d'un déficit d'adoption par les agriculteurs, dû notamment au manque d'offre par les distributeurs, à la complexité de sa mise en œuvre, à sa forte dépendance aux conditions locales mais également à l'absence de preuve quant à l'efficacité de certaines des solutions de biocontrôle (Villemaine *et al.*, 2021). Là aussi on pourrait envisager de mettre en place une traque aux innovations centrée sur les situations où des pratiques de biocontrôle ont été mises en place afin de contribuer à montrer leur efficacité. En complément, le développement d'expérimentations agriculteurs-chercheurs, où des terrains d'expérimentations sont mis à disposition par des agriculteurs et étudiés par des chercheurs, constitue une approche intéressante : ils contribuent à perfectionner les systèmes innovants et produire des références afin de montrer au plus grand nombre l'intérêt de systèmes sans pesticides (Thomas, 2018). Enfin, le développement du conseil stratégique pose la question de la privatisation du conseil : une étude à l'échelle européenne montre qu'il est plus facile de proposer du conseil personnalisé pour les organismes de développement agricoles privés car les conseillers y travaillant ont généralement un nombre plus faible d'exploitations à suivre. Toutefois, la privatisation du conseil ne doit pas se faire au détriment de l'accessibilité, en particulier pour les exploitations de petites tailles (Knierim *et al.*, 2017).

Encadré 7.3. Le conseil stratégique, de quoi parle-t-on ?

Depuis le 1er janvier 2021, la loi EGALIM (ordonnance n°2019-361) impose la séparation des activités de vente et de conseil des pesticides dans le but de réduire leur utilisation. Dans ce cadre, les agriculteurs sont dans l'obligation de bénéficier d'un conseil stratégique à l'utilisation des pesticides afin de renouveler leur Certiphyto, un certificat obligatoire pour avoir le droit d'utiliser des pesticides. Le conseil stratégique institutionnalisé comprend deux étapes. Tout d'abord, un diagnostic analyse le contexte global de l'exploitation, la gestion des bioagresseurs et la stratégie actuelle en termes de protection des plantes. Ensuite, un plan d'actions est défini

…

…

pour réduire l'usage et/ou l'impact des pesticides, en cohérence avec les objectifs technico-économiques de l'agriculteur et ses projets à court et moyen termes. En plus de ce conseil stratégique obligatoire, l'agriculteur peut bénéficier de conseils spécifiques tout au long de la campagne (pour l'utilisation d'un produit en particulier), mais ces conseils, comme les conseils stratégiques, ne peuvent être proposés que par des structures indépendantes de la vente de pesticides (ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2021). Les structures impliquées dans la vente peuvent toutefois conseiller des solutions de biocontrôle et toutes les solutions couvertes par des fiches-actions CEPP (encadré 1.11). Elles sont également tenues de prodiguer le conseil de sécurité relatif à l'utilisation des pesticides vendus.

Le conseil stratégique institutionnalisé par la loi EGALIM représente une base intéressante pour le conseil stratégique tel que défini dans ce chapitre. Dans l'objectif de diminuer fortement l'utilisation des pesticides, il pourrait être souhaitable d'y inclure également un diagnostic et une potentielle refonte de l'ensemble du système de culture, pour proposer d'intégrer, par exemple, des cultures de diversification et des infrastructures paysagères choisies pour leurs services écosystémiques. En allant plus loin, le conseil stratégique peut aussi viser à ce que l'agriculteur soit en mesure de toucher des aides ou de faire labelliser son exploitation pour ses pratiques alternatives. Enfin, le conseil stratégique sera pleinement efficace s'il est mis en place à une échelle suffisamment grande afin qu'un collectif d'agriculteurs puisse en bénéficier, permettant à certaines actions mises en place, comme les infrastructures paysagères, d'exprimer tout leur potentiel environnemental.

À retenir

Aujourd'hui, les politiques de formation agricole reposent principalement sur la création de groupes d'agriculteurs, susceptibles de faciliter l'apprentissage entre pairs, et la mise en place d'un conseil agricole plus personnalisé. Les études récentes suggèrent qu'il serait intéressant de soutenir une évolution de ce modèle, vers un conseil agricole et un accompagnement des agriculteurs plus stratégiques, c'est-à-dire permettant de voir plus loin que l'échelle de la parcelle, en intégrant l'ensemble de l'environnement socio-économique et naturel de l'exploitation. De telles évolutions peuvent obliger à une transformation des modèles économiques de nombreuses structures fournissant historiquement ces services de conseil, comme les coopératives ou les Chambres d'agriculture. Un accompagnement de l'État sera donc sans doute nécessaire pour soutenir ce type d'évolutions. De la même manière, il semble souhaitable, compte tenu des objectifs environnementaux fixés, que la formation agricole, aussi bien initiale que continue, puisse bénéficier, elle aussi, d'un remaniement en profondeur. En particulier, il semble aujourd'hui indispensable de pouvoir transmettre aux agriculteurs les savoirs et savoir-faire existants relatifs aux pratiques agroécologiques.

⏩ Les instruments réglementaires : quel rôle dans la régulation des pesticides ?

Les pesticides font l'objet, depuis plusieurs années, d'une intensification de la pression réglementaire sans précédent (Thibierge et Chevallier, 2013). Déjà complexes

et nombreuses, les règles relatives à la mise sur le marché, comme à l'usage des pesticides, croissent de manière importante[19], avec des impacts directs sur les stratégies des acteurs du monde agricole. Deux faits marquants caractérisent les nouvelles règles : d'une part, elles réduisent l'éventail des substances disponibles pour la protection des cultures ; d'autre part, elles réduisent les surfaces agricoles utiles où elles peuvent être épandues. Pour autant, ces contraintes réglementaires n'ont pas d'effets univoques concernant la transition vers des systèmes de culture sans pesticides.

Moins de molécules chimiques à disposition ?

Alors que des substances actives nouvelles sont toujours homologuées, d'autres, communément utilisées par les agriculteurs pour la protection des plantes, sont régulièrement retirées du marché ou restreintes dans leur utilisation (encadré 7.4). Ce phénomène procède de plusieurs logiques juridiques concomitantes.

Il s'agit, en premier lieu, du refus de l'UE de ré-autoriser la mise sur le marché de certains pesticides à la toxicité avérée. La liste est désormais longue : atrazine, chlordécone, paraquat, ichloropropène, cyanamide, propisochlore, perméthrine, diméthoate, etc. En 2013, trois substances (clothianidine, thiaméthoxame et imidaclopride) appartenant à la classe des néonicotinoïdes ont été proscrites en raison des dangers qu'elles font courir pour la santé des pollinisateurs[20]. Cette décision fut suivie en France par l'interdiction, quasi-totale, des pesticides de cette famille (loi n° 2016-1087, 8 août 2016). Bien que des dérogations aient été admises en 2020 dans certaines filières particulièrement exposées au risque épidémiologique, comme la betterave à sucre, elles ne l'ont été que pour une période limitée, qui expirera le 1er janvier 2023 (Grimonprez, 2021).

Encadré 7.4. Jurisprudence en matière d'autorisation de pesticides

Les tribunaux contrôlent de plus en plus strictement la légalité des autorisations de mise sur le marché des pesticides et n'hésitent pas à les invalider au nom du principe de précaution. Par exemple, le Tribunal administratif de Nice a annulé les autorisations concernant plusieurs pesticides contenant du sulfoxaflor au motif du risque de toxicité important pour les insectes pollinisateurs[21]. D'autres reproches (nocivité pour les organismes aquatiques, reprotoxicité, suspicion d'être cancérogène pour les humains) ont amené le Tribunal, puis la Cour d'appel de Lyon, à censurer pour erreur manifeste d'appréciation l'autorisation de mise sur le marché du Roundup Pro 360[22]. Bien que ces décisions soient encore isolées, elles augurent d'une multiplication des recours contentieux contre les pesticides et d'une attitude des juges plus pointilleuse qu'autrefois. Il devrait alors en résulter un filtrage plus serré des molécules accessibles.

19. Le site https://www.pestidroit.fr recense l'ensemble des sources et de la littérature juridique sur les pesticides.
20. Règlement d'exécution (UE) n° 485/2013, 24 mai 2013 ; Tribunal de l'Union européenne, 1ère chambre, 17 mai 2018, n° d'affaire T-429/13 et T-451/13.
21. TA Nice, 29 nov. 2019, n° 1704687.
22. TA Lyon, 15 janv. 2019, n° 1704067, Comité de recherche et d'information indépendantes sur le génie génétique ; CAA de Lyon, 3e chambre – n° 19LY01017-19LY01031 – Société Bayer Seeds SAS - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, 29 juin 2021.

La procédure « d'évaluation comparative » entre les pesticides et leurs alternatives non-chimiques[23] est un second levier permettant à un pays de l'UE d'interdire des pesticides (pourtant homologués) sur son territoire. Mandatée par le gouvernement français dans le cadre de son plan de sortie du glyphosate, l'Anses a soumis cette substance controversée à son analyse en 2018. Les principaux usages du glyphosate ont été passés en revue (viticulture, arboriculture, grandes cultures), ainsi que les incidences pratiques et économiques de la mise en œuvre de leurs alternatives (Carpentier *et al.*, 2020 ; Jacquet *et al.*, 2019a, 2019b). À l'issue de cette évaluation, l'Anses a conclu à l'interdiction d'un certain nombre d'usages du glyphosate, mais aussi à une réduction des doses d'application là où l'herbicide était encore jugé nécessaire (Anses, 2020).

Dans cet esprit, la Cour de justice de l'UE, tout en validant le système général de mise sur le marché des pesticides, a appelé à davantage de rigueur dans les évaluations des substances. Non seulement elle prône de tenir compte « des données scientifiques disponibles les plus fiables ainsi que des résultats les plus récents de la recherche internationale et de ne pas donner dans tous les cas un poids prépondérant aux études fournies par le demandeur », mais elle ajoute que la procédure d'autorisation d'une substance à usage phytopharmaceutique doit comprendre, outre l'appréciation de ses effets propres, celle des effets cumulés – dits effets cocktail – des substances entre elles et avec les autres composants du produit[24].

Pour améliorer la transparence de l'homologation des produits phytosanitaires et répondre à la stratégie affichée « De la ferme à la table », l'Europe n'a d'autre choix que de réformer ses procédures d'évaluation, dans le sens d'une plus grande exigence, notamment sur l'accès du public aux études utilisées par les firmes, ou encore sur la toxicité à long terme des produits[25]. S'il devait prochainement advenir, ce nouveau cadre réglementaire menacerait probablement le maintien sur le marché de certaines substances controversées, comme les fongicides inhibiteurs de la succinate déshydrogénase (SDHI) sur lesquels les alertes scientifiques se multiplient (Libération, 2018).

Moins de surfaces admissibles aux traitements ?

Aux mesures de réduction des substances disponibles, s'ajoute une réglementation de l'espace rural de plus en plus restrictive vis-à-vis des produits phytosanitaires. Les pesticides se retrouvent ainsi bannis d'un nombre de surfaces en constante augmentation. Il y a, au premier chef, les aires protégées, au regard de leur intérêt environnemental, que ce soit par voie réglementaire (réserves naturelles, sites classés, biotopes remarquables, trames vertes et bleues, etc.), ou à l'initiative des gestionnaires du territoire (Conservatoires d'espaces naturels, communes, départements). Bien que les règles observées soient variables d'un site à un autre, la tendance est d'exclure de ces espaces

23. Règlement (CE) du Parlement et du Conseil n° 1107/2009, 21 oct. 2009, art. 50.2.
24. CJUE, 1er oct. 2019, affaire C-616/17.
25. Voir la proposition de la Commission européenne du 11 avril 2018 pour réformer la procédure d'évaluation des risques concernant la sécurité alimentaire ; suivie, le 16 janvier 2019, du projet du Parlement pour améliorer la procédure d'autorisation des pesticides au sein de l'UE.

les pratiques nuisibles au respect des lieux, ce qui peut viser plus ou moins directement le recours aux pesticides de synthèse. Pareils dispositifs de protection, autrefois cantonnés aux milieux à forts enjeux de biodiversité, s'étendent dorénavant à des territoires plus ordinaires, notamment dans la perspective de mieux protéger les aires d'alimentation des captages d'eau potable, régulièrement exposées aux pollutions diffuses.

La discrimination spatiale prend également la forme, un peu partout, de portions de sols interdites de traitement chimique : les distances de sécurité appelées ZNT. Des bandes tampons sont depuis longtemps instaurées près des points d'eau (cours d'eau, étangs, etc.). Elles ont été appliquées, en 2014, aux abords des établissements accueillant des personnes vulnérables (écoles, hôpitaux, hospices, etc.), puis au bénéfice de tous les riverains de parcelles traitées en 2019 (Grimonprez et Bouchema, 2020). Concernant les zones d'habitations, la distance d'usage à respecter dépend désormais du type de culture traitée (haute ou basse[26]), de la catégorie de produit utilisé (plus ou moins dangereux), de ce que précisent les autorisations de chaque produit, et enfin de ce que peuvent prévoir des chartes de voisinage établies à l'échelon départemental[27], un véritable casse-tête pour les agriculteurs. Ces critères peuvent, au final, aboutir à une surface conséquente qu'un agriculteur ne pourra plus protéger par voie chimique. En outre, le risque d'enfreindre ces prescriptions n'est pas nul ; même si c'est encore rarement le cas, une sanction pénale peut être prononcée. Des viticulteurs de Villeneuve-de-Blaye en Gironde en ont récemment fait l'expérience, ayant été condamnés par la Cour d'appel de Bordeaux pour avoir traité leurs vignes par grand vent à proximité d'une école primaire[28].

Les maires de certaines communes tentent, depuis deux ans, d'aller plus loin que ces mesures générales de restriction, soit en édictant des distances supérieures (50 mètres par exemple), soit en interdisant complètement l'usage des pesticides sur leur territoire. On rappellera que, depuis l'entrée en vigueur de la loi « Labbé » le 1er janvier 2019, les espaces publics (aussi bien des collectivités que des établissements publics) sont déjà interdits de tout traitement phytosanitaire (Code rural, art. L. 253-7, II). Mais les arrêtés municipaux qui fleurissent de nos jours les interdisent même sur les parcelles privées. Cette réglementation locale a pour l'instant été censurée par la justice administrative[29]. Jusqu'à quand ? La volonté des élus du territoire est bien de durcir considérablement les conditions d'emploi des pesticides, au nom de la santé de leurs concitoyens.

Le droit des pesticides autrement

Par son approche essentiellement négative (ne pas faire), la réglementation montre ses limites intrinsèques. Il ne suffit pas en effet d'interdire pour dessiner, dans l'imaginaire collectif agricole, une autre voie suscitant l'adhésion. Ce n'est pas seulement « sans » pesticides que les agriculteurs vont devoir faire, mais bien « avec » d'autres

26. Les cultures hautes (vergers) comportent plus de risques de dérive aérienne des produits hors de la parcelle que les cultures basses (céréales).
27. Dispositif des chartes néanmoins invalidé par le Conseil constitutionnel : Décision n° 2021-891 QPC, 19 mars 2021, association Générations Futures et autres.
28. CA Bordeaux, 6e ch. corr., 18 nov 2020, n° 19-00849. Grimonprez (B.) et Terryn (F.), Pesticides : les enfants empoisonnés, les viticulteurs condamnés, *Droit de l'environnement*, février 2021, p. 70.
29. CE, 31 déc. 2020, n° 440923.

moyens, positifs ceux-là, qu'ils vont naturellement chercher à valoriser. Ce dernier point invite à explorer deux axes de recherche.

Le premier est l'élaboration, au sein même de la réglementation, d'un véritable statut des alternatives aux pesticides de synthèse. Leur définition devrait être explicitée pour savoir si elle inclut certains pesticides dits « alternatifs », quitte à prévoir pour eux des règles dérogatoires lors de leur distribution ou de leur utilisation. Or, ce régime est actuellement très désordonné (entre substances à faibles risques, biocontrôle, substances de base, préparations naturelles peu préoccupantes, etc.) et peu lisible par les acteurs. De surcroît, il conviendrait de déterminer comment les alternatives peuvent remplacer, à niveau d'efficacité semblable, les produits actuellement employés. Cela supposerait, d'une part, de recenser, voire de standardiser, les pratiques qui fonctionnent ; mais aussi, d'autre part, de définir de nouvelles conditions d'évaluation des solutions non chimiques et de leurs contributions à la protection des cultures. Enfin, la diffusion massive des alternatives sur le terrain nécessiterait d'inscrire officiellement le principe de la lutte intégrée dans les règles qui gouvernent l'entreprise agricole (baux ruraux, régulation foncière, zonages environnementaux, cahiers des charges des productions, etc.).

Le second champ à investir est la nécessaire interconnexion des normes réglementaires et des instruments économiques (aides, fiscalité, assurance, etc.). En effet, les coûts induits par les changements de pratiques ne seront à court terme supportables que s'ils peuvent être valorisés par les agriculteurs, en particulier par une différenciation au stade de la mise sur le marché. La condition est de pouvoir identifier et reconnaître une qualité supérieure aux produits issus de modes de production avec moins ou pas de pesticides de synthèse. Recenser les pratiques alternatives, les labelliser, les rémunérer au niveau des filières et des consommateurs finaux jouera certainement le rôle de levier pour un segment de l'agriculture (produits animaux, vins, fruits et légumes).

Encadré 7.5. Le droit et l'approche systémique de la transition

La question se pose de savoir si les politiques publiques doivent privilégier une approche analytique, mode de protection des cultures par mode de protection, dans la logique de substitution d'une pratique (polluante) par une autre (plus vertueuse), comme le biocontrôle, ou bien si elles souhaitent privilégier une approche systémique prenant l'exploitation agricole – et donc la santé des cultures et la maîtrise des bioagresseurs – comme un tout indissociable. Ceci est possible grâce à des engagements volontaires (par exemples les mesures agro-environnementales et climatiques « système ») ou à des certifications, telles que « AB » ou « haute valeur environnementale » (HVE), qui permettent aux agriculteurs d'utiliser un logo sur leurs produits. Si la certification HVE est pertinente d'un point de vue agronomique, voire économique, elle est aussi moins précise et moins stricte que l'AB et possède plusieurs niveaux d'engagements. Le risque, à réellement mesurer, est qu'en fonction de la teneur des cahiers des charges des différents niveaux d'engagement, il peut très bien s'agir d'un effort très engageant, menant sur la voie de la transition, comme d'une démarche peu engageante qui, sous couvert d'une appellation plus flatteuse, autorise à perpétuer les traditions phytosanitaires d'hier (Aubert et Poux, 2021).

Mais d'autres valeurs sont portées par les acteurs mettant en œuvre des pratiques agroécologiques économes en pesticides : valeurs sociales, environnementales,

paysagères, que le marché, en particulier international, demeure dans l'incapacité de percevoir, donc d'intégrer et de rétribuer. Ces valeurs collectives, non-marchandes, seront quant à elles essentiellement financées par des fonds publics : ce qu'on dénomme génériquement « paiements pour services environnementaux » paraît un soutien indispensable pour des productions de masse à faible valeur ajoutée et pour partie destinées à l'export (céréales, oléagineux). Dans ce cadre, il serait intéressant que de telles valeurs soient reconnues dans les accords commerciaux internationaux.

À retenir

Le droit en vient à constituer un déterminant essentiel dans le choix des agriculteurs d'utiliser des pesticides pour protéger leurs cultures. Un filtrage de plus en plus strict est opéré sur les substances admises sur le marché, avec des évaluations plus poussées notamment sur leur toxicité pour l'homme et l'environnement à long terme. Les tribunaux n'hésitent plus à contrôler, et donc à annuler, les décisions des autorités sanitaires au nom du principe de précaution. La prise en compte de l'environnement immédiat des exploitations conduit également à compliquer les pratiques d'épandage. De plus en plus de zones limitent ou interdisent les pesticides de synthèse, parce qu'il est question de préserver la biodiversité, la qualité de l'eau ou plus récemment la santé des populations riveraines. Cet arsenal réglementaire, indépendamment de son bien-fondé, peut toutefois amener dans l'impasse certains acteurs ou pénaliser leur compétitivité économique. D'où l'importance d'associer aux indispensables restrictions d'usage des solutions alternatives réelles et de favoriser la mise en œuvre de ces nouveaux leviers de protection des cultures. Ces alternatives doivent recevoir un statut bien mieux défini dans notre droit, lequel devrait prévoir un accès plus simple (sans autorisation de mise sur le marché parfois) et une priorisation à efficacité égale. Plus largement, ceci consiste à modifier le cadre réglementaire général relatif aux pesticides, fondé aujourd'hui par le règlement (CE) n°1107/2009 dans le sens d'une meilleure prise en compte des nouvelles pratiques de protection des cultures.

▸▸ Subventionner les pratiques alternatives aux pesticides : comment améliorer l'efficacité des mesures agroenvironnementales ?

Depuis de nombreuses années, la PAC se dote d'instruments économiques visant initialement à réduire les effets néfastes de l'agriculture sur l'environnement, puis progressivement, à reconnaître que l'agriculture fournit d'autres services que la production de biomasse alimentaire et non-alimentaire, ceci en soutenant financièrement les pratiques pro-environnementales des agriculteurs. Pour cela, ont été mis en place les MAE du deuxième pilier depuis 1992, l'éco-conditionnalité depuis 2003, le verdissement dans la programmation 2014-2020.

Les MAE, qui nous intéressent plus particulièrement ici, sont des subventions versées aux agriculteurs en échange de l'adoption de pratiques plus respectueuses de

l'environnement (encadré 7.6). Ce sont des instruments à engagement volontaire : l'agriculteur est rémunéré par la collectivité pour le « service environnemental » qu'il fournit (par exemple la réduction de l'usage des pesticides), mais il est le plus souvent payé sur la base des coûts supplémentaires qu'il doit supporter, et non sur la valeur que la société accorde à l'amélioration environnementale générée (par exemple la qualité de l'eau)[30].

Le principe des MAE diffère de celui de la taxation des pollutions, qui vise à rendre les émissions polluantes plus coûteuses, ou de celui du pollueur-payeur, qui consiste à faire prendre en charge par le pollueur les frais résultants des mesures de prévention, de réduction et de réparation des pollutions. Si ces différents outils visent le même objectif, les MAE ont été, de loin, les plus utilisées au cours des dernières décennies dans le cas des activités agricoles. Elles ont prouvé leur efficacité pour améliorer ponctuellement les pratiques des agriculteurs ayant choisi de contractualiser, notamment dans les premières années de mise en œuvre (Cour des comptes européenne, 2020 ; Primdahl *et al.*, 2003). Elles ont toutefois également été vivement critiquées pour leur coût, au regard des faibles impacts environnementaux obtenus (Pe'er *et al.*, 2019). Aujourd'hui, de nouvelles pistes doivent être envisagées afin d'améliorer l'efficacité environnementale des paiements de la PAC.

Encadré 7.6. Les MAE : des instruments à engagement volontaire

Les MAE sont un dispositif contractuel sur plusieurs années, généralement de cinq à sept ans. Elles s'adressent aux agriculteurs qui s'engagent volontairement, contre rémunération, à la mise en œuvre de pratiques considérés comme favorables à l'environnement, au-delà de l'obligation réglementaire. Depuis leur apparition en 1992, de nombreuses déclinaisons opérationnelles ont été mises en place au fur et à mesure des réformes successives de la PAC. Ainsi, initialement centrée sur la biodiversité et la qualité de l'eau, leur portée a été élargie lors de la réforme de la PAC de 2014 en intégrant des enjeux climatiques, donnant ainsi naissance aux « mesures agro-environnementales et climatiques » (MAEC). Deux types de MAEC sont alors proposées : d'une part, des mesures « système » qui visent un changement global de l'exploitation ou le maintien de systèmes vertueux ; d'autre part, les mesures « à la parcelle » visant une pratique spécifique.

Les MAEC ont également étaient territorialisées, c'est-à-dire intégrées à des projets agro-environnementaux et climatiques (PAEC) portés par les acteurs des territoires et sélectionnés par les régions (CEP, 2021). En pratique, chaque région identifie des zones à forts enjeux environnementaux, au sein desquelles des appels à projets sont lancés auprès des opérateurs de territoire (une chambre d'agriculture, un syndicat des eaux). Les PAEC proposés incluent les MAEC offertes aux agriculteurs et l'animation prévue pour les aider à souscrire aux mesures et à tenir leurs engagements.

…

30. Les MAE s'inscrivent dans la même logique que les PSE, à la différence que le niveau de compensation qu'elles offrent est calculé sur les surcoûts engendrés par le changement de pratiques prévu dans le cahier des charges. Toutefois, l'évaluation de la valeur de ce service est particulièrement complexe. À cet égard, la question des MAE *vs* PSE rejoint en partie celle, également sujette à débat, de mesures « à obligations de moyens » *vs* « à obligations de résultats ».

…

En dépit des efforts déployés pour améliorer la définition et la pertinence des MAE, les taux de contractualisation restent aujourd'hui encore extrêmement faibles. Ainsi, d'après les données de l'Observatoire du développement rural pour la période 2015-2020, le nombre de bénéficiaires de MAEC contenant un engagement unitaire PHYTO (c'est-à-dire visant la réduction de l'usage des produits phytosanitaires) ne dépasse généralement pas 300 au total par région, une exception étant la région Languedoc avec plus d'un millier de souscripteurs (ODR, 2021).

Les mesures agro-environnementales et climatiques : un bilan mitigé

Les MAEC, contrats de cinq années liant l'agriculteur et l'État, sont emblématiques de la volonté des pouvoirs publics de soutenir l'effort de transition agroécologique à l'aide de subventions. Sur la période 2014-2020, le budget alloué à ces mesures dans l'ensemble de l'UE atteignait plus de 16 milliards d'euros sur les 100 milliards d'euros du budget du Fonds européen agricole pour le développement rural (FEADER) dédié au développement rural. Ceci équivaut à seulement 2,4 % du budget total de la PAC, premier et second piliers compris (Commission européenne, 2020). Plusieurs travaux suggèrent que les MAEC ont des effets mitigés. En effet, des mesures dédiées à la réduction de l'utilisation des pesticides en viticulture ont pu avoir un effet certes positif, mais guère pérenne. Par exemple, une étude menée dans le sud de la France a montré que les MAE les moins exigeantes (suppression de l'utilisation d'herbicides uniquement entre les rangs de vigne) ont effectivement permis une réduction des herbicides de 40 % en moyenne durant les années où la pression des adventices a été élevée. En revanche, lors des années « faciles », durant lesquelles la pression des adventices a été plutôt faible, les bénéficiaires ont eu, de fait, moins recours aux herbicides, inutiles cette année-là, et se sont finalement comporté exactement comme ils l'auraient fait en l'absence de MAE (Kuhfuss et Subervie, 2018).

Les résultats des MAE les plus exigeantes en termes de cahier des charges (la conversion ou le maintien à l'AB par exemple) sont en revanche plus encourageants, car ils suggèrent que ce type de MAE aurait un impact significatif sur les pratiques des agriculteurs, quelle que soit l'année considérée (Jaime *et al.*, 2016 ; Kuhfuss et Subervie, 2018). De manière plus générale, certaines études suggèrent que l'impact de la MAE serait d'autant plus important que la subvention représente une part non-négligeable du revenu de l'agriculteur. C'est en tout cas ce qui ressort pour la France, ainsi que pour le Royaume-Uni, l'Italie et l'Allemagne sur la programmation 2000-2006 (Arata et Sckokai, 2016). Outre les critiques sur le caractère peu contraignant des MAE, la faible participation des agriculteurs est également considérée comme un échec de ce dispositif. Il est vrai qu'avec seulement un tiers des fermes engagées dans la programmation 2007-2013 (Zimmermann et Britz, 2016), la participation des agriculteurs apparaît beaucoup plus faible en France que dans d'autres pays européens, comme l'Autriche, la Finlande ou la Suède (Pufahl et Weiss, 2009).

Les causes des insuffisances des MAE

Au cours des dernières années, un certain nombre de travaux ont souligné les conséquences de la faible participation des agriculteurs aux MAE, en insistant sur le fait

qu'en deçà d'un certain nombre d'hectares engagés dans un dispositif de transition, ou en l'absence d'une bonne organisation spatiale de l'effort de chacun, aucun gain environnemental significatif ne pouvait être enregistré (Dupraz *et al.*, 2009). Outre le fait que la plupart des MAEC sont limitées à des territoires précis à fort enjeu environnemental, comme la qualité de l'eau, nombre d'agriculteurs de ces territoires choisissent de ne pas y participer.

En plus de cette faible participation, la mise en œuvre des MAE se heurte à deux problèmes sérieux (Lichtenberg, 2004). Tout d'abord, leur administration est coûteuse à grande échelle parce qu'elle requiert la mise en place d'un système de contrôle (et le cas échéant de sanction) pour chaque exploitation impliquée. Réduire les coûts afférents suppose de définir les cahiers des charges des contrats et les critères d'éco-conditionnalité à partir d'éléments simples à vérifier, ce qui est une gageure dans le cas des pesticides car ces produits, tout comme les productions pour lesquelles ils sont utilisés, sont nombreux et hétérogènes.

Ensuite, le pouvoir incitatif des contrats des MAE est limité. D'une part, dès lors qu'ils respectent les conditions du contrat qu'ils ont signé ou donnant droit à la subvention à laquelle ils aspirent, les agriculteurs n'ont actuellement aucun intérêt économique à continuer à réduire davantage leur utilisation de pesticides (Carpentier *et al.*, 2005). En outre, en offrant un paiement unique à la diversité des agriculteurs éligibles, le dispositif des MAE sélectionne de fait surtout les individus dont le coût pour changer de pratiques est inférieur à la subvention proposée par la MAE. Dans le cas extrême où l'effort demandé au bénéficiaire ne représente pour lui aucun coût additionnel, la MAE a pour effet de subventionner l'agriculteur pour ne rien faire de plus que ce qu'il aurait fait en l'absence de subvention. C'est ce qu'on appelle l'effet d'aubaine. C'est le cas, par exemple, des agriculteurs qui reçoivent une subvention pour l'implantation de CIPAN, dont une grande partie aurait été implantée en l'absence de toute subvention (Chabé-Ferret et Subervie, 2013).

Expérimenter de nouveaux leviers

L'essor récent de l'économie expérimentale et comportementale a permis de développer et de tester des innovations politiques et/ou organisationnelles *in situ*, en mobilisant les principaux intéressés du dispositif en question, c'est-à-dire les agriculteurs eux-mêmes, et en tenant compte de leurs préférences (Mamine *et al.*, 2020 ; Thoyer et Préget, 2019). Les innovations proposées visent à accroitre l'impact du dispositif en augmentant le taux de participation des agriculteurs et/ou à améliorer son efficacité en termes de changement des pratiques agricoles, en réduisant notamment les effets d'aubaine (Behaghel *et al.*, 2019).

Proposer des contrats plus flexibles

Les MAE ont parfois été critiquées pour leur rigidité face aux incertitudes liées aux variations des prix du marché ou encore à l'instabilité météorologique. Par exemple, des travaux sur la création de zones tampons sans pesticides au Danemark ont montré que les agriculteurs demandaient en moyenne 128 euros de plus par hectare et par an pour accepter des MAE de cinq ans plutôt que d'un an (Christensen *et al.*, 2011). Cette

même étude a aussi montré qu'ils étaient prêts à renoncer à 137 euros par hectare et par an pour avoir la possibilité de rompre le contrat à tout moment. Dans la même idée, une étude récente a montré que les viticulteurs français étaient prêts à renoncer à 114 euros par hectare et par an pour avoir la possibilité, une année sur cinq, de ne pas respecter les engagements de réduction des herbicides et d'enherbement des parcelles de vigne (Lapierre *et al.*, 2021). Ces résultats suggèrent qu'augmenter la flexibilité dans les contrats de MAE permettrait d'améliorer leur adoption (ou réduire leur coût), avec le risque cependant de perdre en efficacité environnementale.

Encourager la coordination entre agriculteurs

Afin d'augmenter la participation des agriculteurs aux MAE, tout en favorisant une certaine cohérence spatiale des surfaces engagées, des propositions ont été faites pour inclure des primes spécifiques dans les MAE. Ces primes permettraient de prendre en compte ces effets de seuil ou les exigences spatiales en intégrant par exemple un « bonus d'agglomération », c'est-à-dire une rémunération supplémentaire pour chaque parcelle qui borde une autre parcelle déjà engagée (Vaissière *et al.*, 2018). Elles pourraient ainsi favoriser la constitution d'un corridor de biodiversité, ou la protection de l'intégralité des rives d'un cours d'eau (Banerjee *et al.*, 2014).

Une autre solution serait de proposer des MAE intégrant un « bonus collectif », par lesquelles l'agriculteur serait récompensé pour sa participation individuelle, mais recevrait également une prime lorsqu'un objectif prédéfini en termes de superficie totale engagée serait atteint à l'échelle du territoire d'intervention, par exemple le bassin versant (Kuhfuss *et al.*, 2016). Cette proposition a été testée auprès d'un échantillon de 300 viticulteurs français, qui se sont prêtés à une expérience de choix hypothétiques visant à révéler leur préférence pour ce type de bonus, dans le cadre d'une MAE subventionnant la réduction de l'utilisation des herbicides. Les résultats de cette étude ont montré que l'introduction du bonus avait pour effet d'augmenter significativement la probabilité de participation de l'agriculteur au dispositif (Kuhfuss *et al.,* 2016).

Les enchères agroenvironnementales

Une façon d'améliorer l'efficacité des contrats MAE consisterait à abandonner le système de paiement fixe (où un seul montant à l'hectare est proposé à tous les agriculteurs) en faveur d'un système d'enchères agroenvironnementales (Ferraro, 2008 ; Thoyer et Saïd, 2007). Dans ce type de système, les agriculteurs sont invités à proposer un service environnemental contribuant à l'objectif prédéfini (une réduction des pesticides par exemple), et le montant qu'ils souhaitent recevoir pour le service en question. Les offres des agriculteurs sont ensuite classées sur la base d'un score environnemental et en fonction du montant demandé. Finalement, seules les meilleures offres sont retenues et payées au montant demandé (Kuhfuss *et al.*, 2012). On passe donc d'un système de paiement uniforme et ouvert à tous les agriculteurs volontaires, à un système de paiements dits « discriminants » et fondé sur la mise en concurrence des agriculteurs pour l'accès aux contrats. Dans ce type de dispositif, un agriculteur déjà performant aura intérêt à aller encore plus loin dans la maitrise de la pratique alternative.

Ce système présente plusieurs avantages par rapport au système actuel de paiements fixes. D'abord, il permet de changer les pratiques des agriculteurs les plus polluants, qui demandent un montant certes élevé, mais dont le changement est susceptible de générer un gain environnemental important. Ensuite, il permet d'éviter de payer les agriculteurs pour adopter des pratiques qu'ils auraient adoptées en l'absence de MAE (l'effet d'aubaine) puisqu'ici l'agriculteur est incité à révéler son vrai coût d'opportunité, c'est-à-dire un prix proche du coût de l'effort fourni (s'il demande plus, il prend le risque de ne pas être sélectionné). Aux États-Unis, 80 % des paiements agro-environnementaux sont attribués de cette manière (Kuhfuss *et al.*, 2012). La première expérience française d'enchères agro-environnementales a été menée en 2010 par l'Agence de l'eau Artois-Picardie, en collaboration avec les Chambres d'agriculture et les services de l'État de son bassin (Kuhfuss *et al.*, 2012). Elle visait l'implantation de couverts herbacés pour améliorer la qualité de l'eau dans des zones à forts enjeux environnementaux (zones de captage). Il en est ressorti que ces contrats MAE étaient plus flexibles et mieux adaptés à chaque exploitation que les mesures traditionnelles. Cependant, la concurrence entre agriculteurs pour gagner ces contrats a parfois été mal perçue car les agriculteurs sont habitués à une logique de guichet des MAE, où un dossier bien rempli est un dossier accepté (Kuhfuss *et al.*, 2012). Ce système d'enchères agroenvironnementales est également susceptible d'être mobilisé pour la réduction des pesticides (Behaghel *et al.*, 2019).

Exploiter les effets de pairs

Dans la même idée que celle du bonus collectif, d'autres innovations sont apparues visant à exploiter le potentiel de coordination au sein d'un groupe d'agriculteurs, afin d'augmenter le taux de participation aux MAE. Toutefois, contrairement au bonus, ces innovations reposent sur des leviers non-monétaires : on les appelle « normes sociales ». En effet, lorsqu'un agriculteur choisit de contribuer volontairement à un bien public environnemental, il peut être poussé par des normes descriptives (qui le poussent à faire la même chose que ce que font les individus du groupe auquel il s'identifie) ou par des normes injonctives (qui le poussent à faire ce que la société attend de lui) (Le Coent *et al.*, 2021). En partant de ce constat, des instruments appelés *nudges* (« coup de pouce » en anglais) ont été élaborés.

D'un point de vue économique, les *nudges* sont des incitations comportementales qui ont un effet sur l'être humain, via l'activation de biais cognitifs ou de comportements liés à l'émotion, et non pas sur l'individu purement rationnel modélisé par la théorie économique (Raineau, 2018). Appliqué à l'agriculture, les *nudges* consistent, par exemple, à communiquer sur le nombre d'agriculteurs qui ont déjà mis en place des pratiques vertueuses, comme une meilleure gestion de l'eau d'irrigation, afin d'inciter d'autres agriculteurs à en faire autant (Chabé-Ferret *et al.*, 2019). Simples et peu coûteux, ces instruments peuvent ainsi modifier le comportement des individus sans créer d'interdiction ni de subvention. Les *nudges* sont également un moyen d'encourager les agriculteurs à renouveler leur engagement à une MAE (Wallander *et al.*, 2017), ou à maintenir une pratique pro-environnementale après la fin de la MAE (Kuhfuss *et al.*, 2016). Cependant, bien que ces outils obtiennent de bons résultats dans certaines situations, leurs impacts sur le comportement réel des agriculteurs dans un objectif de réduction drastique des pesticides doivent encore être confirmés.

À retenir

Bien que les MAE aient été conçues dans une période où le sans pesticides n'était pas l'objectif, elles représentent tout de même un outil privilégié des politiques publiques pour accompagner la transition agroécologique. Pourtant, force est de constater que cet instrument, dans sa définition actuelle, présente de nombreuses limites qui ne lui permettent généralement pas d'atteindre l'objectif environnemental fixé. Plusieurs pistes de recherche ont été ouvertes au cours des dernières années, visant non seulement à accroître le taux de participation des agriculteurs à ce type de dispositifs, mais également à augmenter leur impact sur les pratiques des agriculteurs. Quatre types d'innovations sont aujourd'hui considérées comme prometteuses pour construire des MAE permettant d'encourager l'adoption de pratiques alternatives aux pesticides : celles qui permettent de rendre les MAE plus flexibles, celles qui encouragent la coordination entre agriculteurs dans leur effort de préservation de l'environnement, celles qui exploitent les effets de pairs (c'est-à-dire les interactions sociales entre agriculteurs d'un même groupe ayant des préférences similaires), et celles qui s'efforcent d'intégrer toute la diversité des profils d'exploitants dans la définition du paiement proposé.

⏩ Les dispositifs de taxation : comment les rendre acceptables ?

Dans le cadre des pratiques de production et des conditions de marché actuelles, l'utilisation des pesticides demeure le plus souvent le moyen le plus rentable pour l'agriculteur d'assurer la protection de ses cultures, même si des itinéraires techniques à bas niveau d'intrants, peuvent l'être également. Pour réduire la rentabilité des pesticides, leur taxation est l'instrument privilégié. Mais pour être efficace, elle doit être mise en place à un niveau suffisant et prendre en compte les effets sur les revenus des agriculteurs.

La taxation : forts pouvoirs incitatifs, mais pénalisants pour les revenus agricoles

La taxation est un instrument incitatif dont le principal intérêt est de réduire la rentabilité de l'utilisation de l'intrant taxé et par là-même d'encourager l'adoption de tout moyen disponible (qu'il soit agronomique ou technologique) permettant d'en réduire l'utilisation. Cette propriété est particulièrement intéressante dans le cas des pesticides : comme les alternatives aux pesticides sont potentiellement nombreuses, cet instrument laisse aux agriculteurs le choix des solutions qui leur sont les plus adaptées. En théorie, une taxe sur les pesticides inciterait les agriculteurs à optimiser leur utilisation de pesticides et devrait susciter mécaniquement une demande d'alternatives aux pesticides ou de pratiques de production économes en pesticides (Carpentier *et al.*, 2005). Les taxes ont également l'intérêt d'être relativement peu coûteuses à mettre en œuvre à grande échelle (Finger *et al.*, 2017) car elles peuvent être prélevées directement au niveau des fabricants nationaux, des importateurs ou des distributeurs de pesticides. Contrairement à d'autres instruments tels que les

MAE, elles ne requièrent pas de contrôle au niveau des exploitations et génèrent de fait peu de coûts d'administration. Étant donné que les objectifs français et européens sont désormais (presque) alignés en ce qui concerne les pesticides[31], taxer les pesticides à l'échelle de l'UE serait envisageable. Cela aurait ainsi l'avantage de ne pas introduire de distorsion de concurrence entre États membres. En revanche, cela pourrait impacter la compétitivité des produits agricoles européens sur les marchés mondiaux.

Le principal défaut des taxes est qu'elles impactent négativement (et significativement) le revenu des secteurs taxés et la compétitivité des biens qu'ils produisent (Carpentier *et al.*, 1999). C'est probablement ce qui rend la taxation des pesticides aujourd'hui « inacceptable », tant du point de vue des agriculteurs que des décideurs publics, et qui explique qu'elle est l'un des instruments d'incitation économique de réduction des pollutions les moins employés en pratique (Finger *et al.*, 2017 ; Lefebvre *et al.*, 2015). On retrouve d'ailleurs ici les limites du principe pollueur-payeur tel qu'il est inscrit dans la législation européenne. Enfin, un argument souvent avancé contre l'instauration d'une taxation sur les pesticides est que l'augmentation des prix des pesticides n'aurait que peu d'influence sur la demande en pesticide car leur élasticité-prix est faible (Pedersen *et al.*, 2020 ; Skevas *et al.*, 2013). La TGAP n'a d'ailleurs pas permis une réduction de l'utilisation des pesticides (encadré 1.10). Il faut cependant souligner que les estimations de l'élasticité de la demande en pesticides sont cependant le plus souvent des élasticités de court terme, à pratique et objectif de production constants. Or, les pratiques de production conventionnelles actuelles sont techniquement dépendantes des pesticides et il est indispensable de les changer profondément pour pouvoir se passer de pesticides. Des travaux récents tendent à montrer que la demande de pesticides est plus élastique dès lors qu'on considère que les agriculteurs ont la possibilité d'adopter des pratiques qui permettent d'en réduire l'usage (Femenia et Letort, 2016). Néanmoins, d'autres explications peuvent être avancées dont l'attitude face au risque des agriculteurs (encadré 7.7).

Encadré 7.7. L'assurance : un substitut aux pesticides ?

Un des facteurs qui pourrait expliquer l'utilisation massive de pesticides est la volonté des agriculteurs, et des filières dans lesquelles ils sont insérés, de limiter au maximum le risque de perte de production, ainsi que le souhait d'avoir des champs et des récoltes propres. En effet, les pesticides permettent de limiter les dégâts causés par les bioagresseurs, et donc le risque économique lié à une moindre récolte. Selon que les acteurs concernés sont plus ou moins « averses au risque », ils peuvent décider de mettre en place des mesures pour limiter ces risques, comme par exemple augmenter la dose ou la fréquence des traitements phytosanitaires et intervenir de façon préventive et systématique (Carpentier, 1995). Dans ce contexte, les assurances sont souvent considérées comme des substituts potentiels à l'utilisation des pesticides : en assurant leurs récoltes, les

…

31. La stratégie dite « de la ferme à l'assiette » du « Pacte vert » européen publié par la Commission européenne en 2020 cible des réductions des utilisations agricoles de pesticides similaires à celles affichées par les plans Écophyto en France.

…

agriculteurs seraient incités à diminuer la quantité de pesticides épandus car les pertes dues aux bioagresseurs seraient compensées par les sociétés d'assurance (Aubert et Enjolras, 2014). De plus, cela pourrait également faciliter la mise en place de cultures de diversification, essentielles pour réduire l'utilisation des pesticides, mais qui souffrent souvent à ce jour de rendements plus variables que les cultures majoritaires (Cernay *et al.*, 2015). Différentes assurances peuvent être proposées comme celle assurant le rendement, on parle d'alors d'assurance récolte, ou d'autres, moins développées en UE, qui assurent le revenu des agriculteurs. En Italie, des producteurs de maïs ont testé avec succès une assurance visant à compenser les pertes de production en l'absence d'utilisation d'insecticides (néonicotinoïdes) (Furlan *et al.*, 2021). Cependant, les preuves empiriques de l'impact des assurances sur l'utilisation de pesticides restent ambiguës et plusieurs études constatent que les assurances ne conduisent pas à une diminution de l'utilisation de pesticides, mais à une augmentation (Möhring *et al.*, 2020). Ce phénomène contre-intuitif peut s'expliquer par le fait que les assurances jouent également sur les décisions d'utilisation des terres : les agriculteurs assurés sont en effet plus enclins à choisir des productions intensives qui impliquent généralement une utilisation élevée de pesticides. Ainsi, le développement des assurances comme outil pour diminuer l'usage des pesticides doit être envisagé avec prudence (Möhring *et al.*, 2020).

Associer taxation incitative et paiements compensatoires redistributifs ?

Est-il possible de neutraliser les effets négatifs des taxes sur le revenu des agriculteurs (tout au moins en grande partie), tout en conservant le pouvoir incitatif de ces taxes pour la réduction de l'utilisation de pesticides ? Fixer un taux de taxe faible préserve le revenu des agriculteurs mais n'a que peu d'effet sur leur utilisation des pesticides. Les taxes ne peuvent être réellement incitatives que si leur taux est suffisant ce qui n'est pas le cas actuellement (encadré 1.10). Une solution consisterait à combiner la taxation avec un système de redistribution du produit de la taxe aux agriculteurs eux-mêmes, afin de la rendre fiscalement neutre et de ne pas avoir d'impact sur le revenu du secteur agricole dans son ensemble[32]. Pour être efficace, ce système de compensation doit avoir plusieurs caractéristiques. Les aides au revenu versées aux agriculteurs ne doivent pas dépendre, ou en tout cas le moins possible, des pesticides utilisés par chaque agriculteur afin de ne pas contrecarrer les propriétés incitatives des taxes. Pour cela, les montants des compensations pourraient, par exemple, être établis à partir des données sur les dépenses moyennes en pesticides par culture (pour limiter les diminutions des surfaces des cultures les plus exigeantes en pesticides), en tenant compte de la région (pour tenir compte de l'influence des conditions pédoclimatiques). Le montant de la taxe pourrait également être augmenté de manière progressive selon un calendrier annoncé, de sorte à donner aux agriculteurs

32. Bontems (2019) discute des propriétés théoriques d'un schéma de taxation avec compensation dans le cas d'émissions polluantes et synthétise la littérature récente sur le sujet. Bureau *et al.* (2019) analysent l'intérêt d'un tel schéma pour les émissions de gaz à effet de serre, en mettant en évidence le rôle incitatif des taxes et le rôle de neutralisation des effets revenu liés à la taxation assignée au système de redistribution de la recette de la taxe.

le temps d'adapter leurs pratiques. Ce type de système « récompenserait » ainsi les utilisateurs de pesticides situés en deçà de la moyenne régionale et « pénaliserait » ceux situés au-delà. Il avantagerait donc les précurseurs dans la réduction des pesticides en soutenant leur revenu et contraindrait de manière active les plus gros utilisateurs de pesticides, en ayant un effet négatif sur leurs revenus. Il permettrait d'imposer des niveaux élevés de taxe tout en préservant, globalement, le revenu des agriculteurs, et d'encourager ainsi les pratiques économes en pesticides les plus efficaces d'un point de vue technico-économique.

À retenir

La taxation a pour objectif d'inciter les agriculteurs à changer leurs pratiques en réduisant la rentabilité de l'utilisation des pesticides. Peu couteuse et relativement facile à mettre en œuvre, la taxation doit toutefois être fixée à un niveau élevé pour être efficace. De ce fait, elle a comme inconvénient de réduire le revenu des agriculteurs et de limiter la compétitivité sur les marchés mondiaux. Pour neutraliser ces effets négatifs, une solution consisterait à combiner taxation et paiements distributifs ou aides au revenu. Afin de ne pas annuler les propriétés incitatives des taxes, ces aides au revenu pourraient être calculées à partir de données sur les dépenses moyennes en pesticides, en prenant en compte le type de culture et les conditions pédoclimatiques. Un tel système permettrait théoriquement d'imposer des niveaux de taxe élevés, tout en préservant en grande partie le revenu des agriculteurs. D'autres leviers complémentaires, jouant à la fois sur la promotion et l'incitation de pratiques vertueuses et sur la mobilisation des acteurs économiques environnant l'exploitation agricole, tel le dispositif des CEPP (encadré 1.11) pourraient être avantageusement combinés à la taxation et le paiement direct redistributif (Huyghe et Blanck, 2017).

⏩ La différenciation des produits alimentaires : comment accroître l'intérêt pour les produits zéro pesticide

Si depuis plusieurs années les consommateurs portent un intérêt grandissant aux produits labélisés et déclarent être prêts à payer plus pour les produits respectueux de l'environnement, aujourd'hui seuls 6 % des achats alimentaires des ménages français concernent des produits certifiés en AB (Agence Bio, 2020). La compréhension fine des modes de valorisation de « l'attribut environnemental » par les consommateurs est donc nécessaire afin d'identifier les leviers de la demande susceptibles d'être actionnés dans une consommation de produits sans pesticides ou zéro pesticide.

Stratégies de différenciation et signalisation de la qualité

L'adhésion à un programme de certification environnementale par les producteurs peut représenter une stratégie de différenciation génératrice de valeur, et cela peut

d'ailleurs faire partie intégrante du diagnostic du conseil stratégique apporté à l'agriculteur. En effet, lorsqu'il existe une prime consentie par les consommateurs pour un « attribut environnemental » (par exemple, le zéro pesticide) et que cette prime permet de compenser le surcoût lié au mode de production induit, alors il peut être opportun de différencier les produits selon cet attribut (Ambec, 2017 ; Bonroy et Constantatos, 2015). Cependant, il n'est pas toujours facile pour les consommateurs de contrôler la mise en œuvre effective de pratiques durables par les producteurs, et l'attribut environnemental reste alors un « attribut de croyance » qui peut générer un problème de confiance de la part des consommateurs. Afin de limiter cette asymétrie d'information entre producteurs et consommateurs, de nombreux écolabels ont été développés. Le développement des outils numériques permet aussi d'accroitre la transparence en facilitant la traçabilité d'un bout à l'autre d'une filière : le consommateur a alors accès à différentes informations sur le produit en flashant un code QR (*quick response*). Des outils, numériques ou non, sont aussi utilisés pour donner un score aux produits agroalimentaires selon leurs qualités nutritionnelles, voir leurs impacts sur l'environnement (Soutjis, 2020). Bien que ces notations puissent être sujettes à critiques, la prise en compte de l'utilisation des pesticides dans la note finale pourrait certainement favoriser la consommation des produits zéro pesticide.

Les consommateurs ne sont pas toujours prêts à payer une prime pour les produits éco-certifiés (Delmas et Grant, 2014) et la prolifération des certifications environnementales est source de confusion pour les consommateurs (Brécard, 2014). Il est important que la certification environnementale soit identifiable, compréhensible, et digne de confiance. Or cette crédibilité diffère selon l'organisme certificateur. Le plus souvent, l'aval de la filière (c'est-à-dire transformateurs et distributeurs) n'est pas le mieux placé pour certifier la caractéristique environnementale des produits et la confiance des consommateurs apparaît meilleure lorsque la certification est assurée par un organisme gouvernemental ou un tiers certificateur (Innes et Hobbs, 2011 ; Yokessa et Marette, 2019). Le choix du type de certification est donc important. Par ailleurs, les campagnes d'information sur l'éco-certification ou sur l'impact de l'utilisation des pesticides apparaissent parfois comme un moyen de promouvoir des pratiques durables ; elles nécessitent la prise en compte des attributs que valorisent les consommateurs à travers la certification.

Produit zéro pesticide : quel intérêt pour les consommateurs ?

Déterminer la valeur que les consommateurs attribuent à la caractéristique environnementale des produits alimentaires peut s'avérer complexe, car les produits durables sont des « biens publics impurs », c'est-à-dire qu'ils génèrent simultanément des bénéfices publics et privés (Kotchen, 2005). La valorisation par les consommateurs de l'attribut environnemental peut ainsi découler de motivations égoïstes ou de motivations altruistes. Tout d'abord, la consommation de produits sans pesticides peut être liée aux bénéfices privés générés par les avantages potentiels sur la santé. Des travaux ont montré que la valeur attribuée par les consommateurs aux produits issus de l'AB était en partie liée à l'impact reconnu de la consommation de ces produits sur leur santé (Loureiro, 2003). Il existe ainsi probablement une corrélation positive entre l'intérêt que portent les consommateurs à l'impact des pesticides sur

la santé et le prix qu'ils sont prêts à payer pour des produits sans pesticides, du moins pour les produits frais (Florax *et al.*, 2005).

Ensuite, la consommation de produits sans pesticides peut être liée aux bénéfices publics générés par une moindre contamination de l'environnement. La consommation de produits sans pesticides est bénéfique pour la population toute entière (par exemple par la préservation des ressources pour les générations futures, le maintien de la biodiversité, etc.) mais repose sur l'effort individuel de chacun (payer un prix plus élevé pour les produits sans pesticides). Cette contribution individuelle qui n'induit pas un bénéfice privé immédiat est ainsi liée à l'altruisme pur, défini comme la prise en compte des attentes des autres de manière désintéressée (Fehr et Schmidt, 1999). Cet effort individuel est également lié à l'effet de *warm glow*, effet par lequel un donateur augmente son utilité individuelle par l'acte de donner (Andreoni, 1990). Pour le cas des produits sans pesticides, il s'agit ainsi de tirer une satisfaction du fait de participer à la préservation de l'environnement. Ces deux dimensions de la valorisation environnementale sont à considérer lorsqu'il s'agit de promouvoir la certification, car les outils ne seront pas les mêmes selon le type de motivation des consommateurs. Ainsi, alors qu'une certification « zéro résidu de pesticides » garanti au consommateur l'absence de résidu de substances actives et répond ainsi à la recherche de qualité sanitaire accrue (bénéfice privé), une certification zéro pesticide fourni l'assurance supplémentaire de l'absence de pollution environnementale liée à l'utilisation de pesticides (bénéfice public).

Prendre en compte l'hétérogénéité des consommateurs dans la valorisation des produits

La prise en compte de l'hétérogénéité individuelle – les préférences et les motivations varient d'un individu à l'autre – est primordiale dans la compréhension du mécanisme de valorisation des produits par les consommateurs. Certaines caractéristiques, telles que le genre, l'âge ou le niveau d'éducation, peuvent être des déterminants importants de la sensibilité de l'individu à l'attribut environnemental. D'autres éléments expliquent également les préférences, comme par exemple les connaissances des consommateurs sur les enjeux du développement durable, leurs valeurs (individualisme/collectivisme, dépassement de soi/amélioration de soi, altruisme/égoïsme, etc.), ou leurs traits de personnalité (Peschel *et al.*, 2019). Cette caractérisation fine des consommateurs permettrait ainsi de cibler plus spécifiquement les campagnes d'information visant à promouvoir les pratiques agricoles durables (ou les certifications environnementales).

À retenir

La valorisation de pratiques zéro pesticide auprès des consommateurs requiert la mise en place de certifications, grâce à des cahiers des charges précis qui permettent la réduction de l'asymétrie d'information entre les consommateurs et les producteurs. Les progrès technologiques en matière de capteurs (chapitre 6) pourraient prochainement faciliter le suivi et le contrôle de tels cahiers des charges. La prolifération

des certifications environnementales peut entraîner une confusion qui diminue l'efficacité de ces certifications. Une rationalisation (par limitation ou regroupement) du nombre de certifications pour le zéro pesticide semble donc nécessaire afin de permettre aux consommateurs d'identifier plus facilement les particularités de chacune. De plus, les aspects multidimensionnels des produits alimentaires (dimension nutritionnelle, environnementale, sensorielle, etc.) peuvent générer des arbitrages multiples et particulièrement complexes pour les consommateurs. Si on peut attendre une valorisation accrue d'un produit sans pesticides, la dimension environnementale ne pourra pas assurer à elle seule cette valorisation si elle se fait au détriment de la qualité sensorielle comme le goût ou l'aspect.

⏩ Dynamiques collectives territoriales : comment émerge la coordination des acteurs ?

Outre les instruments standards de la politique environnementale que sont les subventions, les taxes, la règlementation ou la certification, d'autres leviers tels que celui de l'auto-organisation des acteurs à l'échelle territoriale sont susceptibles d'être activés pour favoriser la transition vers une diminution de l'utilisation des pesticides.

Contrairement à l'action publique qui repose sur une coordination induite et administrée par l'État, l'action collective trouve son origine dans les filières ou dans les territoires et n'est généralement pas impulsée par l'État. Le plus souvent, les acteurs qui initient des dynamiques collectives visent le développement de systèmes de culture alternatifs ou agroécologiques (Ploeg *et al.*, 2012). Même si ces solutions doivent encore être développées (Petit *et al.*, 2019), l'action collective ascendante (dite « *bottom-up* ») et la coordination territoriale représentent une voie intéressante pour la sortie des pesticides.

L'intérêt de l'action collective « *bottom-up* » pour la sortie des pesticides : l'exemple des variétés résistantes

Le cas récent du développement des variétés résistantes aux maladies en France est un exemple emblématique (Hannachi *et al.*, 2021). Si l'utilisation de variétés résistantes aux bioagresseurs constitue une solution efficace pour réduire l'usage de pesticides sans réduire la rentabilité de la culture (Loyce *et al.*, 2012), l'utilisation massive d'une même variété résistante dans un territoire engendre l'apparition de contournements de résistance (Rouxel *et al.*, 2003), entraînant donc parfois une augmentation de l'utilisation de pesticides. Pour éviter cela, il peut être efficace de coordonner la diversification spatiale des variétés cultivées à l'échelle des territoires (Fitt *et al.*, 2006).

Encore jamais envisagée pour gérer la problématique des pesticides, une telle coordination est déjà mise en œuvre en France afin de limiter la pollinisation croisée entre colza non-érucique, produisant des huiles à usage alimentaire, et colza érucique, réservé aux usages industriels et toxique si ingéré (lubrifiants, détergents,

agents plastifiants, etc.). Les deux types de colza étant interféconds, pour éviter de récolter de l'érucique sur les champs semés avec du non-érucique et inversement, un groupement d'intérêt économique (GIE Pollen), composé des firmes semencières, des industriels et des interprofessions, a été créé afin de gérer l'allocation des variétés de colza à l'échelle du territoire. Le dispositif a permis en 2015 de gérer 20 000 hectares et 300 agriculteurs via des contrats et des primes qui infléchissent les choix des variétés semées et qui instaurent la mise en place de distances d'isolement entre les cultures et de rotations des variétés dans le temps. Dans le cahier des charges, les seuils de qualité et les primes renvoient à la notion de « responsabilité collective » des agriculteurs, ce qui suggère que le dispositif en place est plus qu'une somme d'actions individuelles, mais mobilise des interdépendances et ressources collectives (Hannachi *et al.*, 2021).

Si ces acteurs disposent déjà de tels dispositifs collectifs, pourquoi ne les envisagent-ils pas pour une gestion territoriale des variétés résistantes et pour la sortie des pesticides ? La première raison est l'absence d'incitations et d'intérêts suffisamment forts pour préserver la durabilité des variétés résistantes et établir une coordination à l'échelle territoire. Dans le cas du colza, les acteurs, en se coordonnant, parviennent à créer collectivement des plus-values, réparties entre les parties prenantes au travers des primes liées aux résultats ou à la mise en commun de moyens de production. Ces primes permettent également de compenser les coûts supplémentaires engendrés par l'effort de coordination. La deuxième raison est liée à la faible visibilité de l'intérêt collectif : dans le cas des variétés résistantes, il est vraisemblable que les parties prenantes n'arrivent pas à identifier d'intérêts collectifs assez forts qui pourraient les pousser à construire une stratégie collective. Enfin, à la différence de la situation de la coexistence des variétés de colza, la gestion des variétés pour éviter un contournement repose sur une tension entre un coût d'organisation aujourd'hui et un bénéfice pour demain.

Faire émerger la coordination et créer des dynamiques collectives territoriales

L'émergence de l'action collective « *bottom-up* » passe nécessairement par des interactions entre les parties prenantes qui permettent de transformer les intérêts individuels en intérêt collectif. De telles interactions peuvent être facilitées par l'utilisation d'outils de médiation, comme les ateliers de recherche-action. En 2016, un atelier de recherche-action a été organisé pour travailler sur la problématique des variétés résistantes au phoma du colza, une des principales maladies de la culture (Hannachi *et al.*, 2021). Les différents acteurs de la filière ont exploré l'intérêt et les modalités de mise en place d'une auto-organisation pour la gestion collective des variétés résistantes. Ils se sont alors rendus compte que cette organisation pouvait être moins difficile que prévue. Cet atelier a permis de faciliter l'action collective en appelant à la construction sociale d'intérêts communs. Pour la première fois, l'ensemble des sélectionneurs commercialisant des semences en colza en France ont décidé, malgré leur position concurrentielle, de créer un groupe pour parler du suivi et de la coordination sur le déploiement des variétés résistantes dans les territoires français. Un programme de recherche transdisciplinaire réunissant les sélectionneurs,

Terre-Inovia et INRAE a été signé en 2020. Ce programme dénommé « club colza » devrait durer 10 ans et explorer le développement d'outils de suivi et de modalités de coordination.

Toutefois, l'émergence de l'auto-organisation est tributaire de certaines conditions. La première est la nécessité de mettre en place de nouvelles interactions dans des « écosystèmes organisationnels », tel que le club colza, qui rassemblent une diversité d'acteurs ayant déjà une certaine organisation. Sur ces enjeux de bien commun, l'État peut jouer un rôle de facilitateur qui soutient l'auto-organisation. L'implication de l'État est ainsi parfois nécessaire pour rassembler, instaurer une médiation et mettre en confiance des acteurs économiques qui sont souvent en concurrence sur les parts de marchés. De telles évolutions sont déjà à l'œuvre et ont montré leur efficacité, y compris sur le cas de la gestion durable de maladies en agriculture (Charrier *et al.*, 2020). La deuxième condition est l'importance de considérer les rationalités des acteurs comme humaines et évolutives. Il peut être difficile pour certains acteurs de tenir compte des impacts environnementaux de leurs décisions, quand ces impacts échappent à leur calcul « coûts-bénéfices » individuel. Pour remédier à cela, il importe de développer des outils permettant de rendre visibles des problèmes qui peuvent être résolus par un engagement collectif, ce qui permet aux acteurs de faire évoluer leurs rationalités et de mieux prendre en considération leurs interdépendances. Dans le cas des résistances variétales, il existe actuellement des outils de suivi des résistances développés par les instituts techniques agricoles et les entreprises privées, mais ces outils permettent seulement d'aider la décision individuelle (à l'échelle de la variété et non du territoire). Pour favoriser la transition, il pourrait être intéressant d'élaborer des outils collectifs permettant de dépasser l'échelle individuelle de l'exploitation et d'explorer des stratégies collectives dans les territoires. À cet égard, la recherche-action par modélisation d'accompagnement, qui consiste à utiliser des modèles multi-agents et des jeux de rôles multi-acteurs comme des outils de représentation et de simulation du fonctionnement des systèmes socio-écologiques à l'échelle des territoires, constitue une perspective prometteuse (Poggi *et al.*, 2021). Enfin, il est important que les nouveaux écosystèmes organisationnels soient multi-acteurs et relient l'aval et l'amont des filières (Thomas *et al.*, 2020).

À retenir

La coordination des agriculteurs et les dynamiques collectives dans les territoires représentent des leviers intéressants, et parfois indispensables, pour sortir des pesticides. En se coordonnant à l'échelle des territoires, les agriculteurs et les autres parties prenantes sont susceptibles d'élaborer des solutions innovantes et efficaces à des problématiques qui nécessitent une gestion à une échelle au-delà de l'individu. Un rôle nouveau est ainsi possible pour des structures économiques collectives telles que les coopératives (Hannachi *et al.*, 2020). Pour cela, des outils aidant les différents acteurs à comprendre leurs contraintes respectives et à trouver des solutions communes sont nécessaires afin de dépasser l'échelle individuelle et de favoriser les stratégies collectives. Toutefois, de telles initiatives ont besoin « d'écosystèmes organisationnels » pour émerger et se développer. À cet égard, l'État est susceptible

de jouer un rôle, en passant d'un rôle de prescripteur de normes à celui d'inducteur de dynamiques collectives (encadré 7.8).

Encadré 7.8. Le projet de recherche FAST : faciliter l'action publique pour sortir des pesticides (PPR CPA – 2020/2026)

La transition vers une agriculture sans pesticides peut être favorisée par différentes initiatives, publiques ou privées, dont les modalités de mise en œuvre restent à déterminer. Le projet de recherche FAST vise à fournir un cadre théorique et des preuves empiriques solides quant à l'efficacité de diverses actions publiques visant à déclencher une transition à grande échelle vers une agriculture sans pesticides. Pour cela, des recherches sont menées sur les obstacles potentiels ainsi que sur les facteurs qui pourraient faciliter cette transition. Plus particulièrement, des travaux sont conduits sur les mécanismes spatiaux et collectifs susceptibles d'encourager une réduction forte des pesticides. De nouveaux instruments économiques sont également élaborés et testés, aussi bien par des travaux de modélisation que par des expériences sur le terrain. Ainsi, FAST propose des solutions concrètes (politiques et organisationnelles), directement utilisables par les décideurs publics et les parties prenantes, dont l'efficacité est évaluée par différentes approches, comme l'économie expérimentale ou la recherche-action, ainsi que par des modèles de simulation à grande échelle (INRAE, 2021a).

⏩ Conclusion

Une transition vers une agriculture sans pesticides ne repose pas uniquement sur l'élaboration de solutions techniques. Elle requiert également la mise en œuvre d'innovations politiques et organisationnelles permettant l'adoption, l'adaptation et le déploiement à grande échelle des alternatives aux pesticides. Différents types d'instruments politiques ont été conçus et utilisés jusqu'à présent pour réduire l'utilisation des pesticides – principalement les interdictions, les contrats agro-environnementaux, la taxation, l'accompagnement technique – avec une ambition mesurée en matière de réduction, car fruit de négociations entre parties prenantes, et un succès mitigé. Il existe toutefois de nombreuses façons d'améliorer l'efficacité de ces dispositifs, et il existe également beaucoup d'autres instruments disponibles en théorie.

Les dispositifs de formation et d'accompagnement des agriculteurs souhaitant adopter des pratiques alternatives existent déjà, mais pourraient être considérablement améliorés via le financement d'un conseil agricole davantage orienté vers le conseil stratégique permettant la reconception des systèmes, des formations agricoles plus ambitieuses en agroécologie et l'implication des différents acteurs des filières et des territoires. Le cadre règlementaire est, lui aussi, susceptible d'être amélioré, dans le sens d'une plus grande transparence de l'homologation des produits phytosanitaires, afin d'appuyer la stratégie européenne affichée « De la ferme à la table », et en définissant également un véritable statut des alternatives aux pesticides de synthèse ou plus précisément des alternatives en matière de protection des cultures. L'efficacité des dispositifs volontaires de type MAE, historiquement faible, est susceptible d'être améliorée au travers de diverses innovations, aujourd'hui considérées

comme prometteuses : des contrats plus flexibles, des paiements qui encourageraient la coordination entre agriculteurs, des paiements qui exploiteraient les effets de pairs ou qui permettraient de rémunérer l'agriculteur en fonction de son effort réel. Un dispositif de taxation des pesticides, associé à un système de compensation des effets de la taxe sur revenu serait en mesure de jouer le rôle de moteur d'une politique efficace de réduction de l'utilisation des pesticides et, à terme, de sortie des pesticides en touchant l'ensemble des agriculteurs. La création de normes nouvelles, dans le secteur alimentaire également, serait un levier puissant de la transition, en donnant une visibilité réelle aux produits « sans pesticides ». Enfin, les dynamiques collectives qui existent déjà dans certaines filières, et qui visent à dépasser l'échelle individuelle de l'exploitation agricole pour construire des solutions à l'échelle d'un territoire tout entier, constituent, elles aussi, un moyen d'action prometteur. Cela peut par exemple impliquer une re-conception de l'approvisionnement de la restauration collective ou la mise en place de projets alimentaires territoriaux (PAT) qui ont pour objectif de relocaliser une agriculture durable dans les territoires. Si aucun des PAT actuels n'affichent un objectif « sans pesticides », nombre des 197 PAT labélisés à ce jour s'inscrivent dans l'AB et, plus encore, affichent une préoccupation de réduction de l'impact de la production alimentaire locale sur l'environnement. De nouvelles recherches doivent aujourd'hui être menées pour analyser la faisabilité et évaluer les impacts économiques et environnementaux potentiels de ces nouveaux leviers politiques et organisationnels.

Références bibliographiques

Agence Bio, 2020. Les chiffres 2019 du secteur bio, https://www.agencebio.org/vos-outils/les-chiffres-cles/?

Ambec S., 2017. Gaining competitive advantage with green policy, *in* Altenburg T., Assmann C. (éd.), *Green Industrial Policy. Concept, Policies, Country Experiences*, chapitre 3, Geneva, Bonn, UN Environment, German Development Institute, 38-50.

Andreoni J., 1990. Impure altruism and donations to public goods: a theory of warm-glow giving?, *Economic Journal*, 100(401) :464-477. https://doi.org/10.2307/2234133

Anses, 2020. Glyphosate : l'Anses publie les résultats de son évaluation comparative avec les alternatives non chimiques disponibles.

Arata L., Sckokai P., 2016. The impact of agri-environmental schemes on farm performance in five E.U. member states: a DID-matching approach, *Land Economics*, 92(1) :167-186. https://doi.org/10.3368/le.92.1.167

Aubert M., Enjolras G., 2014. The determinants of chemical input use in agriculture: a dynamic analysis of the wine grape–growing sector in France, *Journal of Wine Economics*, 9(1) :75-99. https://doi.org/10.1017/jwe.2013.34

Aubert P.-M., Poux X., 2021. *La certification Haute Valeur Environnementale dans la PAC : enjeux pour une transition agroécologique réelle*, Propositions, Iddri, 4 p.

Banerjee S., Vries F.P. de, Hanley N., Soest D.P. van, 2014. The impact of information provision on agglomeration bonus performance: an experimental study on local networks, *American Journal of Agricultural Economics*, 96(4) :1009-1029. https://doi.org/10.1093/ajae/aau048

Behaghel L., Macours K., Subervie J., 2019. How can randomised controlled trials help improve the design of the common agricultural policy?, *European Review of Agricultural Economics*, 46(3) :473-493. https://doi.org/10.1093/erae/jbz021

Bonroy O., Constantatos C., 2015. On the economics of labels: how their introduction affects the functioning of markets and the welfare of all participants, *American Journal of Agricultural Economics*, 97(1) :239-259. https://doi.org/10.1093/ajae/aau088

Bontems P., 2019. Refunding emissions taxes: the case for a tree-part policy, *The B.E. Journal of Economic Analysis & Policy*, 19(2). https://doi.org/10.1515/bejeap-2018-0123

Brécard D., 2014. Consumer confusion over the profusion of eco-labels: lessons from a double differentiation model, *Resource and Energy Economics*, 37 :64-84. https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2013.10.002

Bureau D., Henriet F., Schubert K., 2019. Pour le climat : une taxe juste, pas juste une taxe, *Notes du conseil d'analyse économique*, 50(2) :1-12. https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-02301656

Carpentier A., Barbier J.M., Bontems P., Lacroix A., Laplana R., Lemarie S., *et al.* 2005. Aspects économiques de la régulation des pollutions par les pesticides, *in* J.M. Barbier J.M., Bontems P., Carpentier A., Lacroix A., Laplana R., *et al.* (éd.), *Pesticides, agriculture et environnement : Réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux*, Paris, INRA et Cemagref, 1-5. https://hal.inrae.fr/hal-02587746

Carpentier A., Fadhuile A., Roignant M., Blanck M., Reboud X., Jacquet F., Huygue C., 2020. *Alternatives au glyphosate en grandes cultures. Evaluation économique*, Paris, INRAE, 161 p. https://doi.org/10.15454/9gv2-3904

Carpentier A., Salanie F., ministère de l'Aménagement du territoire et de l'environnement, 1999. Engrais et pesticides : Effets incitatifs des instruments économiques, *in* Les entretiens de Ségur : Pollutions locales de l'air et de l'eau : quelles implications économiques ? p. 14. https://hal.inrae.fr/hal-02839526

CEP, 2021. *Réussir les projets agro-environnementaux et climatiques (PAEC) : bonnes pratiques et recommandations*, Paris, Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 4 p.

Cerf M., Omon B., Chantre E., Guillot M., Le Bail M., Lamine C., Olry P., 2010. Vers des systèmes économes en intrants : quelles trajectoires et quel accompagnement pour les producteurs en grandes cultures, *Innovations Agronomiques*, 8 :105-119. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01195279

Cerf M., Parnaudeau V., Reau R., 2019. Vers un diagnostic agronomique stratégique traitant de questions agro-environnementales, *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 9(2) :27-37. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02483838

Cernay C., Ben-Ari T., Pelzer E., Meynard J.-M., Makowski D., 2015. Estimating variability in grain legume yields across Europe and the Americas, *Scientific Reports*, 5 :11171. https://doi.org/10.1038/srep11171

Chabé-Ferret S., Le Coent P., Reynaud A., Subervie J., Lepercq D., 2019. Can we nudge farmers into saving water? Evidence from a randomised experiment, *European Review of Agricultural Economics*, 46(3) :393-416. https://doi.org/10.1093/erae/jbz022

Chabé-Ferret S., Subervie J., 2013. How much green for the buck? Estimating additional and windfall effects of French agro-environmental schemes by DID-matching, *Journal of Environmental Economics and Management*, 65(1) :12-27. https://doi.org/10.1016/j.jeem.2012.09.003

Charrier F., Hannachi M., Barbier M., 2020. Rendre l'ingérable gérable par la transformation collective de la situation de gestion : Etude du cas de la gestion d'une maladie animale en Corse, *Annales des Mines - Gerer et comprendre*, 139(1) :33-45. https://doi.org/10.3917/geco1.139.0033

Christensen T., Pedersen A.B., Nielsen H.O., Mørkbak M.R., Hasler B., Denver S., 2011. Determinants of farmers' willingness to participate in subsidy schemes for pesticide-free buffer zones—A choice experiment study, *Ecological Economics*, 70(8) :1558-1564. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.03.021

Commission Européenne, 2020. *Treizième rapport financier de la commission au Parlemant européen et au Conseil sur le Fonds Européen Agricole pour le Développement Rural (FEADER) - Exercice 2019*, Bruxelles, 17 p.

Cour des comptes européenne, 2020. *Biodiversité des terres agricoles : la contribution de la PAC n'a pas permis d'enrayer le déclin*, Luxembourg, Publications Office, 66 p.

Delmas M.A., Grant L.E., 2014. Eco-labeling strategies and price-premium: the wine industry puzzle, *Business & Society*, 53(1) :6-44. https://doi.org/10.1177/0007650310362254

DGER, 2018. *Pluri, inter et transdisciplinarité dans l'enseignement agricole*, rapport, Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 134 p. (coll. DGER - Inspection de l'enseignement agricole).

Dupraz P., Latouche K., Turpin N., 2009. Threshold effect and co-ordination of agri-environmental efforts, *Journal of Environmental Planning and Management*, 52(5) :613-630. https://doi.org/10.1080/09640560902958164

Eshuis J., Stuiver M., 2005. Learning in context through conflict and alignment: Farmers and scientists in search of sustainable agriculture, *Agriculture and Human Values*, 22(2) :137-148. https://doi.org/10.1007/s10460-004-8274-0

Fehr E., Schmidt K., 1999. A theory of fairness, competition, and cooperation, *The Quarterly Journal of Economics*, 114(3) :817-868. https://www.jstor.org/stable/2586885

Femenia F., Letort E., 2016. How to significantly reduce pesticide use: an empirical evaluation of the impacts of pesticide taxation associated with a change in cropping practice, *Ecological Economics*, 12 :527-37. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.02.007

Ferraro P.J., 2008. Asymmetric information and contract design for payments for environmental services, *Ecological Economics*, 65(4) :810-821. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.07.029

Finger R., Möhring N., Dalhaus T., Böcker T., 2017. Revisiting pesticide taxation schemes, *Ecological Economics*, 134 :263-266. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.12.001

Fitt B.D.L., Evans N., Cooke B.M., Howlett B.J., 2006. *Sustainable strategies for managing* Brassica napus *(oilseed rape) resistance to* Leptosphaeria maculans *(phoma stem canker)*, Springer Science & Business Media, 126 p.

Florax R.J.G.M., Travisi C.M., Nijkamp P., 2005. A meta-analysis of the willingness to pay for reductions in pesticide risk exposure, *European Review of Agricultural Economics*, 32(4) :441-467. https://doi.org/10.1093/erae/jbi025

Furlan L., Pozzebon A., Duso C., Simon-Delso N., Sánchez-Bayo F., Marchand P.A. *et al.*, 2021. An update of the Worldwide Integrated Assessment (WIA) on systemic insecticides. Part 3: alternatives to systemic insecticides, *Environmental Science and Pollution Research*, 28(10) :11798-11820. https://doi.org/10.1007/s11356-017-1052-5

Gardiès C., Hervé N., 2015. *L'enseignement agricole entre savoirs professionnels et savoirs scolaires : Les disciplines en question*, Dijon, Educagri Editions, 249 p. (coll. Agora)

Garforth C., Angell B., Archer J., Green K., 2003. Fragmentation or creative diversity? Options in the provision of land management advisory services, *Land Use Policy*, 20(4) :323-333. https://doi.org/10.1016/S0264-8377(03)00035-8

Girard N., Magda D., 2018. Les jeux entre singularité et généricité des savoirs agro-écologiques dans un réseau d'éleveurs, *Revue d'anthropologie des connaissances*, 12(2) :199-228. https://doi.org/10.3917/rac.039.0199

Grimonprez B., 2021. Réintroduction des néonicotinoïdes dans l'environnement : La nécessité fait-elle loi ?, *Droit de l'environnement*, 296:9-18. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03105369/document

Grimonprez B., Bouchema I., 2020. Pesticides et riverains : L'impossible conciliation juridique ?, *La semaine juridique - édition générale*, 174. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02491337

Guillot M.-N., Olry P., Cerf M., 2010. L'activité de conseil en grandes cultures : d'une épreuve à une autre, *in Colloque SFER « Conseil en agriculture : acteurs, marchés et mutations »*, octobre 2010, Dijon. https://hal.inrae.fr/hal-02756301

Hannachi M., Fares M., Coleno F., Assens C., 2020. The "new agricultural collectivism": How cooperatives horizontal coordination drive multi-stakeholders self-organization, *Journal of Co-Operative Organization and Management*, 8(2) :100-111. https://doi.org/10.1016/j.jcom.2020.100111

Hannachi M., Coléno F.C., Bousset L., Delourme R., Chèvre A.-M., Balesdent M.-H. *et al.*, 2021. Vers une gestion des gènes de résistances comme des biens communs, *in* Lannou C., Roby D.,

Ravigné V., Hannachi M., Moury B. (éd.), *L'immunité des plantes : Pour des cultures résistantes aux maladies*, éditions Quae, 259-268. (coll. Savoir Faire). https://hal.inrae.fr/hal-03316056

Huyghe C., Blanck M., 2017. Les certificats d'économie de produits phytopharmaceutiques. Contexte et mise en œuvre, *Innovations Agronomiques*, 61 :99-110. https://doi.org/10.15454/1.5174015993984966E12

Innes B.G., Hobbs J.E., 2011. Does it matter who verifies production-derived quality?, *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue Canadienne d'agroeconomie*, 59(1) :87-107. https://doi.org/10.1111/j.1744-7976.2010.01194.x

INRAE, 2021a. FAST. https://www6.inrae.fr/cultiver-proteger-autrement/Les-Projets/FAST

INRAE, 2021b. Prospective 2050. https://www6.inrae.fr/cultiver-proteger-autrement/Les-Outils-de-pilotage/Prospective-2050

Jacquet F., Butault J.-P., Guichard L., 2011. An economic analysis of the possibility of reducing pesticides in French field crops, *Ecological Economics*, 70(9) :1638-1648. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.04.003

Jacquet F., Delame N., Reboud X., Huyghe C., Thoueille A., 2019a. *Alternatives au glyphosate en arboriculture. Evaluation économique des pratiques de désherbage*, Paris, France, INRAE, 25 p. https://doi.org/10.15454/02v4-x222

Jacquet F., Delame N., Vita J.L., Reboud X., Huyghe C., 2019b. *Alternatives au glyphosate en viticulture. Evaluation économique des pratiques de désherbage*, Paris, France, INRAE, 25 p. https://doi.org/10.15454/1j9z-3m37

Jaime M.M., Coria J., Liu X., 2016. Interactions between CAP agricultural and agri-environmental subsidies and their effects on the uptake of organic farming, *American Journal of Agricultural Economics*, 98(4) :1114-1145. https://doi.org/10.1093/ajae/aaw015

Jouan J., De Graeuwe M., Carof M., Baccar R., Bareille N., Bastian S., *et al.*, 2020. Learning interdisciplinarity and systems approaches in agroecology: experience with the serious game SEGAE, *Sustainability*, 12(11) :43-51. https://doi.org/10.3390/su12114351

Klerkx L., Jansen J., 2010. Building knowledge systems for sustainable agriculture: supporting private advisors to adequately address sustainable farm management in regular service contacts, *International Journal of Agricultural Sustainability*, 8(3) :148-163. https://doi.org/10.3763/ijas.2009.0457

Knierim A., Labarthe P., Laurent C., Prager K., Kania J., Madureira L., Ndah T.H., 2017. Pluralism of agricultural advisory service providers – Facts and insights from Europe, *Journal of Rural Studies*, 55 :45-58. https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2017.07.018

Kotchen M.J., 2005. Impure public goods and the comparative statics of environmentally friendly consumption, *Journal of Environmental Economics and Management*, 49(2) :281-300. https://doi.org/10.1016/j.jeem.2004.05.003

Kuhfuss L., Menu M.-F., Préget R., Thoyer S., 2012. Une alternative originale pour l'allocation de contrats agro-environnementaux : L'appel à projets de l'Agence de l'eau Artois-Picardie, *Pour*, 213(1) :97-105. https://doi.org/10.3917/pour.213.0097

Kuhfuss L., Préget R., Thoyer S., Hanley N., 2016. Nudging farmers to enrol land into agri-environmental schemes: the role of a collective bonus, *European Review of Agricultural Economics*, 43(4) :609-636. https://doi.org/10.1093/erae/jbv031

Kuhfuss L., Subervie J., 2018. Do European agri-environment measures help reduce herbicide use? Evidence from viticulture in France, *Ecological Economics*, 149 :202-211. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.03.015

Labarthe P., Gallouj F., Laurent C., 2013. Privatisation du conseil et évolution de la qualité des preuves disponibles pour les agriculteurs, *Économie rurale*, 337 :7-24. https://doi.org/10.4000/economierurale.4074

Labarthe P., Laurent C., 2013. Privatization of agricultural extension services in the EU: towards a lack of adequate knowledge for small-scale farms?, *Food Policy*, 38 :240-252. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2012.10.005

Lapierre M., Velly G.L., Bougherara D., Préget R., Sauquet A., Gazzotti L., 2021. *Innover pour renforcer l'attractivité des mesures agroenvironnementales : résultats d'une enquête menée par le CEE-M en 2020 auprès de 165 viticulteurs d'Occitanie*, CEEM Dissemination paper, Centre d'Economie de l'Environnement, Montpellier, 6 p. https://hal.inrae.fr/hal-03219471

Le Coent P., Préget R., Thoyer S., 2021. Farmers follow the herd: a theoretical model on social norms and payments for environmental services, *Environmental and Resource Economics*, 78(2) :287-306. https://doi.org/10.1007/s10640-020-00532-y

Lefebvre M., Langrell S.R.H., Gomez-y-Paloma S., 2015. Incentives and policies for integrated pest management in Europe: a review, *Agronomy for Sustainable Development*, 1(35) :27-45. https://doi.org/10.1007/s13593-014-0237-2

Libération, 2018. Une révolution urgente semble nécessaire dans l'usage des antifongiques, *Libération*, 15/04/2018.

Lichtenberg E., 2004. Some hard truths about agriculture and the environment, *Agricultural and Resource Economics Review*, 33(1) :24-33. https://doi.org/10.1017/S106828050000561X

Loureiro M.L., 2003. Rethinking new wines: implications of local and environmentally friendly labels, *Food Policy*, 28(5-6) :547-560. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2003.10.004

Loyce C., Meynard J.M., Bouchard C., Rolland B., Lonnet P., Bataillon P., *et al.*, 2012. Growing winter wheat cultivars under different management intensities in France: a multicriteria assessment based on economic, energetic and environmental indicators, *Field Crops Research*, 125 :167-178. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.08.007

Mamine F., Fares M., Minviel J.J., 2020. Contract design for adoption of agrienvironmental practices: a meta-analysis of discrete choice experiments, *Ecological Economics*, 176 :106721. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106721

Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2018. Plan Écophyto II+, Paris, 66 p.

Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2021. Produits phytosanitaires : séparation de la vente et du conseil à partir du 1er janvier 2021, *Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation*.

Möhring N., Dalhaus T., Enjolras G., Finger R., 2020. Crop insurance and pesticide use in European agriculture, *Agricultural Systems*, 184 :102902. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102902

ODR, 2021. L'Observatoire du développement Rural.

Pedersen A.B., Nielsen H.Ø., Daugbjerg C., 2020. Environmental policy mixes and target group heterogeneity: analysing Danish farmers' responses to the pesticide taxes, *Journal of Environmental Policy & Planning*, 22(5) :608-619. https://doi.org/10.1080/1523908X.2020.1806047

Pe'er G., Zinngrebe Y., Moreira F., Sirami C., Schindler S., Müller R., *et al.*, 2019. A greener path for the EU common agricultural policy, *Science*, 365(6452) :449-451. https://doi.org/10.1126/science.aax3146

Peschel A.O., Grebitus C., Alemu M.H., Hughner R.S., 2019. Personality traits and preferences for production method labeling – A latent class approach, *Food Quality and Preference*, 74 :163-171. https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2019.01.014

Petit T., Martel G., Vertès F., Couvreur S., 2019. Long-term maintenance of grasslands on dairy farms is associated with redesign and hybridisation of practices, motivated by farmers' perceptions, *Agricultural Systems*, 173 :435-448. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.02.012

Ploeg J.D. van der, Jingzhong Y., Schneider S., 2012. Rural development through the construction of new, nested, markets: comparative perspectives from China, Brazil and the European Union, *The Journal of Peasant Studies*, 39(1) :133-173. https://doi.org/10.1080/03066150.2011.652619

Poggi S., Vinatier F., Hannachi M., Sanz Sanz E., Rudi G., Zamberletti P., *et al.*, 2021. How can models foster the transition towards future agricultural landscapes?, *Advances in Ecological Research*, 64 :305-368. https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2020.11.004

Primdahl J., Peco B., Schramek J., Andersen E., Oñate J.J., 2003. Environmental effects of agri-environmental schemes in Western Europe, *Journal of Environmental Management*, 67(2) :129-138. https://doi.org/10.1016/S0301-4797(02)00192-5

Pufahl A., Weiss C.R., 2009. Evaluating the effects of farm programmes: results from propensity score matching, *European Review of Agricultural Economics*, 36(1) :79-101. https://doi.org/10.1093/erae/jbp001

Raineau Y., 2018. *Défis environnementaux de la viticulture : une analyse comportementale des blocages et des leviers d'action*, thèse de doctorat, École doctorale Entreprise, économie, société (Pessac, Gironde). https://www.theses.fr/2018BORD0033

Reymond D., Meyer D., Tomaszyk J.M., Sarrazin F., 2012. Offre de conseil : Structurer un pôle de compétence entre différents opérateurs sur un territoire, *Innovations Agronomiques*, 25 :375-382. https://hal.inrae.fr/view/index/identifiant/hal-02653000

Rouxel T., Penaud A., Pinochet X., Brun H., Gout L., Delourme R., *et al.*, 2003. A 10-year survey of populations of Leptosphaeria maculans in France indicates a rapid adaptation towards the Rlm1 resistance gene of oilseed rape, *European Journal of Plant Pathology*, 109(8) :871-881. https://doi.org/10.1023/A:1026189225466

Skevas T., Oude Lansink A.G.J.M., Stefanou S.E., 2013. Designing the emerging EU pesticide policy: a literature review, *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, (64-65) :95-103. https://doi.org/10.1016/j.njas.2012.09.001

Soutjis B., 2020. Gouverner la qualité alimentaire par les applications, *Sociologies pratiques*, 41(2) :81-94. https://doi.org/10.3917/sopr.041.0081

Thibierge C., Chevallier J., 2013. *La densification normative. Découverte d'un processus*, Paris, Mare & Martin, 1204 p. https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01531550

Thomas A., Lamine C., Allès B., Chiffoleau Y., Doré A., Dubuisson-Quellier S., Hannachi M., 2020. The key roles of economic and social organization and producer and consumer behaviour towards a health-agriculture-food-environment nexus: recent advances and future prospects, *Review of Agricultural, Food and Environmental Studies*, 101(1) :23-46. https://doi.org/10.1007/s41130-020-00115-x

Thomas J., 2018. Reconnaissance politique des savoirs professionnels. Expérimentation, légitimation, réflexivité et organisation d'un groupe d'agriculteurs autour des connaissances professionnelles, *Revue d'anthropologie des connaissances*, 12(2) :229-257. https://doi.org/10.3917/rac.039.0229

Thoyer S., Préget R., 2019. Enriching the CAP evaluation toolbox with experimental approaches: introduction to the special issue, *European Review of Agricultural Economics*, 46(3) :347-366. https://doi.org/10.1093/erae/jbz024

Thoyer S., Saïd S., 2007. Mesures agri-environnementales : Quels mécanismes d'allocation ?, *in Conservation de la biodiversité et PAC de l'Union européenne*, Monde Européen et International, Documentation française. https://hal.inrae.fr/hal-02811623

Vaissière A.-C., Tardieu L., Quétier F., Roussel S., 2018. Preferences for biodiversity offset contracts on arable land: a choice experiment study with farmers, *European Review of Agricultural Economics*, 45(4) :553-582. https://doi.org/10.1093/erae/jby006

Villemaine R., Compagnone C., Falconnet C., 2021. The social construction of alternatives to pesticide use: a study of biocontrol in Burgundian viticulture, *Sociologia Ruralis*, 61(1) :74-95. https://doi.org/10.1111/soru.12320

Wallander S., Ferraro P., Higgins N., 2017. Addressing participant inattention in federal programs: a field experiment with the conservation reserve program, *American Journal of Agricultural Economics*, 99(4) :914-931. https://doi.org/10.1093/ajae/aax023

Yokessa M., Marette S., 2019. A review of eco-labels and their economic impact, *International Review of Environmental and Resource Economics*, 13(1-2) :119-163. https://doi.org/10.1561/101.00000107

Zimmermann A., Britz W., 2016. European farms' participation in agri-environmental measures, *Land Use Policy*, 50 :214-228. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.09.019

Conclusion générale

Christian Huyghe, Florence Jacquet, Julia Jouan

Cet ouvrage expose les connaissances actuelles sur les facteurs qui expliquent l'utilisation massive des pesticides et développe les axes de recherche prioritaires afin d'atteindre une agriculture zéro pesticide. Un ensemble de chapitres développant chacun un domaine d'action permet d'appréhender la complexité d'un tel changement et la nécessité de privilégier les approches globales et systémiques. Se passer des pesticides de synthèse ou ayant un impact significatif sur le milieu est une voie ambitieuse mais nécessaire pour que l'agriculture réponde à différents enjeux : préservation de l'environnement et de la santé des citoyens, productions de biens en quantité et qualité suffisantes, viabilité économique pour les agriculteurs et les filières. Obligation est faite à l'agriculture d'atteindre ces objectifs dans un contexte de changement global et de transition alimentaire à l'échelle mondiale. Cette évolution nécessitera le travail conjoint de scientifiques de différentes disciplines ainsi qu'un changement profond de paradigmes de recherche. Des fronts nouveaux de recherche, extrêmement fertiles ont été décrits dans cet ouvrage. Mais au-delà de la recherche, c'est l'ensemble de la société et des acteurs du monde agricole qui sont concernés par un changement nécessaire des stratégies et des comportements. La synthèse présentée dans cet ouvrage est centrée sur l'agriculture française et se base sur des résultats et des projets de recherche principalement issus de laboratoires français. Cependant, l'objectif du zéro pesticide doit être traité au-delà des frontières de l'Hexagone, et implique des collaborations nécessaires à l'échelle européenne et internationale. Il doit être réfléchi également en articulation avec les autres problématiques d'importance majeure qui interviennent sur la reconception des systèmes de culture et des systèmes alimentaires : le changement climatique, la restauration de la biodiversité, la préservation des ressources en eau et de la fertilité des sols et la sécurité alimentaire.

⏩ Le zéro pesticide comme nouveau paradigme pour la recherche

Différentes stratégies pour réduire drastiquement l'utilisation des pesticides sont exposées au fil des chapitres de cet ouvrage : elles sont basées sur l'agronomie, le biocontrôle, l'amélioration des plantes, les agroéquipements, ainsi que sur les leviers des politiques et des marchés. Bien que le choix ait été fait d'exposer successivement les défis par domaine, il est important de souligner à nouveau que c'est par des actions combinées, issues de ces différents domaines que se trouvent le plus souvent les solutions efficaces. Par exemple, les progrès en matière de biocontrôle doivent être pensés en cohérence avec la reconception des systèmes de culture et la sélection de nouvelles variétés. En parallèle, des innovations dans les filières de transformation et de commercialisation doivent rendre plus attractives ces solutions pour les agriculteurs et les consommateurs. Ainsi, chaque chapitre représente une composante d'une stratégie globale de sortie des pesticides, engendrant des axes et des besoins de recherche dans des domaines et des disciplines scientifiques distincts mais complémentaires.

Pour réduire drastiquement l'utilisation de pesticides en agriculture, nous soutenons qu'il faut mettre en œuvre des recherches qui se situent dans un cadre où on exclut le recours aux pesticides. Ceci oblige à explorer tous les fronts de recherche, en partant du point d'arrivée visé, et non en cherchant à modifier l'existant par une démarche incrémentale. On change ici de paradigme de recherche en ne se situant plus dans une démarche de réduction progressive des pesticides, mais de rupture et de reconception de la protection des cultures, où la prophylaxie, et donc la réduction de la pression des bioagresseurs, jouent un rôle central. Ce changement de cap nous amène à explorer des fronts de recherche inédits porteurs d'innovations transformatrices. Mais il nous amène aussi à repenser les modes de collaboration entre la recherche et les acteurs impliqués dans ce changement, les agriculteurs autant que les entreprises d'amont et d'aval. La recherche de solutions adaptées localement aux contextes et aux territoires, représente aussi une condition nécessaire à ce changement et nécessite de nouvelles pratiques de recherche participative.

Nous n'avons pas traité, dans cet ouvrage, les conséquences sur l'organisation et le fonctionnement du système de recherche et d'innovation lui-même de cette nouvelle stratégie. Sans entrer de manière approfondie dans le sujet, nous pensons que les chercheurs ne pourront poursuivre ces nouvelles voies de recherche que si l'organisation, les incitations et le financement de la recherche sont repensés avec cet objectif. Par exemple, le financement de projets dans la durée doit être encouragé pour permettre une interdisciplinarité, une prise de risque et un investissement suffisant, aussi bien dans les thèmes de recherche fondamentale que dans la recherche participative. Il s'agira aussi d'inciter les chercheurs eux-mêmes à s'impliquer dans des processus de conception de solutions, les aidant à prioriser les connaissances à produire afin de contribuer au processus d'innovation (Toffolini *et al.*, 2020). C'est bien dans cette philosophie du temps long que le PPR « Cultiver et Protéger Autrement » a été conçu[33].

33. Les projets lauréats sont financés pour une durée inédite de six ans contre trois ans en général dans les autres appels.

⏩ Le zéro pesticide : une problématique internationale qui touche l'ensemble des acteurs des filières agricoles et agroalimentaires

Cet ouvrage est sciemment centré sur l'agriculture française et aborde donc la question du zéro pesticide à l'échelle de la France. Ce choix a été fait pour mieux illustrer les enjeux de ce changement pour l'agriculture hexagonale. Cependant, il est important de souligner que le maintien de la compétitivité de l'agriculture française à l'échelle européenne nécessite que l'ensemble des agricultures européennes s'engagent simultanément dans cet objectif de réduction forte de l'usage des pesticides. C'est bien dans cet objectif que le *Green Deal* européen a été lancé en 2020 en donnant un cadre particulièrement propice à une transition profonde de la protection des cultures dans l'ensemble des pays européens. La recherche pour développer une agriculture sans pesticides devra se faire par la collaboration de chercheurs de nombreux pays, notamment européens, car elle nécessite la mobilisation de toutes les compétences disséminées à travers l'UE et au-delà, et la mise en commun de ressources. Une transition vers le zéro pesticide qui serait limitée à la France n'a d'ailleurs pas de sens du point de vue des impacts environnementaux attendus, la restauration de la biodiversité ne peut être pensée à l'échelle d'un seul pays. C'est dans ce contexte, qu'une alliance européenne de recherche a été créée en 2020 pour favoriser l'émergence de projets européens sur la base de ce qui a été entrepris dans le cadre du programme prioritaire de recherche français « Cultiver et Protéger Autrement ». Cette alliance européenne, intitulée « *Towards a Chemical Pesticide-Free Agriculture* » a été signée par 34 laboratoires de recherche situés dans 20 pays européens. Elle vise à contribuer à un système agricole et agroalimentaire européen durable et exempt de pesticides de synthèse ou ayant un impact significatif sur l'environnement, grâce au développement de programmes de recherche et d'innovation interdisciplinaires (INRAE, 2021).

Développer une agriculture sans pesticides impactera l'ensemble des acteurs des filières agricoles et agroalimentaires. Comme exposé dans les premiers chapitres de l'ouvrage, l'utilisation des pesticides ne dépend pas seulement de facteurs technico-économiques intrinsèques aux exploitations agricoles, mais est aussi liée à des questions d'organisation et de fonctionnement des filières. Au cours des dernières décennies, les différents acteurs de l'amont et de l'aval de la production agricole ont adapté efficacement leurs activités et leurs stratégies à la disponibilité à bas prix des pesticides. Un changement drastique d'objectif nécessite donc un engagement de l'ensemble des acteurs du secteur agricole, qui devront innover pour changer de stratégie et adapter leurs activités aux nouvelles exigences inhérentes aux nouveaux modes de production. Cette évolution va ainsi au-delà des pratiques des agriculteurs, qui ne sont qu'un maillon de cette chaîne de valeur longue et complexe. Les consommateurs devront aussi faire évoluer leurs pratiques et leurs habitudes de consommation. Pour cela, des politiques publiques ciblées et adaptées seront essentielles afin d'accompagner et d'inciter ces acteurs au changement, et différents dispositifs possibles ont été présentés dans cet ouvrage. Au-delà de l'accompagnement des agriculteurs, les entreprises d'amont et d'aval auront certainement besoin de soutien dans la phase de transition pour permettre l'innovation nécessaire à la mise en place de nouvelles filières. Concernant les consommateurs, il est illusoire

de penser proposer les mêmes produits, à des prix aussi bas qu'actuellement : le développement de nouvelles habitudes alimentaires sera primordial, associé à une réelle prise en compte des contraintes économiques de certains, dans un esprit d'équité pour l'accès à une alimentation de qualité. Néanmoins, ces changements radicaux sont également porteurs d'opportunités : proposer de nouveaux produits aux consommateurs grâce aux nouvelles variétés et aux nouvelles cultures développées, avoir une alimentation plus saine et variée, ou encore être plus autonome dans la conduite de son exploitation agricole en se passant de certains intrants et en assurant la fourniture de nouveaux services écosystémiques. L'agriculture sans pesticides représente au final autant un choix de société qu'un défi technologique, et peut se révéler profitable pour le plus grand nombre. Construite pour assurer la fourniture de biens communs au même titre que la production de biens privés, cette agriculture sans pesticides assure un service indispensable aux futures générations.

La question se pose enfin des risques encourus par les agriculteurs lors d'une telle transition aussi majeure. Dans des systèmes pensés pour se passer de la protection chimique, reposant sur les régulations naturelles et des mesures prophylactiques efficaces, les risques de pertes de récolte sont maitrisés de manière bien plus efficace que dans des systèmes conventionnels dans lesquels on supprimerait les pesticides. Mais dans une optique sans pesticides, le risque d'une maitrise insuffisante des bioagresseurs subsiste, en particulier dans la phase de mise en place de nouvelles pratiques. Il faut, dès lors, pouvoir couvrir financièrement ce risque si on souhaite un engagement durable des agriculteurs dans cette voie. Pour cela, il est possible de développer des dispositifs assurantiels ou actuariels sous réserve que le risque ne soit pas systémique et que chaque agriculteur ait mobilisé l'ensemble des pratiques adaptées à sa situation.

La nécessaire transition de la protection des cultures repose fortement sur la restauration des régulations biologiques à l'échelle des parcelles agricoles, des exploitations et des paysages, et ceci en mobilisant une fois encore toutes les innovations que la recherche va permettre. Mais l'élément incertain est la vitesse à laquelle les milieux agricoles vont retrouver ces régulations. Après des décennies d'utilisation de pesticides, des résidus de ces produits persistent dans les sols, même conduits en AB : c'est ce que Riedo *et al.* (2021) appellent « le fantôme du passé conventionnel ».

▸▸ Penser le zéro pesticide avec les autres enjeux d'une agriculture durable

L'ambition zéro pesticide s'insère dans une vision plus large d'une agriculture plus durable, d'un point de vue environnemental, économique ou social, répondant aux enjeux d'aujourd'hui et aux besoins des générations futures. Dans cette optique, la santé des plantes, tout comme la biodiversité, peut être réfléchie en termes de bien commun, pour lequel notre responsabilité vis-à-vis des générations futures impose de mettre en place des actions ambitieuses dès maintenant afin de les préserver. Cependant, l'utilisation, ou l'absence d'utilisation, des pesticides impacte d'autres grandes problématiques. La lutte contre le changement climatique peut apparaître en première analyse en contradiction avec certaines pratiques du zéro pesticide. Par exemple, le désherbage mécanique tel que pratiqué actuellement engendre

potentiellement plus d'émissions de gaz à effet de serre que l'utilisation des pesticides. Néanmoins, cette vision n'est que partielle car pour réellement se passer des pesticides, une reconception en profondeur du système de culture est le plus souvent nécessaire, impliquant par exemple le développement de couverts végétaux et de structures paysagères, qui stockent du carbone. L'augmentation de la fréquence d'événements extrêmes, due au changement climatique, peut également complexifier la mise en place de stratégies pour se passer des pesticides. Par exemple, des conditions particulièrement douces et humides entraînent de fortes attaques de mildiou en viticulture, qu'il peut être très difficile de gérer aujourd'hui sans faire appel à des fongicides de synthèse. Le développement d'une prophylaxie efficace associée à une épidémiosurveillance poussée pourra limiter ce phénomène dans des systèmes sans pesticides bien conçus. Dans tous les cas, les stratégies pour restaurer la biodiversité devront être réfléchies en prenant en compte le changement climatique.

La transition climatique se traduit par une modification du régime des températures, avec tendanciellement une augmentation moyenne à l'échelle de la planète et une augmentation des variations interannuelles. Mais elle a aussi pour incidence majeure une modification des régimes pluviométriques et des disponibilités en eau. La France, et plus largement l'Europe de l'Ouest, sont actuellement marquées par un climat tempéré, avec une pluviométrie importante, répartie sur l'ensemble de l'année. Aussi, à l'exception de quelques productions en semis de printemps et quelques cultures spécialisées, c'est l'eau issue des pluies qui assure l'alimentation hydrique des cultures, l'irrigation étant limitée, et essentiellement à des fins d'ajustement. Or, les scénarios climatiques font apparaître une évolution des régimes pluviométriques, avec notamment une réduction de la disponibilité en eau en été et une augmentation des pluies en automne et en hiver, mais aussi une augmentation des évapotranspirations en raison de l'augmentation des températures moyennes et une augmentation des phénomènes orageux extrêmes. Cette incertitude concernant les régimes pluviométriques vient ajouter de la complexité à l'évolution des systèmes de culture. En effet, la disponibilité en eau est indispensable tant pour l'introduction de nouvelles espèces en production à des fins de diversification, que pour l'implantation de cultures en relais (*relay-cropping*), ou l'installation de plantes de service et cultures intermédiaires susceptibles de permettre une meilleure gestion des bioagresseurs. Les réflexions sur une évolution vers des systèmes de production n'utilisant pas de pesticides, nécessitent donc de considérer la question de la disponibilité en eau pour assurer que des systèmes sans pesticides puissent être implantés, et ceci en intégrant la diversité des conditions locales à travers la France.

Outre l'eau, l'utilisation des engrais minéraux, doit être questionnée. La stratégie que nous avons développée dans cet ouvrage centré sur les pesticides a des conséquences sur l'utilisation des engrais de synthèse, en particulier azotés et phosphatés. On sait que les engrais de synthèse qui sont massivement utilisés dans l'agriculture conventionnelle, permettent d'atteindre les rendements et la régularité des rendements que nous connaissons actuellement. Mais les engrais de synthèse sont issus de ressources non renouvelables : les engrais azotés sont obtenus à partir de gaz naturel tandis que les engrais potassiques et phosphatés proviennent de gisements rocheux dont la disponibilité s'amenuise et qui, étant détenus par un très faible nombre de pays dans le monde, engendrent une insécurité stratégique. Ne pas prendre en compte ces éléments remettrait en question la durabilité d'une approche où la suppression des

pesticides serait visée de manière totalement indépendante de la gestion de la fertilisation. Ainsi, à la différence de l'AB, l'agriculture zéro pesticide que nous proposons continuera d'utiliser des engrais de synthèse, mais cette utilisation est bien appelée à diminuer. Comme souligné dans les chapitres 3, 4 et 5, la conception d'une agriculture sans pesticides doit s'accompagner d'une évolution des pratiques et des systèmes vis-à-vis des besoins en engrais. D'une part, les systèmes de culture doivent intégrer plus de légumineuses qui fixent symbiotiquement l'azote de l'air, et donc limitent le recours aux engrais azotés, et des espèces, comme les lupins, le pois chiche ou le sarrasin qui présentent des voies particulières pour mobiliser le phosphore insoluble très présent dans nos sols. D'autre part, la sélection variétale doit identifier des variétés capables de mieux valoriser les éléments nutritifs au sein de complexes organiques (présents dans le sol ou les effluents), de pouvoir interagir avec leur environnement biotique à des fins de défense, au lieu de sélectionner uniquement les variétés sur leur capacité à valoriser les nutriments des engrais et l'eau par unité de biomasse. Enfin, en donnant une place majeure à la qualité des sols pour une meilleure protection contre les parasites telluriques, l'agriculture sans pesticides contribue également à augmenter la fertilité des sols, ce qui présente par ailleurs l'intérêt d'un stockage accru de carbone. Ainsi, même si l'ambition zéro pesticide ne vise pas l'arrêt de l'utilisation des engrais synthétiques, elle s'inscrit dans une logique globale de réduction de leur usage et d'autonomie accrue des exploitations vis-à-vis de ces intrants.

Enfin, la perspective d'une production sans pesticides pose la question de la sécurité alimentaire mondiale. Une des faiblesses potentielles du développement de systèmes sans pesticides est la diminution des rendements, qui pourrait fragiliser la capacité de l'agriculture à nourrir le monde. Bien que l'utilisation d'engrais synthétiques limite ce phénomène par rapport à l'AB, il est peu probable que les rendements actuels de certaines cultures, conduites aujourd'hui de manière très intensive comme le blé, se maintiennent sans pesticides. Mais s'arrêter à ce constat signifie que l'on réfléchit à système constant, avec l'ambition de produire les mêmes produits agricoles aux mêmes endroits. Dans une logique de re-conception, cette hypothèse est écartée, en se donnant la possibilité de produire autrement et aussi d'autres espèces. À rebours de l'hypothèse d'une production plus faible, les cultures en association, la mobilisation de plantes de service et le *relay-cropping* avec plusieurs productions sur une surface donnée la même année, permettent d'envisager une production de biomasse, d'énergie et de protéines accrue. Le zéro pesticide aura également des impacts sur les types de cultures produites. Cela amènera certainement à des réorientations des flux commerciaux sur certaines productions, avec par exemple une diminution de la dépendance aux importations pour les légumineuses alimentaires, du fait de leur accroissement dans les rotations. En fait, cette évolution vers le zéro pesticide soulève la question non seulement de l'évolution du modèle agricole que l'on souhaite pour le XXIe siècle, mais aussi de celle des systèmes alimentaires. Changer ses habitudes alimentaires et relocaliser les chaînes de transformations sont donc des leviers clés pour une agriculture sans pesticides. Ainsi, si les travaux de recherche sur le sans pesticides traduisent un changement de paradigme pour la protection des cultures, ils s'insèrent plus largement dans un changement profond d'agriculture et de systèmes alimentaires, indispensable pour un développement réellement durable, capable de répondre aux défis alimentaires, climatiques et de biodiversité pour la génération présente et pour les générations futures.

Références bibliograhiques

INRAE, 2021. Alliance Européenne de Recherche - Vers une agriculture sans produits pesticides. https://www6.inrae.fr/cultiver-proteger-autrement/Europe-international/Alliance-Europeenne-de-Recherche

Riedo J., Wettstein F.E., Rösch A., Herzog C., Banerjee S., Büchi L., *et al.*, 2021. Widespread occurrence of pesticides in organically managed agricultural soils—the ghost of a conventional agricultural past?, *Environmental Science & Technology*, 55(5) :2919-2928. https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06405

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, *Agricultural Systems*, 185 :102939. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102939

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	*Clustered Regularly Interspaced Palindromic Repeats/CRISPR associated protein 9*
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	*European Food Safety Authority*
E-S-R	*Efficience-Substitution-Reconception*

FAO	*Food and Agriculture Organization of the United Nations (en français, Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture)*
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	*General Agreement on Tariffs and Trade*
GDA	groupement de développement agricole
GIE	groupement d'intérêt économique
GPS	*Global Positioning System* (en français : Géo-positionnement par satellite)
HDR	*Homology-Directed Repair*
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	*Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem*
IPM	*Integrated Pest Management* (en français : protection intégrée des cultures, PIC)
LiDAR	*Light Detection and Ranging*
LMR	limites maximales de résidus
MAE	mesures agro-environnementales
MAEC	mesures agro-environnementales et climatiques
NHEJ	*Non-Homologous End Joining*
NODU	nombre de doses utiles
N(P)BT	*New (Plant) Breeding Techniques*

OAD	outils d'aide à la décision
OECD	Organisation de coopération et de développement 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	*Quantitative Trait Loci* (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	*Site-Directed Nuclease*
SNP	*Single-Nucleotide Polymorphism*
SSP	Service de la statistique et de la prospective
TALEN	*Transcription Activator-Like Effector Nuclease*
TGAP	taxe générale sur les activités polluantes
TIS	technique de l'insecte stérile
UE	Union européenne
VATE	valeur agronomique, technologique et environnementale
ZFN	*Zinc Finger Nuclease*
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

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

Fadhuile Adelaide
GAEL, Grenoble
adelaide.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
EliLoCom

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 sientifique 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

9 782759 233106

ISSN : 1777-4624
Réf. : 02817